

Т. Рикитаке

# Предсказание землетрясений

Издательство  
**«МИР»**  
Москва 1979

Developments in  
Solid Earth Geophysics

9

# *Earthquake prediction*

**Tsuneji Rikitake**

Professor of Earth Sciences  
Department of Applied Physics  
Faculty of Science  
Tokyo Institute of Technology, Tokyo, Japan.



**Elsevier  
Scientific  
Publishing  
Company**

Amsterdam-Oxford-New York 1976

Т. Рикитаке

550.34

# Предсказание землетрясений

Перевод с английского

А. Л. Петросяна и

Н. И. Фроловой

под редакцией

чл.-корр. АН СССР

Е. Ф. Саваренского



Издательство  
«МИР»  
Москва 1979



2799

В книге известного японского геофизика в интересной и доступной форме рассмотрены различные явления, сопутствующие землетрясениям. Изложены научные программы различных стран, в особенности Японии, основанные на детальном изучении деформаций земной коры, скоростей сейсмических волн и других физических параметров — предвестников землетрясений, на базе которых можно пытаться составить прогноз.

Книга представит большой интерес для геофизиков, геологов — как специалистов, так и студентов, а также для административных работников и для всех интересующихся современной наукой.

*Редакция литературы по космическим исследованиям,  
астрономии и геофизике*

1903020000

P  $\frac{20802-115}{041(01)-79}$  115-79

© 1976 by Elsevier Scientific Publishing Company, Amsterdam  
© Перевод на русский язык, «Мир», 1979

Прогноз землетрясений в настоящее время является одной из актуальнейших проблем наук о Земле, в значительной степени одной из главных задач физики Земли и самой острой задачей сейсмологии.

Под прогнозом следует понимать предсказание места и времени возникновения будущих землетрясений с указанием их возможной силы и характера проявления на поверхности Земли.

Над отдельными сторонами этой проблемы уже давно работают исследователи. Большие успехи достигнуты в предсказании мест будущих землетрясений. Созданы карты сейсмического районирования, к настоящему времени построенные для ряда стран. Первая такая карта-схема была составлена в СССР в 30-х годах коллективом сотрудников Сейсмологического института АН СССР, организованного в 1928 г. Последний вариант карты сейсмрайонирования был подготовлен в 1976 г. в Институте физики Земли АН СССР совместно с сейсмологами и геологами союзных республик. В настоящее время размах строительства в СССР настолько широк, что в сейсмостойком строительстве приходится учитывать вероятность возникновения землетрясений различной силы. Этим современное сейсмическое районирование отличается от его предыдущего этапа, когда карты районирования составлялись по данным о максимально сильных землетрясениях. Однако последние в некоторых случаях бывают настолько редки, что квазипериоды их возможного повторения значительно превосходят срок существования или время полного изнашивания того или иного сооружения или здания.

Что касается характера проявления сильных землетрясений на поверхности Земли, то эта сторона проблемы прогноза в значительной степени разработана благодаря осуществлению сейсмического микрорайонирования площадок для строительства зданий и сооружений или их комплексов. Методы сейсмического микрорайонирования еще не совершенны, поскольку они зачастую базируются на предположении о полной упругости сейсмических процессов. Для сооружений наиболее опасны

необратимые процессы в грунтах и верхних геологических напластованиях, вызываемые сильными сотрясениями. Такие эффекты создают неравномерную просадку или разжижение грунтовой массы. В связи с этим весьма совершенные, вполне сейсмостойкие здания, несмотря на сохранение их целостности, оказываются непригодными для эксплуатации и жилья из-за их значительного наклона или даже падения ввиду нарушения основания при сильных подземных толчках. Важной проблемой является экстраполяция данных о сотрясениях при слабых частых землетрясениях на случаи землетрясений значительной силы, хотя и редких.

Введение вероятностных оценок для предсказания силы сотрясений затрагивает вопросы экономики и заставляет учитывать экономический эффект в сейсмостойком строительстве. Вопрос о землетрясениях и их проявлениях в крупных городах и важен и сложен. По этой причине на протяжении последних двух-трех лет получили развитие исследования не только экономического, но и социального характера, когда нужно предвидеть возможное поведение людей и целых коллективов. Это существенный вопрос для уменьшения числа жертв от сильных землетрясений и предотвращения паники в городах со значительной плотностью населения. Эти обстоятельства привели к развитию, в рамках программы прогноза землетрясений, комплекса работ социально-экономического характера (предложенная автором в последней главе программа работ, естественно, отражает особенности общественно-экономических условий Японии и США).

Конечно, наиболее острым вопросом прогноза землетрясений является предсказание времени возникновения сильных землетрясений в том или ином пункте интересующей нас территории. Решения этой задачи с нетерпением ждут сотни миллионов людей, проживающих в сейсмоопасных зонах Земли.

Попытки постановки задачи предсказания момента сильных землетрясений эпизодически предпринимались во многих странах, в особенности в связи с разрушительными землетрясениями. Первая систематическая научная программа поисков предвестников землетрясений была составлена в СССР после разрушительного землетрясения 1948 г. в Ашхабаде. Подобные программы в зарубежных странах, и прежде всего в Японии и США, были разработаны позднее.

Однако реализация этих программ в значительной мере стала возможной только в последние годы в связи с созданием электронно-вычислительных устройств и применением их для регистрации колебаний и обработки данных. Успеху способствовала и новая техника геофизических измерений и их автоматической обработки. К настоящему времени возможность

предсказания времени возникновения сильных землетрясений значительно усилилась благодаря обнаружению не одного-двух, а гораздо большего числа явлений — предвестников приближающихся землетрясений, когда вероятность предсказания может быть подтверждена многочисленными инструментальными наблюдениями. Наличие ряда одновременных предвестников значительно увеличивает надежность предсказания времени сильных землетрясений и позволяет активизировать решение этой задачи, хотя и поныне это исследование ведется путем эмпирического поиска и в меньшей степени — путем целеустремленного теоретического анализа.

Поиски предвестников и прогноз землетрясений — таков современный этап развития сейсмологии. Он сильно меняет содержание сейсмологии, поскольку классическая схема — изучение распространения сейсмических волн и строения Земли на этой основе — заменяется изучением свойств сложных сред в преддверии землетрясений и процессов разрушения внутри очагов землетрясений. Здесь исследование упругих колебаний и сейсмических волн в сплошных средах в значительной мере заменяется изучением напряжений в двух- или трехфазных средах, обладающих наряду с твердым скелетом порами и трещинами. Это заставляет привлекать к решению современных задач не только геофизиков и геологов, но в первую очередь физиков, специалистов по высоким давлениям и разрушению твердых материалов.

В связи с этим приобретают актуальное значение лабораторные эксперименты на образцах горных пород в условиях высоких давлений и температур, господствующих в недрах Земли. Другим необходимым направлением работ являются геолого-геофизические исследования, требующие проведения точных и непрерывных измерений вариаций многих физических полей и свойств земной коры, ее деформации, магнитно-электрических процессов, сейсмичности с ее характеристиками, газозо-жидкого режима и пр.

Предлагаемая советскому читателю книга известного японского ученого профессора Т. Рикитакэ содержит подробную сводку данных о явлениях, предшествующих землетрясениям. Это особенно ценно потому, что вся территория Японии высокосейсмична и прогноз землетрясений с давних пор занимал умы японских ученых.

В книге подробно рассмотрена японская программа, представляющая особый интерес для развития работ по прогнозированию, описана деятельность Международной комиссии по предсказанию землетрясений, созданной более десяти лет назад по инициативе советских геофизиков. Большое внимание уделено выявлению деформаций земной коры по геодезическим

данным — наиболее развитому в Японии научному направлению поисков предвестников землетрясений. Приводятся сведения об изменении скоростей распространения сейсмических волн в преддверии землетрясений; указывается, что эти явления впервые были обнаружены в СССР и представляют большую ценность. Очень важен анализ явления дилатансии, сухих трещин и трещинообразования в связи с возникновением землетрясений. В книге имеются большие таблицы, содержащие сводку фактических данных о землетрясениях и их предвестниках, рассмотрены вероятностно-статистические подходы к проблемам прогноза землетрясений.

Книга Т. Рикитакэ написана простым, живым языком, содержит большое число примеров и иллюстраций. Она является в известной степени справочно-энциклопедической монографией, содержащей, помимо описания обширного фактического материала о предвестниках землетрясений, сводку теоретических соображений о возможности прогнозирования землетрясений, главным образом статистических гипотез. Несомненной ценностью книги является обилие примеров и их анализ.

Книга представляет несомненный интерес, и квалифицированный советский читатель сумеет получить полезные и интересные сведения по сложному и актуальному вопросу предсказания землетрясений. Круг читателей ее очень широк: от физиков до геологов, от экономистов до социологов.

*Е. Ф. Саваренский*

## ПРЕДИСЛОВИЕ АВТОРА К РУССКОМУ ИЗДАНИЮ

Для меня большая честь и удовольствие видеть издание моей книги «Предсказание землетрясений» в переводе на русский язык.

Я надеюсь, что советские коллеги почерпнут из нее описание некоторых интересных результатов, опубликованных в Японии, которые не были известны из-за языковых трудностей.

Однако советские читатели обнаружат в книге некоторые пропуски в описании результатов советских ученых из-за моего незнания русского языка. Надеюсь, что советские результаты в дальнейшем будут опубликованы на доступном мне языке.

В заключение я хочу поблагодарить проф. Е. Ф. Саваренского за его любезное содействие при переводе моей книги на русский язык.

*Т. Рикитаке,*

профессор наук о Земле  
Токийского технологического  
института

Токио, Япония, 1977 г.

## ПРЕДИСЛОВИЕ

Проблема предсказания землетрясений в последнее время привлекает внимание ученых и общественности, особенно в таких странах, как Япония, США, СССР, КНР и т. п., которые время от времени страдают от разрушительных землетрясений. Изучение проблемы в этих странах дало некоторые результаты, позволяющие надеяться на предсказание, если не всех, то некоторых землетрясений уже в ближайшем будущем.

Автор настоящей книги, проработавший более 30 лет в Сейсмологическом институте Токийского университета, стал участником работ по предсказанию землетрясений в соответствии с национальной программой Японии. Первоначально же он занимался геомагнетизмом. Поскольку он был одним из старейших сотрудников института, относящегося к числу наиболее крупных учреждений, занимающихся исследованием землетрясений в Японии, для него было естественным принять участие в общенациональной программе такого рода.

В связи с тем что в 60-х годах во многих странах усилился интерес к предсказанию землетрясений, автора просили организовать ряд международных симпозиумов по этой тематике; кроме того, он является секретарем Международной комиссии по предсказанию землетрясений, входящей в состав Международной ассоциации по сейсмологии и физике земных недр. В продолжение всей этой деятельности автор чувствовал, что необходимы руководство и координация работ по предсказанию землетрясений. Это нужно не только студентам, начинающим изучать сейсмологические аспекты предсказания, но и непрофессионалам, имеющим дело с современными достижениями по прогнозу землетрясений. Необходимо также убедить административно-хозяйственные органы, что предсказание землетрясений в принципе возможно.

По всем этим причинам автор принялся за написание книги о прогнозе землетрясений. Некоторые его друзья говорили, что сейчас не время писать такую книгу, поскольку исследования по этой проблеме быстро развиваются и новые данные накапливаются с большой скоростью. Автор согласен с ними. Но все-таки он считает, что написать подобную книгу было необходимо

и это несомненно стимулирует дальнейшие исследования. Для расширения круга читателей автор старался как можно меньше прибегать к математике, хотя в некоторых главах все же встречаются математические выводы.

Многие работы, посвященные предсказанию землетрясений, встречаются в исторических документах, а также в периодических журналах и книгах, издаваемых на японском языке, но они трудны для понимания за пределами Японии. Нет сомнений, что Япония сыграла ведущую роль в развитии исследований, направленных на предсказание землетрясений. Поэтому автор подробно пишет о работах, проводимых в Японии, и это может быть полезно и для читателей в других странах. В книге описывается также ряд китайских работ.

Что касается русской литературы, то автор мог обращаться только к переводам на японский или английский, так как он не владеет русским языком. Поэтому автор опасается, что он мог пропустить важные работы, опубликованные на русском языке. Он искренне надеется, что кто-нибудь использует советскую литературу и издаст аналогичную книгу по предсказанию землетрясений, например, на английском языке.

Автор с удовольствием отдает должное проф. Т. Хагиваре, председателю Координационного комитета по прогнозу землетрясений в Японии и первому председателю Международной комиссии по предсказанию землетрясений, за его энергичную деятельность, направленную на развитие исследований по прогнозу землетрясений. Автора очень вдохновляли почти ежедневные дискуссии с проф. Хагиварой во время работы в Сейсмологическом институте. Многие дал автору по разным областям геофизики проф. Т. Нагата, ныне директор Национального института полярных исследований в Японии. Автор глубоко благодарен этим своим старшим коллегам. Многие сотрудники Сейсмологического института также оказывали содействие. И среди них автор особенно признателен профессорам И. Цубокава, К. Могги и И. Хагивара, чьи геодезические и лабораторные данные сыграли важную роль в разработке теории предсказания землетрясений.

Автор с благодарностью вспоминает личные беседы с д-рами И. Харадой, Д. Дамбарой, М. Тадзимой, Н. Фудзитой и другими сотрудниками Института географических исследований. Многие данные автор получил от наблюдателей и исследователей, работающих в областях, пограничных с предсказанием землетрясений. Особую благодарность ему хочется выразить д-рам Т. Мацуде и К. Накамуре из Сейсмологического института за геологическую информацию, д-рам Т. Микуно и К. Оикэ из Университета Киото за микросейсмические данные

и д-рам Й. Танаке и Т. Танаке из Университета Киото за сведения о движениях земной коры.

Д-р И. Ямадзаки в Сейсмологическом институте по предложению автора произвел уникальные наблюдения изменений удельного электрического сопротивления пород. Кроме того, он помог автору по многим разделам, касающимся развития исследований по предсказанию землетрясений. Автор искренне признателен д-ру Ямадзаки за помощь.

Говоря о поддержке, оказанной заокеанскими коллегами автору в его работе, в первую очередь следует упомянуть сотрудников Объединенного института по исследованиям окружающей среды (CIRES), направляемого Университетом штата Колорадо и Национальным управлением по океаническим и атмосферным исследованиям (NOAA). Автор с особой благодарностью вспоминает множество полезных бесед с проф. К. Кислинггером, директором CIRES. Большую помощь автору оказала литература, которую он вывез из Китая, находясь в составе сейсмологической делегации США, посетившей Китай в 1974 г.

Д-р Э. Ингдал с пристрастием прочел рукопись, а м-р Дж. Требинг любезно проверил английскую стилистику. Д-р Чан помог автору в чтении китайской литературы. Автор приносит им искреннюю благодарность. Значительная часть этой книги была закончена в то время, когда автор проводил занятия на Высших курсах повышения квалификации в CIRES в 1974 и 1975 гг.

Автор весьма признателен д-ру Г. Ленсену из Геологической службы Новой Зеландии и д-ру С. Холдалу из NOAA за предоставленные ими данные о движениях земной коры.

В заключение автор рад выразить благодарность д-ру ван Эйзинге из издательства «Эльзевир», который настоятельно советовал автору написать эту книгу и в ходе работы над ней постоянно подбадривал его.

*Т. Рикитакэ*

## ВВОДНЫЕ ЗАМЕЧАНИЯ

Уметь предсказывать землетрясения очень важно как для сейсмологов, так и для широких слоев населения. В такой высокосейсмичной стране, как Япония, где люди давно страдают от губительных последствий землетрясений, желание предвидеть землетрясение было столь сильным, что еще в недалеком прошлом люди доверяли религиозным предсказаниям. Лишь в последние годы прогнозирование землетрясений стало одним из разделов наук о Земле. Общенациональная программа исследований по прогнозу землетрясений в Японии была подготовлена только в начале 60-х годов. Значительные исследования по этой теме в СССР<sup>\*)</sup>, КНР, США и других странах, по видимому, стали проводиться несколько позже.

В последнее время публикуется много статей по предсказанию землетрясений, но общих обзоров мало, и трудно судить об общем состоянии проблемы. Дадим перечень работ, по которому можно проследить за прогрессом в исследованиях по предсказанию землетрясений.

- 1962: *Hagiwara T.*, Earthquake prediction (на японском языке).  
*Tsuboi C. et al.*, Prediction of Earthquake — Progress to Date and Plans for further Development (Report of the Earthquake Prediction Research Group in Japan).
- 1964: *Oliver J.*, Earthquake Prediction.
- 1965: *Press F.*, Earthquake prediction: a challenge to geophysicists.  
*Press F. et al.*, Earthquake Prediction: a Proposal for a Ten Year Program of Research.
- 1966: *Båth M.*, Earthquake prediction.  
*Lomnitz C.*, Statistical prediction of earthquakes.  
*Press F., Brace W. F.*, Earthquake prediction.  
*Rikitake T.*, A five-year plan for earthquake prediction research in Japan.

<sup>\*)</sup> В СССР проблема была поставлена в 1949 г.—Прим. ред.

- 1967: *Hagiwara T., Rikitake T.*, Japanese program on earthquake prediction.
- 1968: *Press F.*, A strategy for an earthquake prediction research program.  
*Rikitake T.*, Earthquake prediction.  
*Саваренский Е. Ф.*, О предсказании землетрясений.
- 1969: *Hagiwara T.*, Prediction of earthquakes.  
*Hagiwara T., Rikitake T.*, La prevision dei terremoti.  
*Hagiwara T., Rikitake T.*, Neue Entwicklungen in der Erdbebenprognose.  
*Pakiser L. C. et al.*, Earthquake prediction and control.
- 1970: *Kanamori H.*, Recent developments in earthquake prediction research in Japan.  
*Нерсесов И. Л.*, Прогноз землетрясений в Советском Союзе.  
*Oliver J.*, Recent earthquake prediction research in the U. S. A.  
*Rikitake T.*, Prévision des tremblements de terre.
- 1971: *Coe R. S.*, Earthquake prediction program in the People's Republic of China.  
*Pakiser L. C., Healy J. H.*, Prédiction et controle des tremblements de terre.
- 1972: *Healy J. H. et al.*, Prospects for earthquake prediction and control.  
*Rikitake T.*, Earthquake prediction studies in Japan.  
*Rikitake T.*, Problems of predicting earthquakes.  
*Rikitake T.*, An earthquake prediction operation in an area south of Tokyo.  
*Садовский М. А. и др.*, Процессы, предвещающие сильные землетрясения в некоторых районах Средней Азии.  
*Саваренский Е. Ф. и др.*, Геофизические принципы изучения предвестников землетрясений.
- 1973: *Hagiwara T.*, The development of earthquake prediction research (на японском языке).
- 1974: *Bolt B. A.*, Earthquake studies in the People's Republic of China.  
*Johnston M. J. S. et al.*, Earthquakes — can they be predicted or controlled?  
*Kisslinger C.*, Earthquake prediction.  
*Rikitake T.*, Japanese national program on earthquake prediction.  
*Садовский М. А., Нерсесов И. Л.*, Прогноз землетрясений по комплексным геофизическим данным.

*Саваренский Е. Ф.*, Вводные замечания и советская национальная программа по предсказанию землетрясений. 1975: *Press F.*, Earthquake prediction.

Полные библиографические ссылки на эти работы приведены в списке литературы в конце книги. Возможно, имеются и другие обзорные статьи, которые автор пропустил. Шмидт [387, 388] опубликовал подробные библиографические списки статей, посвященных предсказанию землетрясений, включая работы, написанные на русском языке. Поскольку автор не читает по-русски, он вполне мог пропустить обзорные статьи, вышедшие на русском языке. Очень жаль также, что многие работы, опубликованные в Китае, в настоящее время недоступны автору, и не исключено, что важные обзоры, изданные на китайском языке, прошли мимо него.

Основываясь на указанных обзорах и многочисленных частных статьях, автор попытался подытожить в этой книге наиболее современные сведения о предсказании землетрясений. Основной акцент сделан на японские работы, большинство которых неизвестно за пределами Японии вследствие языковых трудностей. Автор убежден, что полученные в Японии данные очень важны для дальнейшего развития исследований по прогнозу землетрясений: сейсмичность Японии высока и здесь осуществляются хорошо организованные работы по предсказанию землетрясений.

В гл. 2 описаны легенды, касающиеся ненаучного предсказания землетрясений,— в основном на базе японских источников. Большинству этих легенд, взятых из разных исторических документов, трудно доверять. Однако эта глава может предоставить некоторый интерес для читателей-неяпонцев, поскольку классические произведения японской литературы в других странах мало известны. Все написанное в этой главе показывает, насколько велика даже в средние века была жажда понять и уметь предвидеть катастрофические землетрясения.

Наука о землетрясениях возникла в Японии около 100 лет назад с наступлением новой эпохи в ее истории. В гл. 3 рассказано о развитии разных разделов науки, связанных с предсказанием землетрясений. Можно удивляться, что в Японии, несмотря на многочисленные разрушительные землетрясения, до последних 15 лет не наблюдалось активности в постановке исследований по их прогнозу. 30 лет назад, когда автор был еще студентом, даже говорить о предсказании землетрясений сейсмологам не полагалось. Считалось, что сейсмолог должен работать над определенными узкими вопросами и писать статьи.

За десятилетия накопились данные, которые можно было бы использовать для развития научного предсказания землетрясений. В гл. 4 говорится, что исследовательская группа по прогнозу землетрясений была сформирована в Японии к 1960 г. Теперь уже японские сейсмологи стали активно обсуждать возможные подходы к решению проблемы предсказания землетрясений. Результат группового обсуждения был опубликован в виде ныне известного доклада [452]. Он явился программой исследований по прогнозированию землетрясений на последующие годы.

В США, по-видимому, заметных работ по предсказанию землетрясений не велось до 1964 г., когда в Токио и Киото состоялась американо-японская конференция по этой проблеме. Вскоре после конференции Аляску потрясло разрушительное землетрясение с магнитудой 8,4, которое нанесло большой материальный ущерб. В последующие годы предсказание землетрясений стало одной из важнейших проблем наук о Земле в США. Никакой общенациональной программы там вплоть до 1974 г. не было принято, тем не менее значительные средства, выделенные Национальным научным фондом и Геологической службой США, были затрачены на развитие исследований по прогнозу землетрясений. В некоторых работах, например по регистрации микроземлетрясений, в США достигнуты большие успехи, чем в Японии, хотя соответствующий проект начал осуществляться совсем недавно.

С другой стороны, интенсивные исследования, связанные с проблемой предсказания землетрясений, с успехом ведутся в Средней Азии и на Камчатке в СССР [338, 344, 384, 385]. Согласно сообщениям Ку [63] и Болта [39], вопросом предсказания землетрясений активно занимаются в КНР.

Программы исследований, проводимых в этих странах, приведены в обобщенной форме в гл. 4, хотя о программах СССР и КНР автору была доступна лишь ограниченная информация.

Начиная с гл. 5 в книге рассматриваются различные геофизические параметры, имеющие отношение к предсказанию землетрясений. Одним из наиболее выдающихся открытий японских исследователей, активно принявших за изучение явлений, связанных с землетрясениями, после сильнейшего землетрясения 1923 г. в Канто, было выявление деформаций земной коры при сильных землетрясениях. В Японии начиная с 679 г. н. э. было известно, что деформация земной коры обычно сопровождается сильным землетрясением, но точные характеристики движений коры, связанных с землетрясениями, удалось установить лишь после проведения повторных геодезических съемок.

В гл. 5 описаны почти все известные из литературы деформации земной поверхности при землетрясениях, выявленные

в результате триангуляции, нивелирования и съемок с помощью геодезических инструментов. По данным этих исследований можно оценить такую важную характеристику, как предельная деформация земной коры. Геодезическим методом в ряде случаев были обнаружены деформации земной поверхности, предвещающие землетрясения.

Несколько классических примеров аномальных понижений уровня моря приведено в гл. 6. Однако приливными наблюдениями с помощью мареографов обнаружено лишь несколько случаев поднятия или опускания земной поверхности относительно уровня моря перед землетрясениями.

В дополнение к геодезическим работам, которые носят в основном прерывистый характер, уже давно ведутся непрерывные наблюдения за движениями земной коры с использованием наклономеров и деформографов различных типов, о чем читатель узнает в гл. 7. В Японии было обнаружено согласие между деформациями коры, выявленными геодезическими методами, и результатами наблюдений с помощью водотрубных наклономеров. Согласно опубликованным данным, наблюдения наклонов и измерения деформаций выявили сравнительно малое число предвестников. Как показывает статистика (гл. 15), сигналы, зарегистрированные наклономерами с горизонтальным маятником и высокочувствительными деформографами, зачастую «загрязнены» шумом, но тем не менее водотрубные и скважинные наклонометры дают достаточно надежную информацию о приближающемся землетрясении.

Гл. 8 отведена исследованиям сейсмичности, играющим важную роль в предсказании землетрясений. Современная теория тектоники плит оказала сильное влияние на основную идею прогнозирования землетрясений. Наиболее сильные землетрясения, происходящие перед островной дугой, интерпретируются как результат упругой отдачи коры вслед за огромным сжатием или сдвигом при движении плит. Несмотря на то что еще не установлен механизм умеренных и слабых землетрясений под островной дугой, несомненно, что для предсказания землетрясений важно контролировать накопление деформаций в земной коре. Применение тектоники плит для предсказания землетрясений рассмотрено в первом разделе гл. 8.

В той же гл. 8 описываются результаты современных исследований микроземлетрясений и последние достижения в этой области в Японии и США. Рассматриваются некоторые характеристики форшоковой активности, например уменьшение величины коэффициента  $b$  и ослабление сейсмической активности, переориентация осей сжатия при слабых землетрясениях перед главным подземным толчком и т. п., а также идея о зонах сейсмического затишья, которая играет важнейшую роль для



определения вероятного расположения эпицентров сильных землетрясений ближайшего будущего. Кратко упоминаются наблюдения микроземлетрясений в глубоких скважинах (что является единственным способом получать надежные результаты наблюдений в таком шумном городе, как Токио), а также подводная сейсмология.

Нам едва ли хорошо известно многое из форшоковой активности. В некоторых случаях множество микроземлетрясений предвещают умеренно сильное землетрясение, что наблюдалось несколько раз во время роя землетрясений 1965—1967 гг. в Мацусиро в Японии. С другой стороны, в соответствии с идеей о зонах сейсмического затишья предполагается, что в тех районах, где в настоящее время сейсмичность очень слаба, как, например, в Сан-Франциско и Южном Канто (район к югу от Токио), едва ли произойдет сильное землетрясение. Чтобы понять такие противоречивые концепции, нужно принять во внимание различие свойств земной коры в соответствующих зонах.

Весьма интересное открытие, имеющее отношение к прогнозу землетрясений, было сделано в результате исследования скоростей сейсмических волн в районе Гарма в Средней Азии, СССР. Было найдено, что отношение скорости продольных волн  $V_p$  к скорости поперечных волн  $V_s$  при слабых землетрясениях в некотором районе сильно уменьшается перед умеренно сильным землетрясением, происходящим в этом же районе. Как будет видно в гл. 9, автору этой книги было очень трудно поверить в то, что  $V_p$  изменяется почти на 15%, когда он впервые услышал об этом от проф. Саваренского [383]\*), рассказавшего об открытиях советских исследователей в своем докладе на симпозиуме в Цюрихе в 1967 г. Однако последующие работы в СССР и США подтвердили, что отношение  $V_p/V_s$  во многих случаях перед самым землетрясением уменьшается и затем восстанавливается до прежнего значения. Продолжительность периода аномальных значений отношения  $V_p/V_s$  связана с магнитудой приближающегося землетрясения. Поскольку аналогичные результаты были позднее получены в Японии и Китае, изменения отношения  $V_p/V_s$  или самой величины  $V_p$  стали одним из важных элементов в предсказании землетрясений. Как мы увидим в следующих главах книги, активное изучение физического механизма такого изменения привело к созданию дилатантной модели землетрясения\*\*).

Долгое время полагали, что изменения геомагнитного поля и земных токов (гл. 10) каким-то образом связаны с возник-

\*) Эти работы велись под руководством М. А. Садовского и И. Л. Нерсеова.— *Прим. ред.*

\*\*) В СССР — к гипотезе процесса трещинообразования.— *Прим. ред.*

новением землетрясений. Однако новейшие исследования показали, что большинство прежних данных являются ненадежными, так как они были получены, когда техника измерений и устранения помех была недостаточна. Сейчас, по-видимому, можно считать установленным, что сейсмомагнитный эффект едва ли превышает величину порядка  $10\gamma$  (т. е. около  $1/500$  напряженности земного магнитного поля). Изменение геомагнитного поля перед землетрясением может быть еще меньшим. Но, учитывая последние достижения в развитии техники измерений геомагнитного поля, контроль за магнитными предвестниками в условиях низкого уровня шумов не следует считать абсолютно безнадежным. Несмотря на множество сообщений об аномальных изменениях земных токов в связи с землетрясением, определенного и всеобщего факта изменения сигналов перед землетрясением не обнаружено. О заметных изменениях величины электрического сопротивления, предвещающих землетрясения, сообщалось первоначально в районе Гарма, а затем аналогичные наблюдения были проведены на разломе Сан-Андреас в Калифорнии, США. С другой стороны, предвещающие и сопровождающие сильное землетрясение изменения в сопротивлении грунта наблюдались в Японии на телесеизмических расстояниях с помощью резистивного вариометра с повышенной чувствительностью. Оказывается, что контроль за удельным электрическим сопротивлением является одним из средств обнаружения долгосрочных и краткосрочных предвестников.

Наблюдения последнего времени показали, что на таких разломах, как Сан-Андреас и Анатолийский, происходит непрерывная ползучесть (крип). Кроме того, есть много разломов, по которым породы смещались на протяжении исторического или геологического времени. Изучение этих активных геологических структур (гл. 11) показывает, что существует потенциальная опасность возникновения сильных землетрясений на таких активных разломах. Их следует рассматривать как объекты исследований по предсказанию землетрясений.

В гл. 12 излагаются современные взгляды на силу тяжести, подземные воды, дебит нефти и эмиссию радона как на средство предсказания землетрясений. Вплоть до последнего времени, отчасти из-за трудностей в измерении, этим элементам не уделялось особого внимания; но недавние работы позволяют предполагать, что изучение их могло бы сыграть важную роль в составлении прогноза землетрясений.

Работы по предсказанию землетрясений развивались в основном на эмпирической основе. Они не могли быть иными на ранней стадии исследований, так как мы крайне мало знали о механизме процесса землетрясения. Однако начавшееся

в 60-х годах «лабораторное изучение» землетрясений позволило сделать много важных выводов, касающихся предсказания землетрясений. Исследование сильно напряженных образцов горных пород привело к объяснению возникновения дилатансии, предваряющих толчок изменений скоростей сейсмических волн, удельного электрического сопротивления и т. д. Эксперименты с разрушением пород наметили пути для понимания роли порового давления, зависимости между форшоками, главным толчком и афтершоками и т. п. Можно сказать, что лабораторные эксперименты на образцах пород обеспечили теоретическую основу для работ по предсказанию землетрясений. Все эти вопросы, связанные с лабораторными экспериментами, рассматриваются в гл. 13.

Учитывая важную роль дилатантной модели в современной теории предсказания землетрясений, мы посвятили отдельную главу (гл. 14) обзору теории дилатансии.

В гл. 15 на базе всего того, что изложено в предыдущих главах, предлагается теория предсказания землетрясений. Возможно, кое-кто подумает, что подобная теория еще преждевременна, поскольку все необходимые данные для этого еще не получены. Однако, по мнению автора, попытка разработать теорию предсказания, какой бы преждевременной она ни была, будет стимулировать дальнейшие исследования.

В этой главе обзор статистических основ предсказания землетрясений не дается во всех деталях, так как автор считает, что основой надежного предсказания должно быть исследование изменений физических параметров и характеристик. Однако высказываются некоторые замечания о периодичностях возникновения землетрясений, поскольку автор опасается, что многие неправильно понимают смысл так называемого 69-летнего периода сильных землетрясений в районе Токио.

В начале гл. 15 описывается чисто эмпирический подход к оценке вероятностей магнитуд и времени возникновения грядущих землетрясений и рассматриваются недостатки подобного подхода. Затем на основе контроля за накоплением энергии деформации в совокупности со статистическим исследованием предельной деформации земной коры вводится более реалистичный, вероятностный способ оценки времени землетрясения. Далее излагаются подробные статистические данные о предвестниках землетрясений. Из такого исследования можно выделить долгосрочные и краткосрочные предвестники.

Описанные выше исследования позволяют наметить четыре типа прогноза землетрясений, а именно: статистический, долгосрочный, средне- и краткосрочный и сверхкраткосрочный прогнозы. Их можно сопоставить со следующими стадиями подготовки землетрясения: предварительной, накопления энергии

деформаций, возникновения дилатансии и непосредственных предвестников.

Вероятно, встретится немало трудностей в применении этой теории к реальным предсказаниям, поскольку получаемые данные еще долго будут недостаточными. С накоплением новых данных предложенная теория предсказания землетрясений в результате проверок реальностью, безусловно, будет усовершенствоваться.

Гл. 16 посвящена краткому описанию воздействий на землетрясения и контроля над ними — одному из наиболее претенциозных проектов наук о Земле. Хотя для осуществления этого проекта потребуется некоторое время, содействие ему будет, несомненно, стимулировать исследования по предсказанию землетрясений.

Если будет разработан практически приемлемый метод предсказания землетрясений, то большие трудности будут связаны с доведением результатов до населения. В гл. 17 описывается далеко не законченный спор о том, «как распространить предупреждение о землетрясении среди населения». Этот вопрос, включающий социологические, экономические, политические, психологические и другие аспекты, очевидно, выходит за рамки данной книги. Однако автор полагает, что о таких вещах уже пора думать всерьез, так как предсказание землетрясений, вероятно, станет возможным в ближайшем будущем.

Имеется несколько моментов, к которым автор хотел бы привлечь внимание читателя. Во-первых, в ряде случаев в этой книге одно и то же обозначение используется для разных величин. Например,  $\sigma$  в зависимости от обстоятельств обозначает либо напряжение, либо среднеквадратичное отклонение. Но автор уверен, что путаницы не возникнет, поскольку эти величины каждый раз определяются в тексте. Если бы автор попробовал использовать по всей книге единые обозначения, то неизбежно пришлось бы применить обозначения, не являющиеся общепотребительными.

Магнитуда землетрясения бывает различной в разных сообщениях, поскольку для ее оценки могут использоваться данные, полученные на различных обсерваториях. Поэтому во избежание путаницы мы используем значения магнитуд сильных землетрясений, приведенные в «Риканенпио» (Научный календарь, Токийская астрономическая обсерватория) под редакцией Усами (1975 г.). Так, несмотря на то что во многих источниках магнитуда Чилийского землетрясения 1960 г. оценивается в 8,5 или более, в этой книге указывается значение 8,3, так как именно оно приведено в «Риканенпио». Некоторых читателей, возможно, удивит, что приводится магнитуда землетрясений, происходивших в далеком прошлом, когда еще не велось

сейсмометрических наблюдений. В таких случаях магнитуда была определена по историческим документам, но точность этих оценок невысока.

В книге использован ряд сокращений для обозначения следующих организаций:

AEC	Atomic Energy Commission — Комиссия по атомной энергии (США)
AGU	American Geophysical Union — Американский геофизический союз
CSEP	Coordinating Committee for Earthquake Prediction — Координационный комитет по прогнозу землетрясений (Япония)
CERESIS	Centro Regional de Sismologia — Региональный центр сейсмологических исследований (Южная Америка)
CIRES	Cooperative Institute for Research in Environmental Sciences — Объединенный институт по исследованиям окружающей среды (США)
EHRP	Earthquake Hazards Reduction Program — Программа по уменьшению сейсмической опасности (США)
ERI	Earthquake Research Institute — Сейсмологический институт (Япония)
ESC	European Seismological Commission — Европейская сейсмологическая комиссия
ESSA	Environmental Science Services Administration — Управление по исследованиям окружающей среды (США)
GSI	Geographical Survey Institute — Институт географических исследований (Япония)
HUD	Housing and Urban Development — Жилищное строительство и развитие городов (США)
IAG	International Association of Geodesy — Международная ассоциация по геодезии
IAGA	International Association of Geomagnetism and Aeronomy — Международная ассоциация по геомагнетизму и аэронауке
IASPEI	International Association of Seismology and Physics of the Earth's Interior — Международная ассоциация по сейсмологии и физике земных недр
IAVCEI	International Association of Volcanology and Chemistry of the Earth's Interior — Международная ассоциация по вулканологии и химии земных недр
ICEP	International Commission on Earthquake Prediction — Международная комиссия по предсказанию землетрясений

ICG	Inter-Union Commission on Geodynamics — Международная комиссия по геодинамике
ICSU	International Council of Scientific Unions — Международный совет научных союзов
IUGG	International Union of Geodesy and Geophysics — Международный геодезический и геофизический союз (МГГС)
IUGS	International Union of Geological Sciences — Международный союз геологических наук
JMA	Japan Meteorological Agency — Японское метеорологическое агентство
JSPS	Japan Society for Promotion of Science — Японское общество содействия науке
NCER	National Center for Earthquake Research — Национальный центр сейсмологических исследований (США)
NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration — Национальное управление по океаническим и атмосферным исследованиям (США)
NSF	National Science Foundation — Национальный научный фонд (США)
UMC	Upper Mantle Committee — Международный комитет по верхней мантии
UMP	Upper Mantle Project — Международный проект верхней мантии
USGS	United States Geological Survey — Геологическая служба США

## ПРЕДВИДЕНИЕ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ — РАЗЛИЧНЫЕ ЛЕГЕНДЫ

Нередко можно слышать сообщения о том, что перед землетрясением рыбы и животные ведут себя необычным образом, что иногда наблюдается какая-то таинственная радуга, магнит перестает притягивать и т. п. Эти легенды возникли, вероятно, несколько сотен лет назад, но мы и сейчас еще можем иногда прочесть в современных популярных и развлекательных журналах о подобных ненаучных предсказаниях сильных землетрясений. Человечество настолько жаждет уметь предсказывать разрушительные землетрясения, что некоторые склонны доверять подобным сообщениям.

Автор намеревается описывать в этой книге современное состояние проблемы предсказания землетрясений исходя из научных данных; но тем не менее есть смысл обратиться к некоторым классическим легендам, многие из которых взяты из японской литературы. Поскольку японскую литературу нельзя назвать легко доступной для неапонцев (и это особенно относится к классическим произведениям, которые трудно читать даже современным японским читателям), дальнейшее описание может представить некоторый интерес для читателей вне Японии. Мы, конечно, не верим во все эти легенды, но для ученых важно взглянуть без предубеждения и на то, что может содержать хотя бы долю истины.

### 2.1. НЕОБЫЧНОЕ ПОВЕДЕНИЕ РЫБ И ЖИВОТНЫХ

#### 2.1.1. Зубатка и другие рыбы

В средние века японцы верили, что землетрясение вызывается резким движением большой зубатки, живущей внутри Земли. Можно найти документы XVII в., в которых возникновение землетрясений связывается с движениями зубатки. Во многих «Нисикия» (издания с цветными ксилографическими рисунками), вышедших вскоре после сильнейшего землетрясения 1855 г. в Эдо (ныне Токио), можно встретить различные описания поведения зубатки, которое, как полагают, привело

к возникновению этого землетрясения. Однако вовсе не ясно, почему именно зубатка связана с землетрясением. Вероятно, эта рыба, обычно погруженная в ил на дне рек и озер, своим нелепым видом наводит страх на людей, и поэтому суеверные японцы могли мысленно склониться к тому, что такое ужасающее и опасное явление, как землетрясение, может вызываться гигантской зубаткой.

Говорили также, что перед землетрясением зубатка начинает проявлять активность и вокруг ее усиков образуются пузырьки; правда, точные источники таких сообщений неизвестны. В книге [266] имеется описание необычного поведения зубаток перед землетрясением 1855 г. в Эдо. В центре Эдо жил человек, который так любил ловить рыбу, что ходил на реку каждый вечер. Вечером 11 ноября 1855 г. он хотел, как обычно, наловить угрей, но, к его удивлению, множество зубаток были в таком волнении, что большинство угрей, по-видимому, ушли из этого места. Поскольку он слышал, что зубатка активизируется перед землетрясением, он поспешил вернуться домой и вынес все свои пожитки во двор. Жена смеялась над ним, так как не верила тому, что он говорил. Однако через некоторое время, как он и ожидал, произошел сильный толчок. В результате, хотя дом его был поврежден, имущество уцелело. Один из соседей этого человека, также отправившийся ловить рыбу, тоже наблюдал волнение зубаток. Но он не обратил на это внимания и продолжал ловлю рыбы. Ощувив внезапный толчок, он побежал домой и нашел там разрушенными свой дом и склад.

Согласно [267], один высший чиновник Министерства образования 31 августа 1923 г., т. е. за день до сильнейшего землетрясения в Канто (см. § 3.3), видел, как многие рыбы подпрыгивали в пруду у ресторана в центре Токио. Официантка сказала ему, что зубатки недавно стали необычно активными. Позднее он рассказал об этом одному известному художнику, который держал у себя в ванне нескольких крупных зубаток, чтобы рисовать их. Художник вспомнил, что перед землетрясением рыбы подпрыгивали.

Другой служащий того же министерства в канун этого землетрясения наслаждался рыбной ловлей, забрасывая сеть вблизи берега в пруду к югу от Токио. К своему удивлению, он наловил три полных ведра зубаток, причем длина каждой рыбины была около 30 см.

Активность зубаток перед землетрясением, как описано выше, вполне могла быть простым совпадением. Чтобы установить твердую корреляцию между активностью зубаток и возникновением землетрясения, следовало доказать, что в отсутствие землетрясения зубатки не проявляют активности. Реакцию

зубаток на землетрясение первыми исследовали Хатаи и его сотрудники [153, 154]. Они поместили несколько зубаток в бак с водой, куда положили ил и водоросли. Обычно зубатки были настолько инертными, что скрывались под илом или корнями растений. Ни перед землетрясениями, ни после них они не плавали и не показывались над поверхностью воды.

Однако было замечено, что иногда зубатки становятся чувствительными к толчкам, производимым несколькими легкими постукиваниями о стол, на котором стоял бак. После ряда экспериментов был сделан вывод, что за несколько часов до землетрясения зубатки проявляют беспокойство при постукивании пальцами. Хатаи с сотрудниками разделили рыб по их реакции на следующие классы:

1) *весьма чувствительные* — подпрыгивают один раз и после этого остаются в покое;

2) *довольно чувствительные* — медленно перемещаются, но вскоре затихают;

3) *мало чувствительные* — никакой реакции на звук; более сильное постукивание может вызвать слабое движение;

4) *нечувствительные* — совершенно никакой реакции даже при очень сильном стуке.

Когда реакция зубаток на постукивание пальцами соответствовала случаям 1 и 2, группа Хатаи заметила, что с вероятностью до 80% и не позднее чем через несколько часов происходит землетрясение. И наоборот, землетрясения не отмечалось, когда рыбы вели себя так, как описывается в случаях 3 и 4. Если температура воды была очень низкой, то о землетрясении сообщалось даже в случае 3.

В период с 15 октября 1931 г. по 15 мая 1932 г. Хатаи с сотрудниками каждый день вывешивали объявления с прогнозами на доске объявлений биологической станции Асамуси в префектуре Аомори в северо-восточной части Японии. Возникновение землетрясения проверялось по сейсмографу, имеющему увеличение 50.

Исследователи группы Хатаи полагали, что перед землетрясением может возникать своего рода электрический потенциал, поскольку зубатка чрезвычайно чувствительна к электрическим токам порядка микроампер. Они обнаружили, что описанная выше реакция зубатки не отмечается, если бак с рыбой изолирован от земли. Было также найдено, что V-образное изменение на записи земных токов коррелирует с активностью зубаток и возникновением землетрясений. Кроме того, предполагалось, что зубатка что-то ощущает перед главным изменением поля земных токов, так как она становится активной до прихода сигналов. Зубатка сильно реагирует на землетрясение, даже если оно слабое, в том случае, когда толчок происходит

вблизи пункта наблюдения. При возрастании расстояния между станцией и эпицентром реакция зубатки становилась слабой даже при достаточно сильном землетрясении.

Проведенное исследование заставляет предположить, что зубатка чувствительна к некоторому сигналу, вероятно электрического происхождения, который, по-видимому, возникает перед землетрясением, хотя на основе одного только поведения зубаток трудно сделать истинное предсказание землетрясения. Логичнее вести высокочувствительные наблюдения земных токов, чем надеяться на зубаток.

Имеется множество сообщений о необычном поведении и других рыб. Даже в наше время многие верят, что некоторые рыбы могут чувствовать приближение землетрясений. В Японии летом 1973 г.; т. е. в год 50-й годовщины землетрясения 1923 г. в Канто, появилось сообщение о том, что много сайры, которая обычно встречается в открытом океане, подошло к Иокогаме, где люди могли ловить ее с набережной. Газеты и еженедельники писали, что это может быть предвестником сильного землетрясения, хотя в тот год в районе Токио — Иокогамы ничего такого не произошло.

Читатель увидит в последующих разделах книги, что некоторые из сообщений нельзя сбрасывать со счета, поскольку они основаны на надежных наблюдениях ученых. Поэтому до некоторой степени полезно рассмотреть легенды о связи землетрясений и поведения рыб. Большая часть приводимого ниже описания взята из работы Мусы [267], хотя автор настоящей книги также знаком с рядом оригинальных сообщений. Муса, специально, интересовавшийся движениями рыб в связи с землетрясениями, разделил замеченные людьми необычные факты на четыре класса:

- 1) перед землетрясением видна рыба, которая обычно в этой местности не встречается,
- 2) рыба подходит к поверхности воды или выскакивает из нее,
- 3) стаи рыб приближаются к берегу,
- 4) некоторые рыбы исчезают.

### *Случай 1*

Как свидетельствует один местный исторический документ в префектуре Айти, непосредственно перед землетрясением 1891 г. в Ноби, магнитуда которого по шкале Рихтера равнялась 7,9, на рисовых полях вблизи эпицентра появилось множество гольцов.

Перед землетрясением 1896 г. ( $M=7,1$ ), которое сопровождалось огромными цунами, погубившими 27 122 местных жителя вдоль тихоокеанского побережья северо-восточной Японии,

на побережье было обнаружено очень много угрей. Рассказывали, что кто-то наловил тогда более 200 угрей за один раз.

В 1857 г. в море вблизи тихоокеанского побережья северо-восточной Японии произошло сильное землетрясение ( $M=7,7$ ) и огромные цунами обрушились на берега Хоккайдо в северо-восточной части Японии. В [266, стр. 676] сообщается, что перед землетрясением на морском берегу было выловлено много угрей.

На западном побережье п-ова Идзу, примерно в 100 км к юго-западу от Токио, после землетрясения 1854 г. ( $M=8,4$ ), происшедшего в море у тихоокеанского побережья Центральной Японии, и сопровождавшего его цунами вдоль морского берега было найдено много дохлой рыбы. Большая часть рыбы была незнакома местным жителям. Видимо, эта рыба обычно жила в морских глубинах [266, стр. 231].

Перед землетрясением 1923 г. в Канто ( $M=7,9$ ), которое, как полагают, было вызвано подвижкой под заливом Сагами, бельгийский посол в Японии, находившийся на летнем курорте, глядя через залив, увидел на много километров к юго-западу от Токио красноватую глубоководную рыбу, плавающую на поверхности воды. Какая-то глубоководная рыба, вероятно, один из видов трески, была также обнаружена перед этим землетрясением вблизи поверхности воды рыбаками на западном побережье залива у п-ова Идзу.

Множество омаров и каракатиц, которые обычно живут на дне моря, перед землетрясением 1927 г. в Танго ( $M=7,5$ ) попали в рыболовные сети у поверхности воды в Японском море вблизи побережья префектуры Киото.

В случае землетрясения 1933 г. в Санрику ( $M=8,3$ ), которое сопровождалось цунами, обрушившимся на ту же территорию, что и в 1896 г., имелся ряд сообщений о необычных перемещениях рыб. Сообщалось, что в разных местах вдоль тихоокеанского побережья северо-восточной Японии встречалось так много угрей, что даже дети могли ловить их руками. Перед приходом цунами морские ушки перемещались на дно более мелких морей. Согласно сообщениям за несколько дней до землетрясения, в одном заливе в префектуре Мияги сардины (*Sardina melanosticta*) были обнаружены вблизи побережья в морской воде, глубина которой из-за отлива составляла лишь 20 см. Видеть сардины в этих местах удавалось крайне редко. В Хатинохе, городе на тихоокеанском побережье в префектуре Аомори, перед одним землетрясением местным жителям удалось поймать на берегу скумбрию. Они говорили, что никогда прежде скумбрия на взморье не ловилась. За 15—16 дней до этого землетрясения рыбаковы у побережья пре-

фектуры Ивате, к своему удивлению, поймали краба такого вида, какого они никогда прежде здесь не встречали.

Имеется много, может быть даже слишком много, сообщений о необычных перемещениях рыб, подобных описанным выше. Однако следует иметь в виду, что большинство сведений такого рода поступает после того, как произошло землетрясение. Люди стараются вспомнить события, на которые они в свое время не обратили особого внимания. Поэтому их описания обычно бывают неточными и иногда неверными. Вдобавок ко всему, весьма вероятно, что многое из того, что люди считают необычным, является простым совпадением по времени с происходящими землетрясениями. Чтобы установить твердую корреляцию между событиями, необходимо доказать, что явление, названное аномальным, не имеет места в отсутствие землетрясений. В этом смысле мы должны с осторожностью подходить к сообщениям о необычном поведении рыб, животных и т. п.

Известный ихтиолог Суехиро [432] сообщил о следующих интересных фактах, которые могут иметь некоторое отношение к землетрясению 1933 г. в Санрику. В отличие от того, что было описано выше, все дальнейшее изложение представляет собой наблюдение специалиста. Землетрясение произошло 3 марта приблизительно в 2 ч 30 мин по местному времени. Примерно в 7 ч утра на побережье в г. Одавара (префектура Канагава), т. е. на расстоянии нескольких сотен километров от эпицентра, была поймана редкая глубоководная рыба под названием *Nemichthys avocetta*. По сообщению Суехиро, пойманная особь была взрослой рыбой длиной 78,8 см и весом 7,5 кг. Данный вид представляет собой угреподобную рыбу с удлинненным телом и обычно обитает на морском дне при глубине более 500 м. Поэтому, если мы предположим, что рыба приплыла к берегу с такой глубины, мы должны прийти к выводу, что она покинула места своего кормления до землетрясения. Суехиро считал весьма вероятным, что произошло какое-то изменение в глубоководном дне, в результате чего рыба мигрировала. Интересно также отметить, что в том же самом месте в этот же день и в последующие были пойманы и другие глубоководные рыбы.

Суехиро [432] обратил также внимание на тот факт, что взрослые особи сардин *Sardina melanosticta*, пойманные кошельковым неводом в верхнем слое воды вблизи Мисаки (префектура Канагава) вечером накануне землетрясения в Санрику, съели много растущих на дне диатомовых водорослей. Известно, что сардины этого типа обычно питаются планктоном в верхнем слое морской воды. Было замечено, что пойманные сардины поглотили в пять раз больше пищи, чем их средний рацион.

Поэтому был сделан вывод, что перед землетрясением растущие на дне диатомовые водоросли должны были в большом количестве появиться в верхнем слое воды у берегов Мисаки. Суехиро исследовал состав пищи в желудках сардин, пойманных в том же районе 6 марта, т. е. через три дня после землетрясения, но уже не обнаружил ничего необычного.

Таго, профессор Императорской экспериментальной рыболовной станции, собиравший планктон у входа в Токийский залив в то самое утро 1 сентября 1923 г., когда произошло землетрясение в Канто, заметил необычное обилие планктона в поверхностном слое воды и недостаточность его в среднем слое. В это же время в окрестности одного острова вблизи входа в Токийский залив была замечена необычная для этих мест стая пелагид [267, 432, 445].

Перед землетрясением 1939 г. ( $M=7,0$ ) на п-ове Ога (префектура Акита), выдающемся в Японское море, на берегу ловились тунцы весом около 15 кг, которые прежде никогда не подходили к побережью. Сообщалось также, что в ряде мест вблизи эпицентра к берегу подошло множество осьминогов, казавшихся как бы опьяненными. В этих местах осьминоги обычно не попадались.

### Случай 2

Выше было сказано, что перед землетрясениями 1855 г. в Эдо и 1923 г. в Канто зубатки стали такими активными, что перемещались со своих мест и выпрыгивали из воды. Когда в 1898 г. произошло землетрясение ( $M=6,5$ ) вблизи г. Фукуока в северной части о. Кюсю, рыболовы видели, как многие рыбы выпрыгивали из воды у северного побережья Кюсю. А когда они захотели узнать, что это за рыба, они увидели рябь, идущую с юго-востока. Затем вся рыба вдруг исчезла. Люди прекратили рыбную ловлю и отправились домой. Тогда-то и произошло сильное землетрясение.

Накануне землетрясения 1923 г. в Канто один человек, работавший в кинокомпании в южной части Токио, возвращаясь домой, видел, как в небольшом пруду многие рыбы выпрыгивали из воды. Поскольку он и его друзья любили ловить рыбу, они стали искать рыболовную сеть на киностудии. В итоге они наловили столько рыбы, что она наполовину заполнила большой бочонок емкостью около 70 л. Этот человек принес эту рыбу домой и очень много выпил, наслаждаясь теми блюдами, которые приготовила его жена из рыбы. Он спал так крепко в эту ночь, что был разбужен лишь на следующий день в полдень землетрясением.

В то утро, когда произошло землетрясение в Канто, в 7 или 8 ч в пруду в центре Токио много карпов и карасей поднялось

к поверхности воды. Казалось, что эти рыбы страдали от недостатка кислорода. Рассказывали, что им становилось лучше, когда их помещали в пресную воду.

Местные рыболовы наблюдали скумбрию, выскакивавшую над поверхностью воды в море вблизи эпицентра утром того дня, когда произошло землетрясение в Танго 1927 г. В это время года скумбрия редко выпрыгивает из воды.

Много карпов, водившихся в пруду в Ситинохе (префектура Аомори), за сутки до землетрясения 1933 г. в Санрику стали проявлять большую активность, хотя они и не выпрыгивали из воды. Сообщалось также, что перед землетрясением караси выпрыгивали из речки прямо на берег в Кудзи, городе рыбаков в префектуре Ивате.

В Китае в северной части провинции Юньнань 31 июля 1917 г. произошло землетрясение ( $M=6,5$ ). Сообщали, что за несколько дней до него уровень воды в реке повысился и бесчисленное множество рыбы выпрыгивало из воды на берег [267, стр. 30].

### *Случай 3*

В предыдущих разделах говорилось, что перед землетрясениями и цунами 1857, 1896 и 1933 г. на берегу появилось много угрей. Согласно сообщениям, перед этими же цунами вблизи тихоокеанского побережья северо-восточной Японии наблюдалось много сардин.

Перед землетрясением 1923 г. в Канто у берегов п-ова Босо южнее Токио рыбаки поймали много сардин одного вида, чего не наблюдалось после землетрясения. В одном из предшествующих разделов описывалось, что перед землетрясениями и цунами 1896 и 1933 гг. в Санрику, к радости рыбаков на тихоокеанском побережье, сардины подошли очень близко к берегу. В результате у рыбаков был большой улов сардин. После отступления цунами, как правило, ловилось много каракатиц. В этих местах существовала поговорка: «Сардины приносят несчастье, а каракатицы спасают людей».

Рассказывали, что перед толчком в окрестности эпицентра землетрясения в Канто 1923 г. вдоль морского побережья префектуры Канагава встречалось много сардин. Некоторые из них даже поднимались вверх по рекам. В этом же случае у входа в Токийский залив был замечен необычный косяк пелагид. Сообщалось также о необычных миграциях рыбы в озере Яманака к северу от горы Фудзияма. Начиная с мая того года, когда произошло землетрясение, вода в озере стала мутной, и непосредственно перед землетрясением было выловлено много карасей.

Невозможно описать все сообщения такого рода, но представляется важным упомянуть такие же случаи при недавних

землетрясениях. У берегов п-ова Кии, на тихоокеанской стороне Центральной Японии, перед Тонанкайским землетрясением 1944 г. ( $M=8,0$ ), эпицентр которого находился в море у берегов этого полуострова, местные рыболовы поймали много пеламид. То же самое произошло в 1946 г., и поэтому даже удалось предсказать Нанкайское землетрясение 1946 г. ( $M=8,1$ ), эпицентр которого располагался в сотнях километров к западу от эпицентра предыдущего землетрясения. Перед Нанкайским землетрясением на южном берегу п-ова Кии было выловлено много полурылов и каракатиц, а на его восточном берегу — омаров.

За несколько часов до Фукуйского землетрясения 1948 г. ( $M=7,3$ ) один рыболов поймал на реке Кудзуриу вблизи эпицентра 80 айю, хотя обычный улов рыбы, согласно сообщениям, составлял не более 30.

У автора нет достаточной информации о подобных случаях в других странах. Муса [267] пишет, что много рыбы подошло к берегу, когда в 1058 г. произошло сильнейшее землетрясение в Неаполе. Рассказывают, что много рыбы собралось у берегов Сицилии перед землетрясением 1783 г. в Калабрии [246, стр. 301].

#### *Случай 4*

Во многих сообщениях утверждается, что перед сильным землетрясением рыба исчезает. Например, в северо-восточной Японии заметили, что перед землетрясением 1896 г. в Санрику не было поймано ни трески, ни акул. То же самое можно сказать о трепанге, ельце и других рыбах перед землетрясением 1933 г. в Санрику. Рассказывали, что за несколько дней до землетрясения 1923 г. в Канто уловы рыбы в заливе Сагами стали плохими.

#### *Причины необычного поведения рыб*

Известный физик и геофизик Терада [445] провел интересное исследование зависимости между землетрясениями и уловами рыбы. Он заинтересовался сообщениями о том, что виды рыб, в наибольшем количестве выловленных на восточном побережье п-ова Идзу перед знаменитыми роями землетрясений 1930 г., сильно отличались от видов рыб, выловленных после землетрясений. То же самое относится к землетрясению 1923 г. в Канто. Терада произвел статистический анализ соотношения между суточным уловом рыбы на западном побережье п-ова Идзу по записям Императорского института рыболовства и числом землетрясений в сутки на этой территории. Рассматривая рис. 2.1, взятый из его работы, легко заметить, что периоды с обильными уловами ставриды Саганх в точности совпадали

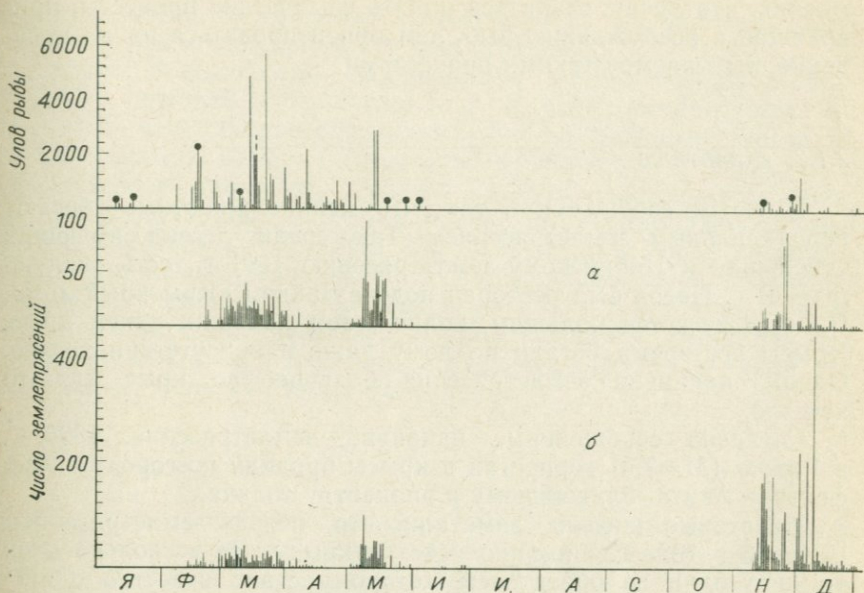


Рис. 2.1. а — число ощутимых землетрясений в районе Северного Идзу. б — общее число ощутимых и неощутимых землетрясений, происшедших на п-ове Идзу и в зал. Суруга к востоку от полуострова, плюс число сильных и умеренно сильных землетрясений в префектурах Канагава, Сидзуока, Яма-наси и Токио. На верхней диаграмме показана корреляция с уловами рыбы. Зачерненные кружки указывают на то, что улов, хотя и богатый, точно не известен [445].

с периодами весьма высокой сейсмической активности. Терада провел статистические исследования за шестилетний период 1924—1929 гг. и после статистических проверок пришел к выводу, что возникновение землетрясений и уловы рыбы обладают положительной корреляцией.

Терада выдвигает три возможные причины статистической зависимости между землетрясениями и уловами рыбы:

1) сейсмические толчки или связанные с ними механические воздействия могут непосредственно ощущаться рыбой и заставлять ее мигрировать необычным путем;

2) возможно, толчки как-то влияют на глубину слоев с наибольшей плотностью планктона, поедаемого рыбой;

3) землетрясения могут воздействовать на подземные воды, оказывая тем самым влияние на химический состав прибрежной морской воды, и в результате косвенно влиять на планктон и рыбу.

Наряду с этим возможны электрические воздействия, способные возбуждать зубатку. Автор книги придерживается того

мнения, что лучше стараться понять физические процессы, приводящие к возбуждению рыб, чем ориентироваться на их поведение, вызываемое такими процессами.

### 2.1.2. Животные

Имеются сообщения о том, что мелкие животные убегают перед сильным землетрясением. Так, среди легенд, имеющих отношение к Нобийскому землетрясению 1891 г., есть следующая. В г. Нагоя был ресторан под названием «Крысиный дом». Он был известен большим количеством живших в нем крыс. Крысы все время бегали по дому даже в присутствии хозяев. Однако накануне землетрясения большинство крыс куда-то исчезло.

Согласно сообщениям, накануне землетрясения 1896 г. в Рикую ( $M=7,5$ ) горностаи и крысы бродили по городу в префектуре Акита, ближайшему к эпицентру толчка.

Некоторые жители заметили, что перед землетрясением в Канто в 1923 г. внезапно исчезли крысы. За несколько дней до него один из обитателей, которому стало известно о внезапном исчезновении крыс из гостиницы в центре Токио, предсказал, что произойдет землетрясение, ибо то же самое было замечено перед землетрясением 1855 г. в Эдо.

Многочисленные сообщения такого рода поступили из ряда городов и деревень северо-восточной Японии в связи с землетрясением и цунами 1933 г. в Санрику. Вероятно, из всех животных крысы и мыши лучше всего знакомы японцам, поскольку крысы и мыши без труда вторгаются в их традиционные деревянные дома и находят там удобные места для жилья; поэтому часто приходится слышать о миграции крыс и мышей в связи с возникновением землетрясений. Однако следует помнить, что большинство людей обращают внимание на поведение крыс и мышей только в связи с землетрясениями. Автор полагает, что крысы и мыши суетятся даже тогда, когда землетрясения и не происходят.

Необычное поведение крыс отмечалось и перед Синтайским землетрясением 1966 г. ( $M=6,8$ ), которое произошло в провинции Хэбэй в 300 км от Пекина [63].

Говорят также, что иногда кошки испытывают волнение перед землетрясением. Непосредственно перед Нобийским землетрясением 1891 г. в его эпицентральной области одна кошка в беспокойстве бродила по дому. Хозяин отпер дверь и выпустил ее на улицу. Когда через некоторое время произошел толчок, хозяин и его семья благополучно выскочили через уже открытую дверь. Кошка где-то бродила и вернулась через не-

сколько дней. Когда кошки как-то странно мяучат, некоторые думают, что может произойти землетрясение.

Имеется множество сообщений о необычном лае собак, ржании лошадей, крике ослов и т. д. перед землетрясениями. Говорят, что обезьяны подняли шум за несколько часов до землетрясения 1972 г. ( $M = 6,25$ ) в Манагуа в Никарагуа. Беспокойные движения лошадей, свиней, енотовидных собак и других животных иногда коррелируют с приближающимися землетрясениями. Милл [246, стр. 303] писал: «Перед катастрофическим землетрясением 1812 г. в Каракасе один испанский жеребец вырвался из конюшни и убежал в горы, что рассматривалось как предчувствие приближающегося бедствия». Он писал также, что перед землетрясением 1835 г. в Чили все собаки убежали из города Талькауано.

### 2.1.3. Лягушки и змеи

В Японии говорят, что если змеи, многоножки, лягушки и т. п. выползают из своих нор, то можно ожидать землетрясения. Во время землетрясения 1855 г. в Эдо 11 ноября много ужей выползло на поверхность земли вблизи эпицентральной области, хотя они едва могли двигаться, так как было слишком холодно. Летом 1973 г. сине-зеленая змея была поймана на Гинзе, самой фешенебельной улице Токио. Поскольку это был год 50-летия землетрясения 1923 г. в Канто, токийцы заволновались, не произойдет ли землетрясение, но в тот год его не было.

### 2.1.4. Птицы

Приблизительно за десять дней до землетрясения 1855 г. в Эдо куры и петухи вблизи эпицентральной области стали беспокойными и не заходили в курятники. Примерно за час до землетрясения 1896 г. в Рикую в эпицентральной области кукарекали петухи и кудахтали куры. Многие гуси гоготали во время землетрясения 1783 г. в Калабрии. Перед Чилийскими землетрясениями 1822 и 1835 гг. огромные стаи морских птиц тянулись в глубь материка [246, стр. 303].

Много голубей, обычно гнездившихся на колокольне буддийского храма вблизи эпицентра Нобийского землетрясения 1891 г., вечером накануне землетрясения куда-то улетело. Рассказывают также, что ласточки, макао и т. п. чувствуют приближение землетрясений. В Японии считают, что фазаны, поднимая шум, предупреждают о землетрясении. Однако сейсмологи полагают, что эти птицы чувствительны к очень слабым

сотрясениям на начальной стадии развития сейсмического возмущения и потому проявляют беспокойство после прихода продольных волн.

### 2.1.5. Насекомые и черви

В Японии говорят, что если вы видите рой стрекоз, то вполне можно ожидать землетрясения. Некоторые токийцы испытали страх летом 1973 г., так как видели множество стрекоз в этом районе, но землетрясения в этот год не произошло.

Рассказывают, что земляные черви, многоножки и т. п. перед землетрясением выползают из своих нор.

## 2.2. НЕОБЫЧНАЯ ПОГОДА

### 2.2.1. Дымка и туман

Много написано о необычной погоде перед землетрясением. Часто говорят, что перед землетрясением становится душно и если посмотреть на небо, то иногда можно увидеть странную дымку и туман.

По поводу землетрясения 1802 г. ( $M=6,6$ ), которое произошло на о. Садо (префектура Ниигата) в Японском море, рассказывают следующее. Один бизнесмен поднялся на холм посмотреть, подходящая ли погода для плавания на яхте. Лодочник, сопровождавший его в тот день, указал ему на то, что погода была очень странной, непохожей ни на что, с чем ему когда-либо приходилось сталкиваться. Наблюдалась какая-то непонятная дымка: подножия гор были окутаны дымкой, а их верхние части можно было видеть вполне отчетливо. Лодочник, который обычно мог, взглянув на небо, предсказать погоду, в данном случае не смог ничего сказать. Бизнесмен вспомнил, что много лет назад ему рассказывал его отец: «Перед землетрясением от поверхности земли поднимается странный ветерок, называемый «Чики» (буквально «воздух от земли»)». Они поспешили вернуться в гостиницу, где они остановились, и собрав свои вещи, покинули ее. После того как они прошли около 15 км. они почувствовали сильное сотрясение земли.

Посетив впоследствии золотые прииски на этом острове, бизнесмен с удивлением узнал, что никто из шахтеров не пострадал при землетрясении. В ответ на его вопрос шахтеры рассказали, что знали о том, что произойдет землетрясение, за три дня. Они заметили появление «Чики», точно так же как это бывало в течение многих лет, и поэтому в день землетрясения ни один из них не спустился в шахту. Говорили также, что,

когда «Чики» появляется в шахте, они почти не видят своих товарищей, работающих по соседству.

Этот рассказ о «Чики» записан в «Dai Nihon Jishin Shiryo»\*) [178, ч. 1, стр. 509]. Эта книга впервые вышла в свет в 1904 г. и переиздана в 1973 г. Позднее она была пересмотрена, в частности Мусой, добавившим много вновь найденных документов. Она была издана во время второй мировой войны в трех отпечатанных на mimeографе томах под названием «Zotei Dai Nihon Jishin Shiryo». Сейчас ее достать трудно. После этого был издан только один том под названием «Nihon Jishin Shiryo» [266].

В «Dai Nihon Jishin Shiryo» имеется также описание «Чики» в связи с землетрясением 1830 г. в Киото ( $M=6,4$ ).

Существует рассказ старого сторожа, предсказавшего землетрясение 1855 г. в Эдо [266, стр. 625]. Много лет назад он поступил на работу к самураю (военному) высокого звания. 11 ноября, лишь только начало смеркаться, он вышел за ворота, посмотрел вокруг и сказал другим работникам, стоявшим около него, что в этот вечер произойдет сильное землетрясение. Затем он сварил немного риса на случай крайней необходимости. Большинство слуг в доме самурая не поверили старику.

Старик сторож сидел с несколькими своими товарищами на соломенном матрасе, расстеленном во дворе. Примерно в 10 ч вечера все вокруг окутали дымка или туман и облака покрыли половину неба. Тем не менее, как это ни странно, звезды казались очень близкими. Вдруг земля начала со страшной силой содрогаться. Когда сила сотрясения несколько ослабла, они увидели, что дома разрушились. Готовые ко всему сторож и его друзья быстро погасили пожар, начавший было разгораться.

Восхищенный действиями сторожа, самурай, его хозяин, превозносил его до небес и спросил, как ему удалось предвидеть землетрясение. Сторож ответил, что он пережил землетрясения 1828 г. в Етиго ( $M=6,9$ ) и 1847 г. в Синсю ( $M=7,4$ ), в районах, которые теперь называются соответственно префектурами Ниигата и Нагано. Он тогда еще обратил внимание на то, что перед землетрясениями звезды так ярко сияли на затянутом дымкой небосводе, что, казалось, находились совсем близко. Поскольку он наблюдал подобное же явление на этот раз в течение одного-двух дней, он просто сказал людям, что приближается землетрясение.

Большинство сейсмологов, в том числе и автор этой книги, считают, что землетрясение нельзя предсказать, наблюдая за погодой. Рассказанные выше легенды могут быть просто

\*) «Материалы по землетрясениям Японии».

вымыслом. Необычная погода перед землетрясением вполне может быть простым совпадением. Туманных дней бывает много, но люди помнят их только в случае страшных землетрясений.

### *2.2.2. Радуга и таинственный свет*

В Японии говорят, что предвестником землетрясения является короткая радуга, что перед землетрясением радуга появляется очень низко на небе и что если она состоит из трех цветов, например черного, желтого и индиго, то это является предупреждением о приближающемся землетрясении. Мукухира, предсказатель-любитель, живущий в северной части префектуры Киото, утверждал, что он может предвидеть наступление землетрясения, наблюдая за некоторого рода радугой, которая появляется время от времени в определенном направлении от деревни, где он живет. Говорят, что при помощи его метода радуги можно предсказывать землетрясения, происходящие не только в Японии, но и в других частях земного шара. Мукухира часто посылал почтовые открытки с предсказанием землетрясений в Японское метеорологическое агентство, сейсмологический институт какого-либо университета и т. д. Однако трудно поверить, что землетрясение можно предвидеть, наблюдая за радугой, поскольку никакой физической зависимости между этими явлениями не установлено. Автор подозревает, что предсказание Мукухиры иногда оказывалось верным, потому что два события вполне могут совпасть: частая посылка открыток и частое возникновение землетрясений. Также невозможно поверить в то, что землетрясение, которое происходит где-то далеко на земном шаре, в тысячах километров от того места, где живет предсказатель, можно предсказать, наблюдая радугу в Японии.

Во многих исторических и современных документах можно встретить неоднократные сообщения о таинственном свете, ассоциируемом с землетрясением [73, 444]. В период землетрясений 1965—1967 гг. в Маусиро о возникновении такого свечения сообщали столь часто, что любители-фотографы даже сумели сделать множество цветных снимков. Автор настоящей книги и его коллеги произвели электрические и магнитные измерения на вершине горы Минаками, расположенной в центре района, охваченного землетрясениями. Однако автор утверждает, что в те моменты, когда сообщалось о таинственном свете, автор и его коллеги не наблюдали никакого аномального свечения и на теллу로그램мах не было обнаружено никакой аномальной записи.

Световые явления, сопровождающие землетрясения, очевидно, лучше всего проявились в связи с землетрясением 1930 г.

в Северном Идзу ( $M=7,0$ ). В этом случае множество сообщений о световых явлениях поступило от людей, живших более чем в 100 км от эпицентральной области. Даже несколько ученых сообщили о наблюдавшемся ими свете. Поэтому в данном случае трудно отрицать возникновение аномального свечения, хотя нельзя предложить никакого физического объяснения. Терада [444] дал весьма подробный обзор световых явлений, сопровождающих землетрясения. Тот, кто особенно интересуется этими явлениями, может обратиться к его статье.

Иногда сообщали, что перед землетрясением наблюдалось какое-то необычное свечение. В случае землетрясения 1703 г. в Гэнроку ( $M=8,2$ ), которое принесло колоссальные разрушения в области южнее Эдо (ныне Токио), в течение нескольких ночей перед самым сильным толчком и после него часто наблюдалось свечение воздуха и находящихся в нем предметов [178 (1973), ч. 1, стр. 285]. При землетрясении 1830 г. в Киото в ночь, предшествовавшую землетрясению, световые явления наблюдались по всему небу, а некоторые виды свечения были настолько яркими, что напоминали дневной свет [178 (1973), ч. 1, стр. 583], идущий от земли.

Сведения, приведенные в последнем абзаце, а также описываемые ниже, взяты из работы Терады [444]. Кроме того, автор проверял описания по «Dai Nihon Jishin Shiryo». Правда, ему не удалось найти оригинал, но Терада цитирует документ с описанием землетрясения 1847 г. в Синсю, в котором говорится: «На фоне темного неба в направлении горы Идзу появилось огненное облако. Было видно, как оно вращалось и затем исчезло. Тотчас же после этого раздался грохот, а за ним произошло сильное землетрясение» [267, стр. 56].

Группа из 19 человек вышла в море в канун землетрясения 1855 г. в Эдо. Незадолго до толчка люди внезапно увидели свечение неба на северо-востоке, которое было настолько ярким, что можно было отчетливо рассмотреть цветные узоры на одежде. Вскоре после этого из-под воды раздался какой-то страшный рев, который заставил их подумать, что масса гравия ударила о дно лодки. В тот же момент яркое пламя, сопровождаемое разными звуками, охватило все небо [267, стр. 60].

В ночь перед Нобийским землетрясением 1891 г. из деревни, находящейся вблизи эпицентральной области, видели сияние. При землетрясении 1923 г. в Канто одна женщина в центре Токио увидела вспышку света утром 1 сентября, т. е. за несколько часов до толчка.

В отношении землетрясения 1930 г. в Северном Идзу сообщали, что караульный, который нес дежурство на каланче пожарной охраны в деловой части Токио, заметил вспышку света в южном направлении примерно за 10 мин до толчка, а затем

четыре или пять искроподобных вспышек в продолжение землетрясения. Несколько рыбаков, вечером перед землетрясением собиравшихся спустить свою лодку на воду, наблюдали к западу от горы Амаги светящееся тело сферической формы, которое с большой скоростью пронеслось в северо-западном направлении.

В статье Терады [444] приводится множество примеров световых явлений, связанных с возникновением землетрясений за пределами Японии. Например, в случае Юньнаньского землетрясения в марте 1925 г. ( $M=7,1$ ) непосредственно перед каждым из сильных толчков распространялся серный запах и на небе появлялось яркое пламя, перемещавшееся с севера на юг.

Поскольку автор данной книги никогда не наблюдал никакого светового явления, которое было бы связано с возникновением землетрясения, он не может полностью поверить в свечение-предвестник. В самом деле, Терада писал [444]: «Что касается всех этих свидетельств очевидцев, то следует иметь в виду, что люди живо воспринимают все виды явлений, наблюдаемых во время сильного землетрясения, и склонны рассматривать их как нечто связанное с возникновением самой катастрофы; в то же время они забывают, что такие же явления часто наблюдаются и во многих других случаях, совершенно не связанных с землетрясениями».

### 2.3. ПОДЗЕМНЫЕ ВОДЫ

1) Если вода в фонтане убывает, то приближается землетрясение.

2) Когда вода в колодце внезапно убывает, можно ожидать землетрясения.

3) Внезапное понижение или повышение уровня грунтовых вод может явиться предвестником землетрясения.

4) Если колодезная вода внезапно становится мутной, это означает, что приближается землетрясение.

Эти положения взяты из японских легенд, имеющих какую-либо связь с описанием подземных вод.

Сообщалось [178 (1973), ч. 1, стр. 360], что, как заметил один самурай, вода в фонтане на ферме, обычно совершенно прозрачная, стала грязной в день землетрясения 1751 г. в Такате ( $M=6,6$ ) в районе, в настоящее время относящемся к префектуре Ниигата. Он обнаружил, что в этой местности вода в нескольких фонтанах также была грязной, и предсказал, что в этот вечер произойдет землетрясение.

Утром в день землетрясения в Эдо в 1855 г. самурай заметил, что вода в колодце стала мутной и соленой на вкус. Тогда

он высказал предположение о приближении землетрясения, но ему никто не поверил [266, стр. 623].

В одной из последующих глав мы увидим, что изменения грунтовых вод могут быть связаны с приближением землетрясений, и это можно научно объяснить.

## 2.4. МАГНЕТИЗМ

В произведениях классической литературы нередко можно встретить сообщения о том, что перед землетрясением магнит теряет свою способность притягивать.

В 1855 г. в центральной части Эдо жил оптик. Хозяин гордился своим подковообразным магнитом размером около 1 м. В день, когда произошло землетрясение 1855 г., все гвозди и железные предметы, притянутые магнитом, внезапно упали на землю. Хозяин удивился и страшно огорчился, поскольку этот магнит служил хорошей рекламой для его заведения. Он подумал, что магнит потерял свои магнитные свойства из-за старения. Однако спустя два часа Эдо поразило разрушительное землетрясение. После него хозяин обнаружил, что магнит снова может притягивать [266, р. 625]. Учитывая его опыт, говорили, что он изобрел устройство, которое может предсказывать землетрясения. Однако, по мнению Милна [246, р. 16], едва ли этот инструмент когда-либо действовал с успехом.

Вероятно, одной из наиболее полных обзоров работ по магнитным и электрическим явлениям, связанным с землетрясениями в давние времена, является статья Милна [247]. Сообщалось, что при землетрясении в Риме железные предметы упали с нескольких подковообразных магнитов. Примерно в 1870 г. граф Мальвазия в течение длительного времени наблюдал за магнитом, к которому был притянут небольшой железный предмет. Иногда этот предмет отлипал от магнита в связи с землетрясением, но бывали случаи, когда он не падал.

В те далекие времена полагали, что описанные выше явления вызваны изменениями в магнитном поле Земли. Однако современные знания о геомагнитном поле не позволяют связать столь крупное изменение с землетрясением.

## 2.5. РАСПОЛОЖЕНИЕ НЕБЕСНЫХ ТЕЛ

Много внимания уделялось статистическому исследованию моментов землетрясений по отношению к фазе Луны. Сообщалось, что, как правило, гораздо больше землетрясений происходит в новолуние и полнолуние, чем во время молодой Луны. Перрей писал о такой тенденции еще в 1875 г. [246]. Опыт

самого автора очень хорошо подтверждает эту тенденцию для некоторого интервала, входящего в период сейсмической активности Мацусиро (1965—1967 гг.). Более того, в течение этого периода корреляция между геомагнитными бурями и возникновением землетрясений была невероятно велика, хотя период такой корреляции длился недолго.

Сейсмологи проводили также статистические исследования зависимости возникновения землетрясений от положения звезд, Солнца и т. п., но автор не собирается давать здесь обзор таких статистических исследований. Интересующиеся этими вопросами могут найти много библиографических ссылок в других работах (например, [370]). Результаты такого рода исследований позволяют предположить, что механические силы, возникающие при определенном расположении небесных тел, могут явиться спусковым механизмом для землетрясения.

Некоторые полагают, что сильное землетрясение может произойти, если несколько планет займут определенные положения относительно друг друга, но автору не ясна физическая основа такого предсказания. Это может быть своего рода астрология.

Терада [444] приводит рассказ одного астронома, который предсказал землетрясение 1703 г. в Гэнроку. Как свидетельствует документ, опубликованный в «Dai Nihon Jishin Shiryo», Сукезаемон Сибукава, астроном того времени, состоявший на службе у Согуна, правителя Японии, в канун сильнейшего землетрясения предупредил офицеров в резиденции Согуна, что ночью может произойти сильная гроза или землетрясение. Отмечается также, что он имел обыкновение наблюдать за ночным небом, что естественно для астронома. Терада подозревал, что предсказание астронома было основано на каких-то световых явлениях. Но автору настоящей книги, также читавшему оригинальный документ, далеко не ясно, что послужило основой этого предсказания: какой-то вид астрологии или наблюдение свечения.

## 2.6. СВЕРХЪЕСТЕСТВЕННАЯ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ

В Японии рассказывают о людях с психическими заболеваниями, предвидящими наступление землетрясений благодаря своему сверхъестественному природному чутью. В тот день, когда произошло землетрясение 1855 г. в Эдо, человек, говоривший, что в него вселился дух лисы, сказал своим соседям, что в этот вечер произойдет сильнейшее землетрясение, и куда-то исчез. В то время суеверные японцы верили, что человеческая душа может заменяться душой лисы, обладающей сверхъестественной способностью принимать образ мужчины или женщины, превращать листья в банкноты и монеты и т. д.

В центральной части Эдо жила пожилая женщина, которая могла разговаривать с богами. Она страдала эпилепсией. Примерно за три месяца до землетрясения 1855 г. в Эдо она говорила, что город сгорит дотла, потому что бог по какой-то причине разгневался. Слух об этой женщине быстро распространился по всему Эдо. Она была арестована полицией и за свою болтовню изгнана из Эдо.

Рассказывают, что цунами 1896 г. в Санрику было предсказано старухой, жившей в деревне в префектуре Ивате. Она так глубоко верила в буддизм, что каждый день молилась в храме. За несколько месяцев до землетрясения и цунами она стала говорить, что деревня превратится в болото. Она объявляла о своем предвидении по всей деревне и при этом била в барабан, и люди решили, что она сошла с ума. Однако через некоторое время действительно произошло сильное землетрясение, сопровождавшееся цунами.

Говорят, что дама по имени миссис Бадд, жена бывшего губернатора Сан-Франциско, предсказала землетрясение 1906 г. в Сан-Франциско [51, стр. 274], но автору неизвестны подробности этой истории. Один сумасшедший лейб-гвардеец напророчил, что 4 апреля 1691 г. в Лондоне произойдет землетрясение [246].

Возможно, душевнобольные, обладающие повышенной чувствительностью к некоторым явлениям, воспринимают необычные звуки, запахи, вспышки света и т. п., которые столь слабы, что нормальные люди их не замечают. Кое-что из того, что ощущают такие люди, нельзя сбрасывать со счета, но для целей предсказания землетрясений на научной основе на подобные сверхъестественные факторы бесполезно ориентироваться.

## 2.7. ДРУГИЕ ИНДИКАТОРЫ

Один кондитер в Токио утверждает, что он может предсказывать землетрясения, наблюдая оттенки цвета отваренного риса для японских сладостей. Некоторые рассказывают, что перед землетрясением свечи в буддийских или синтоистских храмах странным образом изгибаются или сминаются. С позиций физически обоснованной теории всем этим признакам и предчувствиям трудно доверять. Довольно странно, что даже в XX в. они все еще широко распространены и люди в них верят. И к самому автору время от времени не только от японцев, но и от людей из других стран поступают письма и телефонные звонки любителей предсказывать землетрясения. Можно сказать, что хобби многих людей — предсказывать землетрясения, и это в свою очередь показывает, насколько велико желание человечества уметь предсказать это стихийное бедствие.

## ЗАРОЖДЕНИЕ НАУКИ О ПРЕДСКАЗАНИИ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

Пока предсказание землетрясений основывалось на таких наблюдениях, о которых рассказывалось в предыдущей главе, едва ли можно было говорить о предупреждениях на основе данных современной науки. Отметим, что еще около ста лет назад наука о землетрясениях и их предсказании оставалась делом астрологов, гадалок, а иногда и сумасшедших. Поскольку успехи в исследовании землетрясений не приходили быстро, мы и теперь еще страдаем от ложных прогнозов любителей предсказывать землетрясения.

### 3.1. НАЧАЛО ИССЛЕДОВАНИЙ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ В ЯПОНИИ

Около ста лет назад, с наступлением новой эпохи в истории Японии, японское правительство пригласило многих ученых из западных стран с целью ускорить модернизацию науки в Японии. Некоторые профессора, прибывшие в Японию по приглашению японского правительства, обратили внимание на то, что в районе Токио — Иокогама часто происходят сильные землетрясения.

Землетрясение 1880 г. в Иокогаме ( $M = 5,4$ ), вызвавшее повреждения дымовых труб, надгробных памятников и т. д., дало приглашенным из западных стран ученым повод организовать Сейсмологическое общество. Среди этих ученых особого упоминания заслуживают Дж. Юинг и Дж. Милн, которые изобрели сейсмографы для практического использования, основанные на принципе горизонтального маятника. Можно сказать, что это и было началом современной сейсмологии. Хотя в задачи этой главы не входит рассмотрение истории сейсмологии в целом, все же упомянем, что волны  $P$  (продольные) и  $S$  (поперечные) были впервые обнаружены с помощью сейсмографов, сконструированных этими учеными.

Милн, женившись на японке, провел в Японии почти 20 лет. Он не только способствовал развитию сейсмологических исследований, но и воспитал ряд японских сейсмологов, например таких, как Секия, Омори, Имамура и др., которые впоследствии стали ведущими сейсмологами Японии.

### 3.2. НОБИЙСКОЕ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЕ 1891 г. И ИМПЕРАТОРСКИЙ КОМИТЕТ ПО ИССЛЕДОВАНИЮ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИИ

28 октября 1891 г. в районе Мино — Овари (теперь префектуры Гифу и Айти) в Центральной Японии произошло сильное землетрясение, магнитуда которого оценивалась в 7,9 [331, стр. 523 \*]. Получившее название Нобийского (по сокращенному наименованию Мино—Овари), это землетрясение стало особо известно из-за разлома Неодани, появившегося в связи с землетрясением и протянувшегося на 40 км в направлении ЗСЗ—ВЮВ. Наибольшая разность высот между крыльями образовавшегося разлома достигала 6 м. Сообщалось, что погибло 7273 человека, 142 177 домов полностью разрушились и в более чем 10 000 пунктах произошли оползни. В течение примерно 10 лет ощущались афтершоки. Примечательно, что в Нагое, самом крупном городе Центральной Японии, многие кирпичные здания, построенные в западном стиле, получили сильные повреждения.

После этого землетрясения японское правительство учредило Императорский комитет по исследованию землетрясений. Главная задача его состоит в том, чтобы исследовать сейсмические и вулканические явления и найти способ уменьшить опасность от землетрясений. Комитет сделал все возможное, чтобы собрать исторические документы, имеющие отношение к землетрясениям и извержениям вулканов на протяжении всей истории Японии. Записи о землетрясениях были прослежены вплоть до 416 г. н. э. Накопление сейсмической информации за такой большой период (что возможно только в Японии) играет важную роль для оценки сейсмического риска в заданном районе. Однако следует выразить сожаление о том, что, как уже отмечалось в гл. 2, опубликованы только наиболее поздние из собранных таким образом исторических документов.

Сейсмическая история Китая также очень богата [226]. Но в противоположность Японии эта страна слишком велика, и поэтому сейсмические сведения не охватывают всю ее целиком.

### 3.3. ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЕ 1923 г. В КАНТО

Подобно Нобийскому, землетрясение 1923 г. в Канто явилось страшным ударом для японцев. Канто (иногда пишется «Кванто») представляет собой район, окружающий Токио. Мы не будем здесь повторять детальное описание этого землетрясения, так как прекрасный отчет о нем был опубликован

\*) Страницы книги Рихтера [331] приводятся по русскому изданию.— *Прим. ред.*

(например, см. [331, стр. 527]). Опишем вкратце повреждения, вызванные этим землетрясением.

1 сентября 1923 г. землетрясение с магнитудой, оцениваемой величиной 7,9, охватило область Южного Канто, включая Токио и Иокогаму — экономические, политические и культурные центры Японии. Ущерб, нанесенный этим землетрясением, как можно видеть из табл. 3.1, был неимоверно велик. Много смертей было вызвано пожаром, начавшимся вскоре после землетрясения. Кроме того, на побережье залива Сагами, п-ова Идзу, Миура и Босо (см. рис. 5.29) обрушились гигантские волны цунами, высота которых в ряде мест превышала, согласно сообщениям, 10 м.

ТАБЛИЦА 3.1

Ущерб от землетрясения 1923 г. в Канто

Полностью разрушенных домов	128 266
Частично разрушенных домов	126 233
Сгоревших домов	447 128
Число погибших	142 807

Во время землетрясения прибрежные части п-овов Босо и Миура поднялись на 1—2 м. Считают, что землетрясение было вызвано сбросовым движением вдоль подводного каньона, называемого рвом Сагами и пересекающего залив Сагами в районе между о. Осима и п-овом Босо в направлении СЗ—ЮВ.

Социальные последствия землетрясения были столь велики, что в 1925 г. правительство Японии поспешно учредило Сейсмологический институт, который был присоединен к Токийскому императорскому университету (ныне Университет Токио). Ряд сейсмологических институтов был также создан в императорских университетах других городов, например в Киото и в Сендае. Кроме того, была расширена сеть сейсмических наблюдений Центральной метеорологической обсерватории (ныне Японское метеорологическое агентство).

#### 3.4. СЕЙСМОЛОГИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ (ERI)

Нельзя сказать, чтобы Сейсмологический институт был крупной организацией с самого начала. Большинство сотрудников — физиков, архитекторов, инженеров-строителей, географов и геологов — работали в нем по совместительству. Однако шли годы, в штат института приходили вновь окончившие высшие учебные заведения физики, сейсмологи и геологи. В результате создавалась исключительно энергичная исследовательская группа, де-

тельность которой открыла новый этап в исследовании землетрясений.

В первое время деятельности ЕРИ нужно было много изучить о самом явлении землетрясения. Надо сказать, что, хотя работа, проведенная Императорским комитетом по исследованию землетрясений, и была весьма важной, накопленная информация имела в основном описательный, а не строго научный характер. Поэтому основатели ЕРИ начали изучать землетрясение как явление физическое. Например, для измерения сотрясений грунта, а также вибраций зданий во время землетрясений была разработана новая техника. Ишимото сконструировал и построил совершенно новый акселерометр, при помощи которого впервые удалось измерить ускорение колебаний грунта во время землетрясения. Он изобрел также кварцевый горизонтально-маятниковый наклономер для измерения очень малых наклонов земной поверхности. Интенсивную теоретическую работу вела группа исследователей под руководством проф. Сэзавы, который вывел, в частности, общие уравнения распространения упругих волн в сферической системе координат. Вследствии его теория была использована во многих задачах, связанных с распространением объемных и поверхностных волн.

Вскоре после создания ЕРИ произошло несколько сильных землетрясений, таких, как в Танго в 1927 г. и в Северном Идзу в 1930 г. Благодаря этому сотрудники института имели возможность произвести наблюдения на охваченной землетрясением территории и узнать много важного о связанных с ним явлениях. Особенно важно то, что в результате анализа данных нивелирования и триангуляционной съемки, полученных до и после землетрясения, были обнаружены заметные деформации земной поверхности.

Примечательно, что множество новых фактов о явлениях, связанных с землетрясениями, было получено в течение первых десяти лет существования ЕРИ. В последующие годы весьма интенсивно развивались исследования, основанные на новых теориях и с применением новой аппаратуры. Вообще можно сказать, что к тому времени сейсмология утвердилась как одна из физических дисциплин. Однако дальнейшие исследования в ЕРИ были урезаны из-за второй мировой войны.

В первое время после войны деятельность ЕРИ была мало активной, поскольку на исследования отпускались крайне ограниченные средства. Но постепенно, с возвращением в институт оставшихся в живых сотрудников, деятельность ЕРИ возобновилась. С начала 50-х годов стало возможным посылать молодых исследователей института в зарубежные страны. Это было важно для Японии, так как в эти годы было создано много международных проектов. К концу 60-х годов Япония

в основном восстановила свое экономическое положение, и потому ERI возродился в более модернизированном виде. Если до войны в нем работало лишь 30—40 человек, включая техников и обслуживающий персонал, то к середине 60-х годов общее число служащих достигло приблизительно 200 человек. Кроме того, ERI стал руководить деятельностью 18 обсерваторий, расположенных по всей Японии. На них ведутся сейсмические и геомагнитные наблюдения, а также измерения деформации коры и наблюдения за цунами.

Вероятно, деятельность ERI достигла своего апогея в период роя землетрясений, происшедших в Мацусиро, небольшом городке Центральной Японии (см. рис. 5.55), подвергшемся действию исключительно большого числа толчков в течение 1965—1967 гг. В стадию кульминации ощущалось до 600 толчков в сутки, включая происходившие время от времени толчки умеренной силы, вызывавшие небольшие разрушения.

ERI проводил в районе Мацусиро все виды наблюдений — сейсмометрические, геологические, геодезические, геомагнитные и т. п. На основе результатов этих наблюдений местные жители иногда получали предупреждения о приближающемся землетрясении.

После событий в Мацусиро с развитием национальной программы предсказания землетрясений, о чем будет говориться в следующей главе, масштабы работ ERI существенно расширились. Поскольку администрация ERI как одного из институтов, входящих в состав Университета Токио, не была укреплена, рано или поздно должны были возникнуть осложнения. Начиная с 1970 г. ERI встретился с серьезными трудностями и, несмотря на свою прославленную историю, в первой половине 70-х годов уже не мог нормально функционировать.

Благодаря деятельности иностранных и отечественных сейсмологов, сейсмологов Императорского комитета по исследованию землетрясений, ERI, Центральной метеорологической обсерватории и сейсмологических институтов провинциальных университетов в Японии были накоплены данные, свидетельствующие о возможном существовании явлений, предвещающих крупные землетрясения.

Изучение землетрясений с целью поиска явлений, им предшествующих, в течение последних двух десятилетий ведется не только в Японии, но и в других странах. Однако японцы безусловно должны были прилагать наибольшие усилия в этом направлении [346]. Развитие сейсмологии в западных странах было направлено главным образом на выяснение внутреннего строения Земли по данным о распространении сейсмических волн, а не на исследование физической сущности механизма землетрясений.

## ПРОГРАММЫ ПРЕДСКАЗАНИЯ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

### 4.1. «ПРОЕКТ ИССЛЕДОВАНИЙ ПО ПРЕДСКАЗАНИЮ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ»

Накопление фактов, наблюдаемых перед землетрясением, с течением времени позволило японским сейсмологам выявить возможные предвестники землетрясений. Всего каких-нибудь 20—30 лет назад для профессионального сейсмолога было еще непривычно говорить о предсказании землетрясений. Прогнозы такого рода всецело были уделом гадалок, астрологов и им подобных. В последние же годы положение коренным образом изменилось.

Примерно с 1960 г. японские сейсмологи начали изучать возможные подходы к проблеме предсказания землетрясений. Они часто собирались для обсуждения этих проблем и сформировали исследовательскую группу по предсказанию землетрясений. Результаты дискуссий этой группы были опубликованы в кратком обзоре под названием «Предсказание землетрясений — современные достижения и планы дальнейших исследований» [452]. Этот обзор известен среди японских сейсмологов как «Проект исследований по предсказанию землетрясений».

Проект отражает представления японских сейсмологов о путях решения проблемы прогноза землетрясений и является основой для составления конкретных программ по поиску предвестников землетрясений на ближайšie годы. В Проекте подчеркивается, что в первую очередь необходимо получить основные данные для возможного прогноза и не торопиться с конкретными предсказаниями. Там же дается анализ достоинств и недостатков отдельных направлений: геодезических работ, непрерывных наблюдений движений земной коры, сейсмической активности, скоростей сейсмических волн, активных разломов, геомагнитных и геоэлектрических явлений и т. д. Ниже приводятся несколько абзацев из заключительной главы Проекта, в которой рассмотрена роль различных геофизических направлений для поиска предвестников землетрясений и приводятся ожидаемые результаты этих работ.

Для исследований геодезическими методами предлагается проводить повторные съемки в масштабах всей страны: нивелирование с интервалом 5 лет и триангуляцию с интервалом

10 лет. Следовательно, программа начнет осуществляться не ранее чем через 10 лет. В определенных районах достаточный объем данных будет получен уже через 5 лет. Первые годы осуществления Проекта уйдут главным образом на оснащение аппаратурой и обучение персонала, поэтому следует отвести 5 лет на подготовительный этап.

Для создания сети мареографических станций потребуется 2 года, но, чтобы они могли стать действительно полезными, нужно иметь данные наблюдений за несколько лет.

Для установки шести опорных станций по непрерывным наблюдениям деформаций земной коры и обучения обслуживающего персонала потребуется 3 года. Затем подготовленный персонал мог бы создать за 8 лет запланированную сеть из 100 станций. При выполнении всех намеченных планов завершение создания сети можно ожидать через 11 лет.

Для наблюдения микроземлетрясений и создания двадцати кустов станций необходимо порядка 10 лет.

Для наблюдения ультрамикроземлетрясений можно создать в течение 6 лет небольшую сеть станций в шести определенных районах.

Для определения скоростей сейсмических волн с помощью взрывной сейсмологии необходимы систематические наблюдения в течение 6 лет в сочетании с проведением взрывов на шести полигонах.

Исследование активных разломов можно завершить за 2 года, изучение вопросов земного магнетизма и теллурических токов — за 3 года; в определенных районах можно создать несколько постоянных станций.

Если Проект будет осуществляться в соответствии с планом, то через 5 лет будет накоплен некоторый объем полезной информации, а спустя 10 лет объем данных будет достаточен для предсказания землетрясений.

Другими словами, пройдет по крайней мере 10 лет, прежде чем съемки и наблюдения дадут реальные результаты. После этого начнется этап обработки данных. В настоящее время статистика показывает, что ежегодно в Японии и вблизи нее происходит около пяти землетрясений с магнитудой  $M > 6$ . Одно из них, как правило, разрушительное. Если мы хотим предсказывать землетрясения с магнитудой  $M > 6$ , то, только накопив данные за несколько лет, удастся установить достаточно тесную корреляцию между землетрясениями и наблюдаемыми явлениями-предвестниками.

В Проекте ничего не сказано о затратах, необходимых для его реализации. Неофициально было оценено, что если в течение 10 лет на реализацию программы будет израсходовано

10 млрд. нен (около 30 млн. американских долларов), то можно будет установить, достижимо ли предсказание землетрясений. Журналисты были склонны думать, что такая сумма за 10 лет позволит решить проблему прогноза сильных землетрясений.

## 4.2. ЯПОНСКАЯ ПРОГРАММА

### 4.2.1. Начальный этап и дальнейшее развитие

Несмотря на большой интерес общественности Японии к прогнозу землетрясений, начало реализации национальной программы по поиску предвестников землетрясений несколько задержалось из-за ряда формальностей.

В 1963 г. Геодезическим советом Министерства образования Японии, который координирует геодезические и геофизические исследования в стране, был создан подкомитет по предсказанию землетрясений. В том же году Научный совет Японии, в чьи функции входит рассмотрение важных научных проектов в стране, рекомендовал правительству принять меры содействия исследованиям по прогнозу землетрясений.

Совершенно неожиданно 16 июня 1964 г. город Ниигата и его окрестности, самый развитый в промышленном отношении район побережья Японского моря, пострадали от разрушительного землетрясения ( $M=7,5$ ). После Ниигатского землетрясения усилились требования общественности о проведении исследований по прогнозу землетрясений, и Японское правительство приняло решение о финансировании долгосрочной программы работ по поиску предвестников землетрясений.

К счастью, основные направления программы уже были ранее разработаны в Проекте. Упомянутый выше подкомитет успешно выработал программу исследований на первый год. Более обширная пятилетняя программа была затем предложена вновь созданным Комитетом по предсказанию землетрясений при Национальном комитете по геодезии и геофизике Научного совета Японии. К сожалению, реальная программа до некоторой степени отличалась от Проекта, так как ассигнования, отпущенные правительством, были ограниченными.

Первоначально пятилетняя программа [334] включала следующие направления исследований:

- 1) выявление по геодезическим наблюдениям движений земной коры, предшествующих землетрясениям;
- 2) выявление по мареографическим наблюдениям движений земной коры, предшествующих землетрясениям;
- 3) непрерывные наблюдения деформаций земной коры с помощью деформографов и наклономеров;

- 4) сейсмические наблюдения и установление закономерностей сейсмической активности в Японии;
- 5) наблюдения за изменением скоростей сейсмических волн;
- 6) детальное изучение активных разломов и складок;
- 7) геомагнитные и геоэлектрические наблюдения;
- 8) лабораторные исследования и испытания по разрушению образцов горных пород;
- 9) создание центров по обработке данных.

В самом начале реализации программа предсказания землетрясений была опробована Мацусирскими землетрясениями 1965—1967 гг. Как уже отмечалось в § 3.4, активность роя с центром в г. Мацусиро, префектура Нагано (см. рис. 5.55), в одно время достигла такой силы, что местное население настоятельно требовало информации: ждать ли еще более сильного толчка. Мэр города заявил в прессе: «В чем мы больше всего нуждаемся, так это в науке о землетрясениях».

В Мацусиро не произошло ни одного особенно сильного землетрясения, несмотря на очень большое число слабых толчков. Благодаря этому ERI и другие организации смогли провести все виды наблюдений без каких-либо перерывов из-за неполадок. Было показано, что изменения наклонов земной поверхности, наблюдавшиеся с помощью водотрубных наклономеров, хорошо коррелируют с ростом и спадом сейсмической активности. Перед землетрясениями умеренной силы часто наблюдались наклоны-предвестники. Временные наблюдения за микроземлетрясениями подтвердили, что многочисленные слабые толчки происходили в тех местах, где несколько месяцев спустя произошли довольно сильные землетрясения.

На основе этих наблюдений Японское метеорологическое агентство (JMA) предупреждало население о возможности землетрясения умеренной силы.

Опыт Мацусиро подсказал возможные пути улучшения программы прогноза землетрясений. Стало ясно, насколько важна быстрая обработка данных, а также необходимость создания полевых отрядов, которые могли быть посланы в любое время в район опасности. Впоследствии в эти положения были внесены дальнейшие исправления [137, 193, 337].

16 мая 1968 г. северная часть Японии сильно пострадала от землетрясения в Токати-оки ( $M=7,9$ ). После него необходимость предсказания землетрясений обсуждалась на правительственном уровне и было предложено сконцентрировать больше усилий на проблеме прогноза землетрясений. Общественность требовала не исследований по предсказанию землетрясений, а реальных прогнозов, где это возможно. Таким образом, пятилетняя программа была превращена в долговременную [345].

В ответ на требование общественности было решено создать три центра, чтобы ускорить обработку данных по предвестникам землетрясений: Центр по наблюдениям за активностью земной коры (геодезические, мареографические данные и т. д.) в Институте географических исследований (GSI), Центр по наблюдениям за сейсмической активностью (для землетрясений с  $M > 3$ ) в JMA и Центр по наблюдениям за предвестниками (микроземлетрясения, деформации земной коры, магнитные и другие данные по университетским источникам) в ERI Токийского университета.

После обработки в центрах данные передаются в недавно организованный Координационный комитет по прогнозу землетрясений (ССЕР), также подчиненный GSI. ССЕР, который состоит из тридцати специалистов, представляющих университеты и правительственные организации, занимается анализом данных, присылаемых через три упомянутых канала. Таким образом, этот комитет фактически является штаб-квартирой по прогнозу землетрясений в Японии. Он уполномочен оповещать население о любых аномальных явлениях, таких, как аномальные деформации земной коры, сейсмическая активность и т. д., которые могут быть связаны с угрозой возникновения сильного землетрясения в определенном районе; правда, до сих пор еще не было ни одного случая объявления тревоги.

Кроме текущих наблюдений за отдельными предвестниками по всей стране, проводятся усиленные наблюдения в особо важных районах, которые характеризуются следующими особенностями: 1) разрушительными землетрясениями в прошлом, 2) наличием активных разломов, 3) повышенным уровнем сейсмической активности или 4) важны в социально-экономическом отношении, например район Токио. В этих районах все усилия должны быть направлены на выявление предвестников землетрясений; для этого необходимо создание обсерваторий для наблюдений за движениями земной коры и микроземлетрясениями, а также проведение частых повторных геодезических съемок. В 1969 г. ССЕР выделил девять таких районов (рис. 4.1).

Как только ССЕР сообщает, что в некоторой области наблюдаются какие-то аномальные явления, эта область объявляется областью усиленных (детальных) наблюдений. В ней предполагается проведение наблюдений группами специалистов различных научных направлений. Если усиленные наблюдения покажут, что аномалия может быть связана с возникновением землетрясения, ССЕР объявляет эту область областью особо концентрированных наблюдений. Путем концентрации здесь всех видов наблюдений максимальные усилия будут направлены на предсказание в этой области возможного землетрясения. В 1969 г. областью усиленных наблюдений был объявлен округ

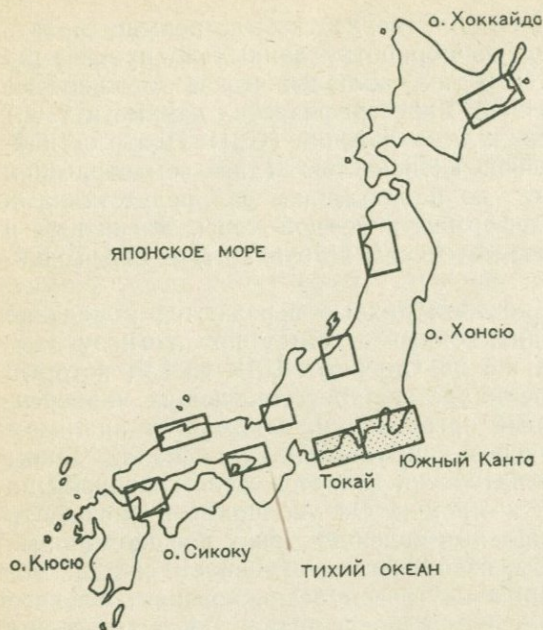


Рис. 4.1. Особо важные районы наблюдений, выделенные ССЕР. Районы Южного Канто и Токай (заштрихованные области) в 1969 и 1974 г. были выбраны в качестве зон усиленных наблюдений.

Южный Канто, поскольку к югу от Токио было обнаружено аномальное поднятие земной коры. Геодезические, сейсмологические и другие данные позволили сделать вывод о возможности сильного землетрясения вблизи тихоокеанского побережья Центральной Японии (округ Токай), и в 1974 г. эта область была объявлена областью такой же категории.

Такая стратегия может показаться превосходной. Однако в ее осуществлении имеется ряд трудностей. ССЕР лишь «координирует»; он не уполномочен давать «распоряжения», и поэтому не всегда удается провести своевременные наблюдения.

В 1973 г., спустя 50 лет после страшной катастрофы 1923 г. — землетрясения в Канто, в Японии особо отмечалась необходимость принять меры к уменьшению опасности от землетрясений. С помощью газетных кампаний, еженедельных журналов, телевизионных передач и т. п. население предупреждалось об опасности возникновения землетрясений в различных частях Японии. Специальный комитет по развитию новых методов при Национальном парламенте собрал специалистов

с целью выяснения близкой опасности возникновения разрушительных землетрясений. Автор настоящей книги отметил, что он не будет удивлен, если сильное землетрясение произойдет в океане вблизи восточных берегов Хоккайдо и тихоокеанского побережья Центральной Японии; этот вывод был основан на исследованиях автора относительно вероятности возникновения землетрясений.

17 июня 1973 г. недалеко от восточного побережья Хоккайдо действительно произошло землетрясение с магнитудой 7,4. Усиление исследований в соответствии с существующей программой по предсказанию землетрясений стало насущной социальной потребностью. Поэтому Геодезический совет внес на рассмотрение правительства предложение об увеличении вдвое или втрое капиталовложений на реализацию программы. Новая программа включала оснащение аппаратурой нового типа — такой, как донные сейсмографы, телеметрические каналы связи для передачи данных о микроземлетрясениях, создание высокоточных геодезических сетей и т. д.

В то же время насущным вопросом было создание органа, который мог бы выполнять функции штаб-квартиры по предсказанию землетрясений и обладал бы большими

ТАБЛИЦА 4.1

Годовой бюджет японской программы по прогнозу землетрясений

Год	Сумма в иенах
1965	212 539 000
1966	290 035 000
1967	334 362 000
1968	328 559 000
1969	496 116 000
1970	596 120 000
1971	805 720 000
1972	898 900 000
1973	761 164 000
1974	1 552 674 000
1975	2 007 638 000
Итого	8 283 827 000 (около 28 млн. американских долларов)

полномочиями, нежели существующий ССЕР. Однако в то время никакого определенного решения о такой новой организации не было принято.

В табл. 4.1 приводятся сведения о ежегодном бюджете работ по предсказанию землетрясений в Японии (начиная с 1965 г.). Нельзя сказать, что общая сумма очень велика. Фактически она гораздо меньше бюджета Японской программы космических исследований. Указанные в таблице средства были израсходованы только на поиски предвестников землетрясений, и это оказало сильное влияние на развитие японских геофизических исследований вообще. Следует отметить, что расходы на заработную плату сотрудникам, работающим по этой программе, на постройку зданий для обсерваторий и т. п. покрывались из других источников. Нет сомнений, что современного уровня исследований по поиску предвестников землетрясений в Японии невозможно было бы достичь без финансовой поддержки правительства, о которой говорилось в этом разделе.

В последующих разделах этой главы кратко описывается развитие отдельных научных направлений программы.

#### 4.2.2. Геодезические работы

Впервые триангуляционная съемка первого класса на Японских островах была проведена в конце прошлого столетия. На рис. 4.2 показана триангуляционная сеть, состоящая из 330 пунктов первого класса и покрывающая всю Японию. Триангуляционные съемки настолько трудоемки и дорогостоящи, что повторную съемку в Японии удалось завершить лишь совсем недавно. Оказалось трудным повторение триангуляционных съемок первого класса каждые 10 лет, как это предполагалось ранее в Проекте.

Однако, к счастью, геодезическая аппаратура, с помощью которой можно измерять расстояния в несколько десятков километров, в последние годы была усовершенствована благодаря использованию лазерных источников света (рис. 4.3). Ожидается, что в ближайшие годы большая часть триангуляционной съемки будет заменена геодезической. GSI планирует создание высокоточной геодезической сети для проведения наблюдений с помощью геодеметров каждые 5 лет. Геодезическая сеть состоит не только из пунктов триангуляции первого класса, но и из пунктов второго класса. Общее число пунктов достигает примерно 6000. Среднее расстояние между двумя пунктами около 8 км. Таким образом, если план будет выполняться нормально, ожидается, что удастся проследить закономерность накопления деформаций в земной коре по всей Японии.

В настоящее время имеется возможность каждые 5 лет проводить нивелирование первого класса вдоль линий общей протяженностью 20 000 км (рис. 4.4). Это и предлагалось Проектом. Мы увидим далее, как с помощью этих съемок было обнаружено много случаев деформаций земной коры, предваряющих землетрясения.

Интересно отметить, что накопление деформаций, обнаруженное в результате повторных геодезических съемок, играет определенную роль при оценке вероятности возникновения землетрясения в исследуемом районе.

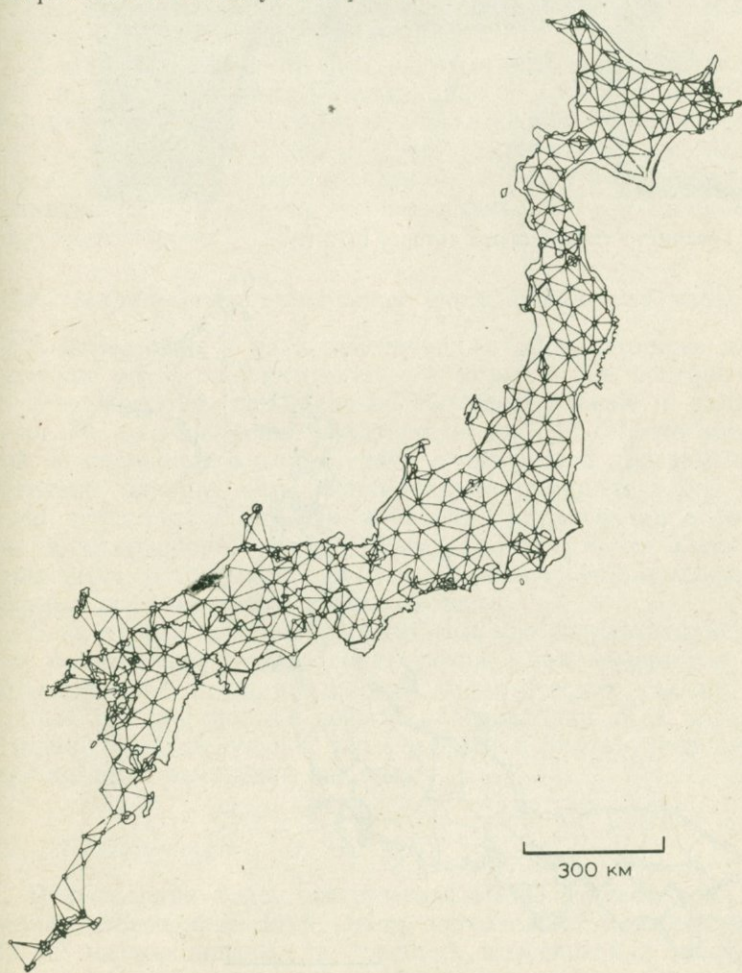


Рис. 4.2. Триангуляционная сеть первого класса Японии.

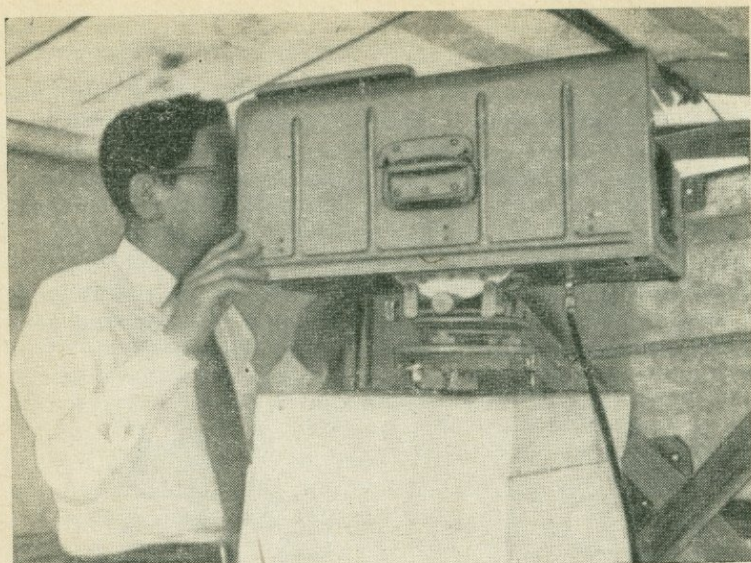


Рис. 4.3. Геодиметр типа 8 (фото автора, 1972 г.).

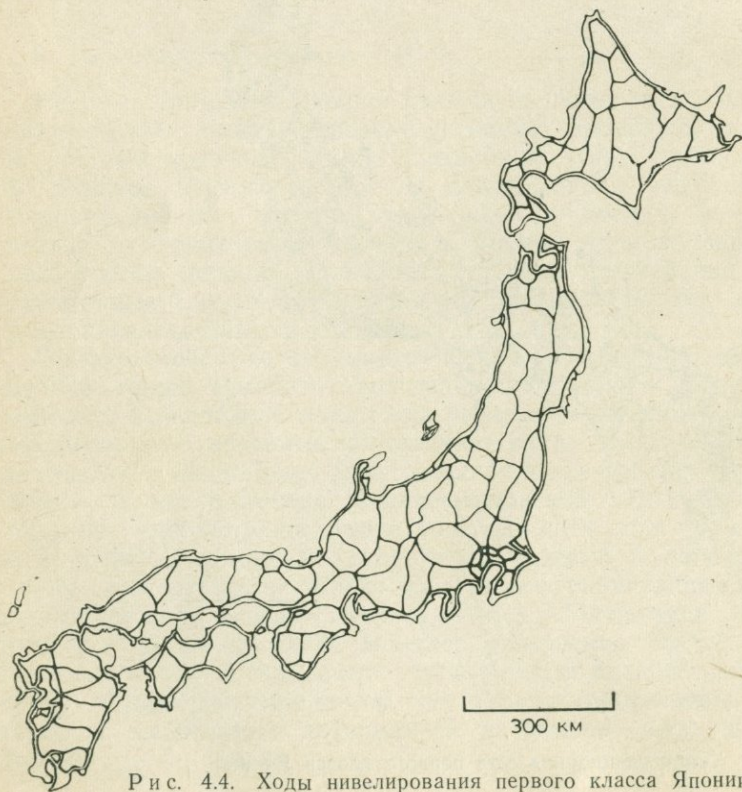


Рис. 4.4. Ходы нивелирования первого класса Японии.

#### 4.2.3. Мареографические наблюдения

С помощью мареографических наблюдений можно обнаружить поднятия и опускания земной поверхности относительно уровня моря. Первоначально планировалось установить мареографические станции вдоль всего побережья Японских о-вов на расстоянии приблизительно 100 км друг от друга. В дополнение к существующим станциям в соответствии с программой поиска предвестников землетрясений было создано около 20 новых, так что всего в настоящее время действует 80 мареографических станций. Данные наблюдений этих станций посылаются в центр GSI для обработки.

С начала реализации программы с помощью этих мареографов не было обнаружено каких-либо заметных предвестников. Очевидно, флуктуации уровня моря океанографического происхождения, вызванные изменением температуры или плотности морской воды, настолько велики, что едва ли можно обнаружить поднятия или опускания земной поверхности меньше нескольких сантиметров.

#### 4.2.4. Непрерывные наблюдения движений земной коры

В дополнение к пяти действующим обсерваториям для наблюдения за движениями земной коры были построены еще 12 обсерваторий, оснащенных деформографами и наклономерами. Их расположение показано на рис. 4.5. Число обсерваторий, построенных в соответствии с настоящей программой, значительно меньше, чем первоначально предполагалось в Проекте; исходя из стоимости и затрат труда создание большого числа обсерваторий с подземными галереями оказалось нерентабельным. В будущей программе большую роль сыграют скважинные деформографы и наклономеры.

В некоторых случаях установлено, что результаты непрерывных наблюдений хорошо согласуются с закономерными движениями земной коры по данным геодезических съемок, проведенных в окрестностях данной обсерватории. Как мы увидим в одной из последующих глав, имелся и ряд случаев предвестников в виде изменений наклона.

#### 4.2.5. Сейсмичность

В последние годы инструментальные сейсмические наблюдения, проводимые JMA, были значительно модернизированы. На 55 метеорологических станциях классические сейсмографы Вихерта заменяются электромагнитными сейсмографами с видимой записью. К 1973 г. половина этой работы была

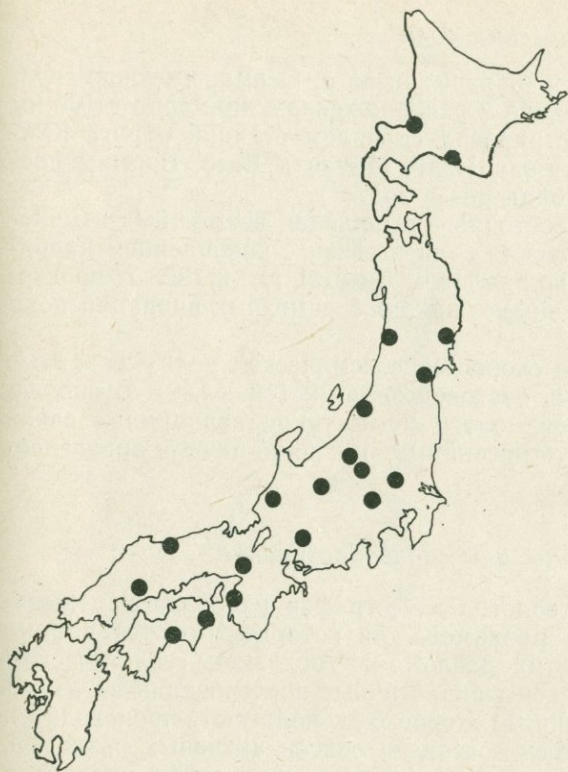


Рис. 4.5. Обсерватории для наблюдений за деформациями земной коры в Японии.

осуществлена. На 67 станциях установлены сейсмографы с записью на магнитную ленту, и на пяти региональных центрах — полуавтоматические устройства для обработки данных.

В результате наблюдений, проводимых в соответствии с программой по предсказанию землетрясений, стало ясно, что изучение всех землетрясений с  $M > 3$ , как это первоначально предполагалось в Проекте, крайне затруднительно. Целесообразно проводить работы лишь для землетрясений с  $M \geq 3,8$ .

В настоящее время действуют 19 обсерваторий для наблюдения за микроземлетрясениями, расположение которых показано на рис. 4.6. Каждая обсерватория является кустом для нескольких станций; таким образом, в настоящее время вся Япония покрыта довольно плотной сетью наблюдений за микроземлетрясениями. Таким путем были изучены общие закономерности сейсмичности в стране. Исключение составляют лишь несколько частей Японии, где сеть пока недостаточно густа.



Р и с. 4.6. Обсерватории для наблюдений за микроземлетрясениями в Японии.

Пока еще мало сделано для создания телеметрической системы передачи данных по микроземлетрясениям. Поэтому все еще затрачивается огромный труд на обработку данных. По этой причине необходимо срочно усовершенствовать систему наблюдений.

Проведение сейсмических наблюдений в районе Токио затруднено шумами, вызванными строительством зданий, движением транспорта и т. п. В связи с этим Национальный исследовательский центр по предотвращению стихийных бедствий поместил сейсмограф в скважину глубиной 3510 м в 28 км к северу от Токио. Оказалось, что ослабление шума с глубиной настолько заметно, что увеличение этого сейсмографа удалось сделать в 1000 раз большим, чем увеличение однотипного сейсмографа, установленного на поверхности земли. Благодаря этому сейчас наблюдения за микроземлетрясениями, происходящими в районе Токио, значительно усилены.

#### 4.2.6. Скорости сейсмических волн

Сейсмические волны от взрывов на о. Осима, имеющем вулканическое происхождение и расположенном примерно в 100 км к югу от Токио, регистрировались рядом станций округа Южного Канто, включая п-ова Идзу, Миура и Босо. Взрывы производились примерно один раз в год.

Цель наблюдений состояла в выявлении возможных изменений скоростей сейсмических волн в связи с накоплением напряжений в земной коре под заливом Сагами, где в 1923 г. произошло землетрясение. Однако никаких заметных вариаций пока обнаружено не было.

Известны вариации скоростей сейсмических волн, связанные с дилатантной моделью очаговой области (см. гл. 9). В последние годы японские сейсмологи ищут такие вариации в связи с естественными землетрясениями, но пока ничего определенного не найдено.

#### 4.2.7. Активные разломы и складкообразование

Несколько групп геологов и географов работали над выявлением геологических разломов, для которых имеются данные о движениях вдоль этих разломов в недавнем геологическом прошлом. Были проведены аналогичные исследования по изучению складкообразования, которое, как полагают, происходит и в настоящее время. Был составлен список активных разломов, по которым в будущем могут внезапно произойти подвижки, приводящие к сильным землетрясениям.

#### 4.2.8. Геомагнитные и геоэлектрические исследования

На японских станциях большое внимание уделялось высокоточным наблюдениям геомагнитных вековых вариаций с помощью протонных прецессионных магнитометров. Иногда сообщалось о заметных изменениях геомагнитного поля в связи с землетрясениями. Однако есть опасения, что эти сведения ненадежны из-за трудностей измерения абсолютных величин параметров геомагнитного поля. По этой причине были организованы наблюдения с новыми высокостабильными магнитометрами. На рис. 4.7 нанесены станции, где были установлены протонные магнитометры с цифровой регистрацией. Сравнение результатов наблюдений, полученных на этих станциях, показало, что уровень естественных шумов геомагнитного поля оказался высоким и определение сейсмомагнитного эффекта в Японии — дело нелегкое.

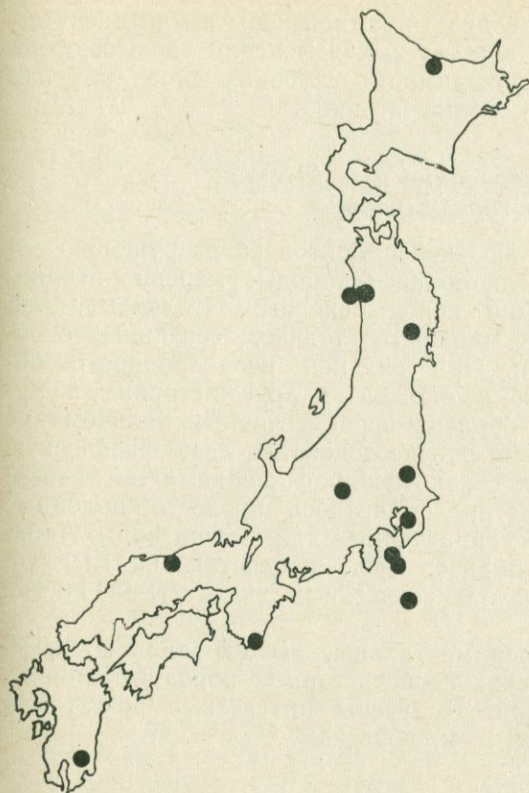


Рис. 4.7. Схема расположения в Японии станций, оснащенных протонными магнитометрами.

GSI интенсифицировал магнитные съемки. Никаких окончательных результатов пока не получено, но иногда появляются сообщения об изменениях геомагнитного поля, которые, по-видимому, коррелируют с возникновением землетрясений.

На одной из станций примерно в 60 км к югу от Токио были обнаружены изменения электрического сопротивления пород земной коры. Часто наблюдались изменения сопротивления, предшествующие землетрясению и сопутствующие ему. Изменение теллурических токов в Японии затруднительно из-за блуждающих электрических токов от электрических железных дорог, работающих на постоянном токе, и от других источников, а потому систематические наблюдения теллурических токов были затруднительны.

Измерения электропроводности земной коры и мантии путем наблюдений временных геомагнитных изменений указывают на возможные изменения проводимости глубоких слоев в связи с возникновением сильных землетрясений.

#### *4.2.9. Лабораторные исследования и испытания по разрушению образцов горных пород*

Мои [252] провел серию экспериментов по разрушению образцов горных пород. Если образец породы умеренно неоднороден, то непосредственно перед основным «толчком», или разрушением, происходит множество толчков, связанных с образованием микротрещин. При сильной неоднородности образца «главный толчок» не происходит. С другой стороны, в случае весьма однородного образца перед «главным толчком» не наблюдается микротолчков. Эти исследования дают физическую основу для установления связи между форшоками и главным толчком. В связи с этим предполагалось провести подобные эксперименты в условиях, характерных для земной коры. Аппаратура для этих экспериментов была предоставлена ERI Токійского университета и геофизическими институтами других университетов.

Были проведены экспериментальные исследования по измерению вариаций физических свойств горных пород в условиях механических напряжений. Получены интересные результаты по электрическим и магнитным свойствам.

#### *4.2.10. Обработка данных*

Для обработки данных по предвестникам в Центре наблюдений по прогнозу землетрясений в ERI была установлена вычислительная машина IBM360-40. Предполагалось, что машина будет обрабатывать данные, поступающие из университетов. Однако ввиду быстрого развития вычислительной техники в университетах Японии данные, полученные сотрудниками периферийных университетов, в основном обрабатывались на их собственных ЭВМ.

Сотрудники периферийных университетов отмечали необходимость создания региональных центров с достаточным штатом сотрудников, в которых могла бы проводиться подготовительная работа перед машинной обработкой. К 1974 г. было создано несколько таких центров.

Крупные организации, такие, как JMA, GSI и т. д., располагают собственными вычислительными машинами, которые могут быть использованы для обработки данных по предвестникам землетрясений.

### 4.3. АМЕРИКАНО-ЯПОНСКОЕ СОТРУДНИЧЕСТВО

В 1961 г. в результате переговоров между президентом США и премьер-министром Японии было достигнуто специальное соглашение о научном сотрудничестве между США и Японией. Среди многих исследований, проводимых в рамках Программы американо-японского сотрудничества, особенно успешными оказались семинары по вопросам прогноза землетрясений.

Дж. Оливер, в то время профессор сейсмологии Ламонтской геологической обсерватории Колумбийского университета, заинтересовавшись «Проектом исследований по предсказанию землетрясений» (см. § 4.1), опубликованным в 1962 г., обратился к Цубои, профессору геофизики Токийского университета и одному из авторов этого Проекта, с предложением провести конференцию по проблемам прогноза землетрясений. В этом письме отмечалось, что если бы заинтересованные сейсмологи США и Японии смогли встретиться и обменяться информацией по вопросам, связанным с предсказанием землетрясений, то это было бы весьма полезно для ученых не только этих стран, но и всего мира.

Естественно, японские сейсмологи интересовались аналогичными исследованиями, проводимыми в США, и поэтому они с удовольствием приняли это предложение. Таким образом, было решено, что конференция по вопросам исследований, связанных с прогнозом землетрясений, будет проводиться в Токио и Киото с 9 по 20 марта 1964 г. под эгидой Национального научного фонда США (NSF) и Японского общества содействия науке (JSPS).

Вступительное слово Оливера было очень волнующим, он сказал: «Уверяю вас, что те, кто приехал из США, приехали сюда с волнением. Мы знаем, что исследования, связанные с предсказанием землетрясений, более широко поставлены и во многих отношениях более развиты в Японии, нежели в США. Мы благодарны вам за то, что вы согласились поделиться с нами своими знаниями, и надеемся, что мы сможем частично отблагодарить вас, рассказав о наших собственных исследованиях в смежных областях сейсмологии. В настоящее время в США очень мало сейсмологов, которые уделяют хотя бы небольшую часть своего времени проблеме прогноза землетрясений...» [133].

В продолжение всей этой конференции и связанных с ней научных экскурсий американские сейсмологи смогли детально ознакомиться с исследованиями японских ученых по проблеме предсказания землетрясений. Вскоре после этой конференции, 28 марта 1964 г., на Аляске произошло разрушительное

землетрясение ( $M=8,4$ ). Это землетрясение вызвало беспокойство общественности; затем было выдвинуто предложение о развитии исследований по прогнозу землетрясений (см. следующий раздел). При составлении программы таких исследований очень помогли знания, приобретенные американскими участниками на этой конференции.

Вторая американско-японская конференция по прогнозу землетрясений была проведена с 6 по 9 июня 1966 г. в Ламонтской геологической обсерватории Колумбийского университета. Вопросы для обсуждения было много: в Японии в 1964 г. произошло Нингатское землетрясение, все еще продолжался Мацусирский рой землетрясений; в США в 1964 г. произошло землетрясение на Аляске, а в 1962 г. происходили искусственно вызванные землетрясения в Денвере. Американские сейсмологи представили тогда свою 10-летнюю программу исследований по прогнозу землетрясений [310].

После конференции была организована поездка в сейсмоактивные районы Невады и Калифорнии. Многие японские сейсмологи были поражены гигантскими разломами, возникшими в результате сильных землетрясений в прошлом. Весьма интересно отметить, что группа ученых, выезжавшая на эту экскурсию, могла наблюдать свежие трещины грунта в Паркфилде в Калифорнии; шутили, что здесь скоро произойдет сильное землетрясение. Спустя две недели там действительно произошло Паркфилдское землетрясение ( $M=5,3$ ). В предисловии к трудам этой конференции Оливер писал, что «это было первым наблюдением явления, которое действительно могло быть связано с грядущим землетрясением».

Ввиду быстрого развития исследований по предсказанию землетрясений третья конференция была проведена с 28 октября по 1 ноября 1968 г. в Национальном центре сейсмологических исследований (NCER) Геологической службы США (Менло-Парк, Калифорния); после конференции была организована экскурсия по Южной Калифорнии. На этот раз конференция была названа «Совместная американско-японская конференция по предвестникам нескольких землетрясений последних лет и другим смежным вопросам» [14].

На конференции были доложены результаты детальных наблюдений Мацусирских землетрясений, землетрясений в Денвере и т. д., а также было представлено много интересных докладов на другие темы.

В начале 70-х годов исследования по предсказанию землетрясений достигли значительных успехов. В результате переговоров между Дж. П. Итоном, директором NCER, и автором книги, который в 1972 г. был в США по делам, не имеющим отношения к этим исследованиям, было решено провести после

пятилетнего перерыва четвертую американско-японскую конференцию по вопросам предсказания землетрясений. Из-за беспорядков в университете и желания японских сейсмологов ознакомиться с последними достижениями американских ученых конференция состоялась лишь с 13 по 15 августа 1973 г. в Объединенном институте по исследованиям окружающей среды (CIRES) Университета штата Колорадо (Боулдер, Колорадо), возглавляемом К. Кислингером. Там был проведен американско-японский семинар по вопросам предсказания землетрясений и контроля над ними. Перед началом семинара состоялась экскурсия по маршруту Солт-Лейк-Сити — система разломов Уосатч — нефтяные промыслы Рейнджли — Скалистые горы [219].

Наряду с исследованиями по другим вопросам на конференции японские ученые доложили о своих исследованиях по прогнозу землетрясений на основе интенсивных геодезических работ в Японии. На участников конференции, приехавших из Японии, произвела большое впечатление система наблюдений за микроземлетрясениями в зоне разлома Сан-Андреас в Калифорнии. Японских сейсмологов также заинтересовали контролируемые эксперименты по искусственным землетрясениям на нефтяных промыслах Рейнджли. В настоящее время проявляется большой интерес к дилатантной модели возникновения землетрясений (см. гл. 14) и ее применению к предсказанию землетрясений, поэтому на конференции много времени было уделено рассмотрению этой модели.

Американско-японские конференции сыграли важную роль в развитии исследований по предсказанию землетрясений. В дополнение к этим семинарам в рамках программы американско-японского научного сотрудничества были проведены наблюдения за микроземлетрясениями, деформациями земной коры и т. п. Между двумя странами был проведен обмен как учеными, так и научной аппаратурой.

#### 4.4. АМЕРИКАНСКАЯ ПРОГРАММА

До недавнего времени американские ученые, по-видимому, не уделяли большого внимания сейсмической опасности. Отчасти это объясняется слабой сейсмичностью, отчасти — короткой историей страны и отчасти — малой плотностью населения. Однако положение дел меняется и в последние годы население Калифорнии быстро растет. Есть все основания полагать, что в будущем некоторые районы Калифорнии могут подвергнуться такому разрушительному землетрясению, как землетрясение 1906 г. в Сан-Франциско ( $M=8,3$ ).

Американские сейсмологи хорошо понимали это. Они изучали японский «Проект исследований по предсказанию землетрясений», и некоторые из них с целью изучить идеи японских ученых приехали в 1964 г. в Токио на американо-японскую конференцию, посвященную этим вопросам. Аляскинское землетрясение, которое произошло сразу после этой конференции, по видимому, ускорило развитие исследований по предсказанию землетрясений в США.

В 1965 г. группа ученых представила доклад о 10-летней программе исследований [324]. Эта программа состояла из пяти частей и была направлена не только на предсказание землетрясений, но и на предотвращение сейсмической опасности.

- 1) Полевые исследования:
  - а) составление детальных геологических карт,
  - б) скорости деформации,
  - в) тектонические механизмы,
  - г) гравиметрические съемки,
  - д) аэромагнитные съемки,
  - е) измерения по сейсмическим профилям,
  - ж) различные геофизические исследования,
  - з) изучение афтершоков,
  - и) геодезические съемки.
- 2) Оснащение аппаратурой сейсмоактивных районов:
  - а) группы станций для регистрации микроземлетрясений,
  - б) другая «кустовая» аппаратура,
  - в) специальная аппаратура для полевых измерений,
  - г) аппаратура, устанавливаемая в скважинах,
  - д) телеметрия,
  - е) обслуживание и управление системами,
  - ж) передвижные «кусты»,
  - з) централизованная обработка данных.
- 3) Физические основы землетрясений:
  - а) теоретические исследования,
  - б) эксперименты по исследованию процессов разрушения и течения,
  - в) полевые измерения,
  - г) изучение механизма очага,
  - д) исследования распространения сейсмических волн.
- 4) Инженерная сейсмология:
  - а) сейсмическое районирование,
  - б) механика грунтов и проектирование фундаментов,
  - в) динамика сооружений,
  - г) методы проектирования,
  - д) экономические вопросы.
- 5) Прочие проекты:
  - а) изучение цунами,

- б) тепловой поток,
- в) приливные измерения,
- г) психологические и практические аспекты,
- д) анализ и прогноз,
- е) землетрясения и закачка жидкости.

В табл. 4.2 приведены примерные расходы, которые требовались на реализацию предложенного плана в районе Калифорния—Невада. Общая стоимость всего 10-летнего проекта составляет 137 млн. американских долларов. Можно сказать, что по планируемым затратам программа, предложенная американскими учеными, на порядок превышала японскую программу.

ТАБЛИЦА 4.2

Приблизительная стоимость американского плана в районе Калифорния—Невада [324]

Раздел плана	Стоимость за 10 лет в американских долларах
Группы сейсмометров для изучения микросейсмичности	3 000 000
Разработка и установка других групп приборов (наклонометры, магнитометры, деформографы, гравиметры и метеорологические приборы)	3 050 000
Разработка и установка специальной аппаратуры (лазерные деформографы, оптическая аппаратура для съемок и др.)	9 050 000
Разработка и установка концентрированных групп приборов (включая стоимость бурения)	7 800 000
Установка телеметрической аппаратуры	5 000 000
Проведение наблюдений и административные расходы	2 500 000
Итого	30 400 000

Большое значение придается геофизическим наблюдениям вдоль сейсмических поясов в районах Калифорния—Невада и Аляска—Алеутские о-ва. Была выдвинута идея создания обсерваторий, называемых «кусты» и «сверхкусты». На рис. 4.8 показано оснащение аппаратурой такого сверхкуста. Подобные кусты или сверхкусты будут создаваться в разных местах сейсмических поясов; с их помощью можно надеяться с достаточной

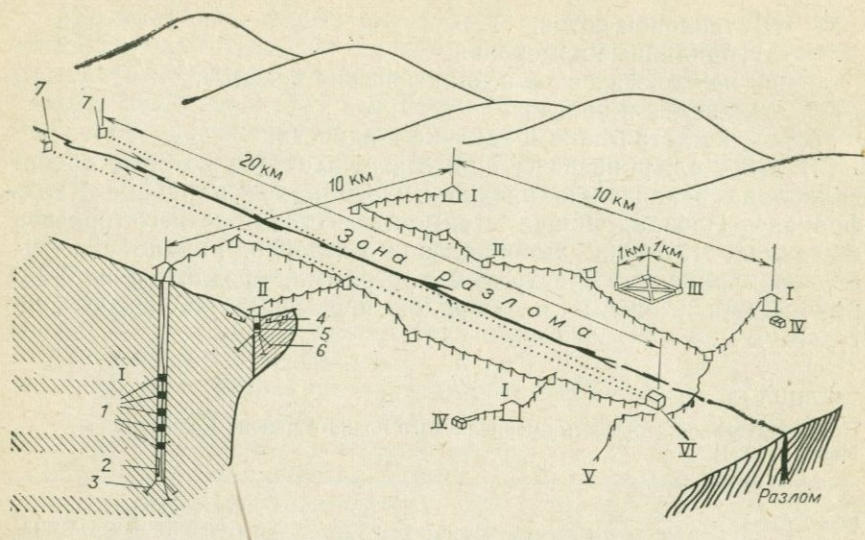


Рис. 4.8. Схематическое изображение сверхкустовой обсерватории [324].  
 I — глубинная скважинная группа из 5 сейсмографов (1), расположенных в 150 м друг от друга, накломера (2) и 3 стрейн-сейсмографов (3); II — станция из 2 накломеров (4), сейсмографа (5) и 3 стрейн-сейсмографов (6); III — лазерный деформограф; IV — гравиметр и магнитометр; V — телефонная линия для передачи кодированных данных в обрабатывающие системы; VI — оптическое устройство для определения расстояний (7 — отражающие зеркала).

чувствительностью зарегистрировать предвестники землетрясений.

В феврале 1966 г. в Роквилле (штат Мэриленд) был проведен симпозиум по предсказанию землетрясений; он был организован Управлением по исследованиям окружающей среды (ESSA). На симпозиуме обсуждался возможный вклад со стороны ESSA в исследования по предсказанию землетрясений [78].

Несмотря на интерес к предсказанию землетрясений как со стороны общественности, так и научных кругов США, 10-летняя программа, по всей видимости из-за финансовых трудностей, не выполнена, но она, несомненно, привлекла интерес к исследованиям по предсказанию землетрясений в США. Поэтому в университетах и правительственных организациях исследования начали проводиться в более широких масштабах. Эти исследования финансировались как NSF, так и из других источников. В результате в некоторых направлениях исследований были достигнуты большие успехи. Так, к началу 70-х годов

была создана сеть станций для регистрации микроземлетрясений в различных частях зоны разлома Сан-Андреас. Несмотря на указанные недостатки, американские исследования по предсказанию землетрясений в некоторых отношениях привели к выдающимся достижениям. В результате некоторые научные направления исследований развиты в США больше, чем в Японии.

10-летняя программа, предложенная Прессом и др. [324], возродилась в сентябре 1973 г., когда были объединены программы сейсмологических исследований Национального управления по океаническим и атмосферным исследованиям (NOAA) и Геологической службы США (USGS). Объединенная программа, названная Программой по уменьшению сейсмической опасности (EHRP) и реализуемая USGS, включает основные направления исследований, финансируемые федеральным правительством, например исследования по инженерной сейсмологии, финансируемые NSF [476]. Ныне в США наряду с другими смежными проектами, например по инженерной сейсмологии, по существу начала действовать единая национальная программа по предсказанию землетрясений.

Эта программа состоит из следующих семи пунктов:

- 1) районирование сейсмической опасности и оценка риска,
- 2) исследования по предсказанию землетрясений и их практическое осуществление,
- 3) контроль над землетрясениями,
- 4) инженерная сейсмология,
- 5) службы сейсмической информации,
- 6) изучение последствий землетрясений,
- 7) проекты по применению и демонстрации результатов.

Название каждого направления работ понятно без дополнительных пояснений. В этой книге рассматриваются в основном второе и третье направления. Данная программа реализуется силами не только USGS, но и университетов, отдельных штатов и частных лиц. Программы исследований, проводимых вне рамок USGS, осуществляются благодаря субсидиям и контрактам; предложения на проведение этих работ представляются на рассмотрение специальной группы крупных ученых, не работающих в USGS.

Цели второго направления (исследований по предсказанию землетрясений и их практическому осуществлению) можно сформулировать в виде двух пунктов [476]:

а) выяснение физического смысла явлений и развитие инструментальных средств, требуемых для предсказания времени, места и магнитуды землетрясений; создание экспериментальных систем предсказания землетрясений в районах с высокой сейсмичностью;

б) изучение исторических и геологических данных для оценки вероятности и повторяемости землетрясений.

Для решения этих задач особое внимание необходимо обратить на следующие виды исследований:

а) создание телеметрических систем для регистрации микроземлетрясений с целью получить данные о физических свойствах и упругом режиме земной коры, а также выявить изменения скоростей сейсмических волн;

б) установка наклономеров с телеметрической регистрацией как медленных деформаций, так и быстрых вариаций-предвестников;

в) геодезические работы по регистрации деформаций земной коры поперек зон активных разломов;

г) измерения крипа в зонах разломов;

д) пристальное изучение активных разломов путем составления специальных геологических карт;

е) лабораторные исследования физических свойств горных пород в условиях, близких к реальным условиям земной коры;

ж) математическое моделирование на ЭВМ деформирования и образования разломов для моделей реальной Земли;

з) корреляция микроземлетрясений, закономерностей распределения деформаций и их вариаций и т. п. с целью выявления распространения деформаций и процессов проскальзывания по разлому;

и) применение сейсмических передвижных сетей для изучения строения земной коры, регистрации афтершоков и т. д.;

к) использование геотермического каротажа для выяснения изменений температуры с глубиной;

л) анализ геологических и тектонических характеристик среды в районах высокой сейсмичности;

м) глубокое разведочное бурение для проведения прямых инструментальных наблюдений в недрах зон разломов;

н) анализ геологических данных об активных разломах;

о) опробование методов прогноза землетрясений, разработанных в Японии, СССР, Китае и других странах;

п) изучение глобальных плит и их связи с возникновением землетрясений.

Укажем виды исследований, которые находятся в стадии опробования (и их необходимо всемерно развивать):

а) измерение напряжений непосредственно в массивах горных пород;

б) деформационные измерения с малой базой на небольших глубинах;

в) многолучевая лазерная аппаратура для высокоточного измерения расстояний;

г) широкополосные сейсмографы;

д) приборы для регистрации уровня воды и объемные деформографы;

е) стабильные высокочувствительные магнитометры для поиска магнитных предвестников;

ж) наблюдение за химическим составом вод в связи с геохимическими предвестниками.

Перечисленные темы EHRP включают почти все вопросы, которые были изложены в программе Пресса и др. [324]. Во многих отношениях они сходны с аналогичными японскими направлениями исследований, хотя особое внимание здесь обращается на изучение сейсмичности, движений земной коры, геомагнитные и геоэлектрические изменения в зоне разлома Сан-Андреас в Калифорнии.

Интересно отметить развитие в США способов прогноза землетрясений с помощью распознавания образов. Ведутся также исследования по изучению таких возможных предвестников, как содержание радона и гелия. Наряду с исследованиями в Калифорнии и Неваде работы по предсказанию землетрясений проводятся на Алеутских о-вах, разрабатывается методика предсказания землетрясений, происходящих в области островных дуг. Исследованиями по предсказанию землетрясений занимаются в штатах Юта, Монтана, Миссури и др., хотя эти районы не столь высоко сейсмичны, как Калифорния и Невада.

По сведениям автора, в 1974 г. на программу EHRP было выделено 19,4 млн. долларов, в том числе 8,7 — USGS, 8,0 — NSF, 1,4 — NOAA, 0,6 — Комиссии по атомной энергии (АЕС) и 0,7 млн. долларов — Министерству жилищного строительства и развития городов (HUD). Примерно 2,1 млн. долларов будет израсходовано из бюджета USGS на финансирование работ ученых университетов и других научных работников посредством предоставления им субсидий и заключения с ними контрактов.

Бюджет USGS по этому разделу составлял в 1972 и 1973 гг. соответственно 1,7 и 4,7 млн. долларов, в то время как бюджет NSF за те же годы равнялся соответственно 2,9 и 4,8 млн. долларов. Таким образом, в США исследования по уменьшению сейсмической опасности значительно возросли.

В США обращается большое внимание на усиление международного сотрудничества по вопросам предсказания землетрясений. В последнем разделе этой главы освещаются некоторые стороны американо-японского сотрудничества. В качестве одного из пунктов соглашения между СССР и США об охране окружающей среды, которое было заключено в результате визита президента США в Москву в мае 1972 г., была намечена совместная программа исследований по прогнозу землетрясений. Реализация этой программы возложена на Институт

физики Земли АН СССР и USGS. В 1973 г. был произведен обмен рабочими группами. Американские сейсмологи планировали провести некоторое время в Гарме с тем, чтобы ознакомиться с проводимыми там работами по прогнозу землетрясений.

В 1974 г. в США побывала делегация КНР, состоявшая из 10 сейсмологов; ответный визит американской делегации в Китай, запланированный Национальной академией наук, был осуществлен несколько позже в том же году.

#### 4.5. СОВЕТСКАЯ ПРОГРАММА

Автор, не знающий русского языка, не знаком с публикациями о национальной программе по предсказанию землетрясений в СССР, за исключением доклада Е. Ф. Саваренского [384]. Данный раздел является кратким обзором исследований по прогнозу землетрясений, проводимых в СССР, и составлен на основе частичной информации, полученной автором из его личных контактов с советскими коллегами.

Впервые западные исследователи познакомились с достижениями советских ученых в области предсказания землетрясений по обзору Саваренского [383] на симпозиуме по предсказанию землетрясений (Цюрих, 1967 г.). Он же сделал сообщения о советских исследованиях по этой проблеме и на симпозиуме в Мадриде в 1969 г., и на симпозиуме по предсказанию землетрясений, проходившем в Лиме [384].

В СССР работы по предсказанию землетрясений сосредоточены в Средней Азии и Курило-Камчатской зоне. Сейсмичность первой из этих зон связана с тектоническими процессами в горах Тянь-Шаня и Памира. Такие крупные города, как Алма-Ата, Фрунзе, Душанбе, Ашхабад и Ташкент, находятся под угрозой разрушительных землетрясений.

Исследования в Средней Азии проводятся Институтом физики Земли Академии наук СССР и институтами Академий наук Казахской, Киргизской, Узбекской, Таджикской и Туркменской ССР. Здесь с целью обнаружения возможных предвестников землетрясений большая работа была проведена под руководством И. Л. Нерсесова по изучению изменений отношения скорости продольных волн ( $V_p$ ) к скорости поперечных волн ( $V_s$ ), вариаций механизмов очагов, электросопротивления и т. д. Также ведутся геодезические работы, наблюдения за деформациями и за содержанием радона в подземных водах. Как будет видно далее, некоторые из этих наблюдений были успешно использованы при выявлении предвестников. На основе проведенных наблюдений предпринимаются попытки прогнозировать землетрясения.

Когда на симпозиуме в Цюрихе в 1967 г. Е. Ф. Саваренский говорил об изменениях отношения  $V_p/V_s$  как о предвестнике землетрясения, автор (как, возможно, и большая часть аудитории) просто не мог в это поверить. Если эти вариации пересчитать в соответствующее изменение упругих свойств земной коры, то для объяснения результатов наблюдений необходимо допустить их изменение примерно на 30%. После Генеральной ассамблеи Международного геодезического и геофизического союза в Москве в 1971 г. группа американских и японских сейсмологов имела возможность посетить Гарм в Таджикской ССР. Американские сейсмологи, интересовавшиеся работами, проводимыми там по изучению отношения  $V_p/V_s$ , рассказали об аналогичных наблюдениях в США. Они также обнаружили значительные вариации отношения скоростей перед местными землетрясениями. Советскими исследователями, работающими в Средней Азии, впервые были обнаружены также изменения механизмов очагов, электросопротивления и содержания радона в подземных водах. Как будет видно в одной из последующих глав, эти данные играют важную роль в развитии теории дилатансии.

С. А. Федотов возглавляет исследования по предсказанию землетрясений в Курило-Камчатской зоне. Будучи островной дугой, эта зона подвержена сильным землетрясениям, аналогично Аляско-Алеутской и Японской дугам. По-видимому, выявление статистических закономерностей для сильных землетрясений можно также использовать и для прогноза землетрясений. Были организованы наблюдения теллурических токов, изучены изменения отношения  $V_p/V_s$  по записям сейсмических волн от взрывов и т. п.

#### 4.6. ПРОГРАММЫ ДРУГИХ СТРАН

Несмотря на огромную сейсмическую опасность, в развивающихся странах исследованиям по предсказанию землетрясений не уделялось большого внимания. Возможно, это объясняется финансовыми трудностями и отсутствием квалифицированных специалистов. В большинстве латиноамериканских стран еще только создаются сети сейсмических станций для изучения сейсмичности этих районов. То же самое относится к странам Ближнего Востока, Юго-Восточной Азии и т. д. Поэтому в таких странах не могло быть и речи о разработанных программах по предсказанию землетрясений. Разумеется, для развития подобных исследований в развивающихся странах потребуются значительные средства из международных источников.

По сведениям автора, в КНР осуществляется большая программа по предсказанию землетрясений, но автору не удалось побывать в современном Китае. Ниже дается краткий обзор по работам [39, 63, 226, 487], а также приводятся те сведения, которые удалось почерпнуть из бесед с членами китайской сейсмологической делегации во главе с Ку Кунь-су, которая посетила США в 1974 г. Многие автор узнал также от проф. Кисслингера, посетившего Китай в 1974 г. в составе делегации американских сейсмологов.

Как описывается в [63], китайская программа работ по предсказанию землетрясений была создана вскоре после поездки премьер-министра КНР Чжоу Энь-ляя в Синтай, провинция Хэбэй, в 300 км к юго-западу от Пекина, где 8 марта 1966 г. произошло разрушительное землетрясение с магнитудой  $M=6,8$ . Эта программа осуществляется тремя институтами Китайской академии наук: Институтом геофизики, Институтом геологии и Институтом инженерной механики в Харбине; в ее реализации принимает участие также Пекинский университет.

Китай — страна с древней историей, что позволило составить весьма полный хронологический каталог землетрясений объемом в 1653 страницы [226] (автор пока еще не имел возможности с ним ознакомиться). За свою долгую историю Китай много раз подвергался сильным землетрясениям. Согласно Болту [39], за период с 1303 по 1951 г. в Китае произошло 16 землетрясений с  $M \geq 8$ . Известно, что в 1556 г. во время землетрясения в Шэньси, близ Сианя, погибло более 800 тысяч человек (часть из них жила в лёссовых пещерах). Следующим по числу жертв было землетрясение, происшедшее в провинции Ганьсу в 1920 г.; во время этого землетрясения погибло 180 тысяч человек. Китайские сейсмологи провели статистический анализ исторических данных. Применение статистики экстремальных значений иногда позволяло успешно предсказать сильное землетрясение (см. § 15.1.3).

Интересно отметить, что такая сейсмически активная зона Китая, как Тайюань — Сиань — зона, расположенная к юго-западу от Пекина, характеризовалась относительным покоем на протяжении нескольких сотен лет. За ним последовал менее продолжительный период высокой активности.

В некоторых зонах разломов, таких, как разлом Па-Пао-Шань вблизи Пекина, проводятся триангуляция и нивелирование [39]. На станции Хуншань, в 40 км от эпицентра Синтайского землетрясения 1966 г., ведутся наблюдения с наклономером [63]. В Пекинской обсерватории установлены металлические и кварцевые наклонометры маятникового типа [39].

Сейсмометрические наблюдения проводятся на 17 национальных обсерваториях. Институт геофизики располагает теле-

метрической сетью из восьми сейсмических станций в окрестностях Пекина. С целью выявления возможных предвестников землетрясений проводились геомагнитные и геоэлектрические наблюдения. На станции Хуншань большое внимание уделяется предсказанию землетрясений с помощью геомагнитных методов (см. § 10.6.3). Предполагается также, что для прогноза землетрясений можно использовать наблюдения уровня воды во многих колодцах в районе станции Хуншань (см. § 12.2). Исследования по прогнозированию землетрясений включают также изучение вариаций скоростей сейсмических волн (см. § 9.1.4).

Время от времени на станции Хуншань удавались попытки прогноза времени возникновения и магнитуды землетрясений [63].

#### 4.7. МЕЖДУНАРОДНАЯ КОМИССИЯ ПО ПРЕДСКАЗАНИЮ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

Ввиду быстро растущего интереса к проблеме прогноза землетрясений в 1967 г. в Цюрихе во время 14-й Генеральной ассамблеи IUGG был проведен международный симпозиум по этой теме. После общей дискуссии, касавшейся программ исследований по предсказанию землетрясений в нескольких странах, был дан обзор [338] перспективных направлений исследований.

После симпозиума были названы члены рабочей группы по предсказанию землетрясений. Эта группа, входящая в состав Международной ассоциации по сейсмологии и физике земных недр (IASPEI), призвана осуществлять международную координацию исследований по предсказанию землетрясений. Первоначально рабочая группа состояла из 13 членов, представляющих разные страны (Япония — 3, СССР — 3, США — 2, Чили — 1, Новая Зеландия — 1, Турция — 1, Великобритания — 1, Югославия — 1) и различные организации, входящие в состав IUGG, — такие, как Международная ассоциация по геодезии (IAG), Международная ассоциация по геомагнетизму и аэронауке (IAGA), Международная ассоциация по вулканологии и химии земных недр (IAVCEI) и Комитет по верхней мантии (UMC). Председателем рабочей группы был назначен проф. Т. Хагивара, секретарем — Т. Рикитакэ.

В 1969 г. рабочая группа провела симпозиум по механизму землетрясений [344] на Генеральной ассамблее IAGA и IASPEI в Мадриде; в Москве в 1971 г. во время Генеральной ассамблеи IUGG рабочей группой был также организован симпозиум по предвестникам сильных землетрясений [385].

На ассамблее в Москве рабочая группа была переименована в Международную комиссию по предсказанию землетрясений (ICER) и новым председателем был избран проф. Саваренский.

Во время Генеральной ассамблеи IASPEI в Лиме в 1973 г. ICER провела симпозиум по процессам в очаге и предсказанию землетрясений [350].

Комиссия по предсказанию землетрясений приняла следующие рекомендации:

1. Комиссия должна собрать информацию о национальных программах по предсказанию землетрясений и подготовить проект международных рекомендаций о наиболее эффективных методах поисков предвестников сильных землетрясений; до обсуждения этого проекта на симпозиуме в Ташкенте в 1974 г. разослать его заинтересованным организациям и лицам.

2. Окончательный вариант рекомендаций подготовить для обсуждения и принятия на заседании Комиссии в Гренобле в 1975 г.

3. Одобрить проведение запланированного симпозиума Комиссии в Ташкенте в 1974 г., а также предложение пригласить Европейскую сейсмологическую комиссию для участия в симпозиуме; программа Ташкентского симпозиума должна включать в основном заказные научные сообщения.

4. Просить IASPEI организовать в Гренобле в 1975 г. международный симпозиум по различным геофизическим явлениям, которые предшествуют или сопутствуют сильным землетрясениям, а также по опасным геологическим последствиям таких землетрясений.

5. Просить региональные и национальные организации (такие, как CERESIS в Южной Америке и ESC в Европе) помочь в сборе информации для кооперированных и национальных программ поисков предвестников землетрясений.

6. Просить Комиссию установить тесные контакты при составлении программ по предсказанию землетрясений с двухсторонними и многосторонними рабочими группами и с другими специальными национальными и международными комитетами (например, с международной комиссией по геодинамике), интересы которых в значительной степени связаны с землетрясениями или порождающими их процессами.

7. Обратить особое внимание на необходимость расширения Комиссии путем введения в ее состав (заседание в Гренобле) представителей основных сейсмоактивных зон мира.

8. Выразить благодарность проф. Ленсену за его письмо и сообщение о результатах изучения деформаций земной коры в Новой Зеландии, которые тесно связаны с поисками предвестников землетрясений.

На заседании Комиссии в Москве в 1971 г. было решено проводить симпозиумы в местах, где происходили сильные землетрясения; отчасти поэтому вслед за Лимой был выбран Ташкент.

Как можно видеть из первого пункта рекомендаций, ICER уделяет большое внимание составлению международных рекомендаций по наиболее эффективным методам поиска предвестников сильных землетрясений. Эти рекомендации приняты на заседании Комиссии в Гренобле во время 16-й Генеральной ассамблеи IUGG.

## ДЕФОРМАЦИИ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ ПО ГЕОДЕЗИЧЕСКИМ ДАННЫМ

### 5.1. ИСТОРИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ О ДЕФОРМАЦИЯХ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ

Давно замечено, что сильные землетрясения часто сопровождаются деформациями земной поверхности. В Японии существует много исторических документов, описывающих деформации при сильных землетрясениях. Приведем некоторые примеры таких сообщений, взятые из наиболее древних источников.

При землетрясении ( $M=6,7$ ) на севере о. Кюсю в 679 г. н. э. в земле появилась трещина шириной 6 м и длиной 10 км. По-видимому, это самое древнее японское сообщение об образовании трещины при землетрясении. Землетрясение 684 г., сопровождавшееся цунами, вероятно, было одним из сильнейших, происходивших когда-либо вблизи тихоокеанского побережья юго-западной Японии, поскольку его магнитуда оценивалась примерно величиной 8,4. На юге о. Сикоку участок земной поверхности площадью 12 км<sup>2</sup> опустился ниже уровня моря. При землетрясении 701 г. ( $M=7,0$ ) в северной части префектуры Киото целый остров площадью 2,4×4 км<sup>2</sup> погрузился в море, так что над поверхностью воды осталась лишь его самая верхняя часть.

Во многих странах имеется большое число подобных сообщений о деформациях земной поверхности при сильных землетрясениях. Однако эти исторические свидетельства трудно проверить с количественной стороны, и поэтому большую часть их нельзя использовать для научных целей. Для этого пригодны лишь деформации земной поверхности, зарегистрированные геодезическими методами.

### 5.2. МЕТОД ТРИАНГУЛЯЦИИ

Территория многих стран покрыта триангуляционными сетями, необходимыми для создания топографических карт. Триангуляция заключается в очень точном определении положения отдельных пунктов с целью картирования. Сам принцип триангуляции прост, хотя применение его на практике требует больших затрат труда.

Прежде всего тщательно измеряется длина базиса, проложенного на ровном участке земли. Такие измерения проводились с помощью инварной проволоки длиной 25 м. В Японии длина базиса обычно составляла 3—4 км. Инварную проволоку необходимо регулярно калибровать при помощи пятиметрового стандартного мерного жезла, который в свою очередь проверяется посредством сравнения с национальным стандартным метром. Однако в последнее время калибровку все чаще проводят электрооптическим методом, используя способ, описанный в § 5.4.

Возьмем теперь некоторую точку  $P$  и будем наблюдать ее с двух концов базиса,  $A$  и  $B$ . Если мы можем измерить углы между базисом и прямыми, соединяющими точку  $P$  с  $A$  и  $B$ , то размеры треугольника, образованного этими тремя точками, будут определены и тем самым зафиксируется положение точки  $P$  относительно базиса  $AB$ . Беря теперь отрезок  $PA$  в качестве исходного и повторяя вышеописанную операцию, образуем новый треугольник  $QPA$ , из которого можно определить положение точки  $Q$ . Повторение этих операций приводит к определению

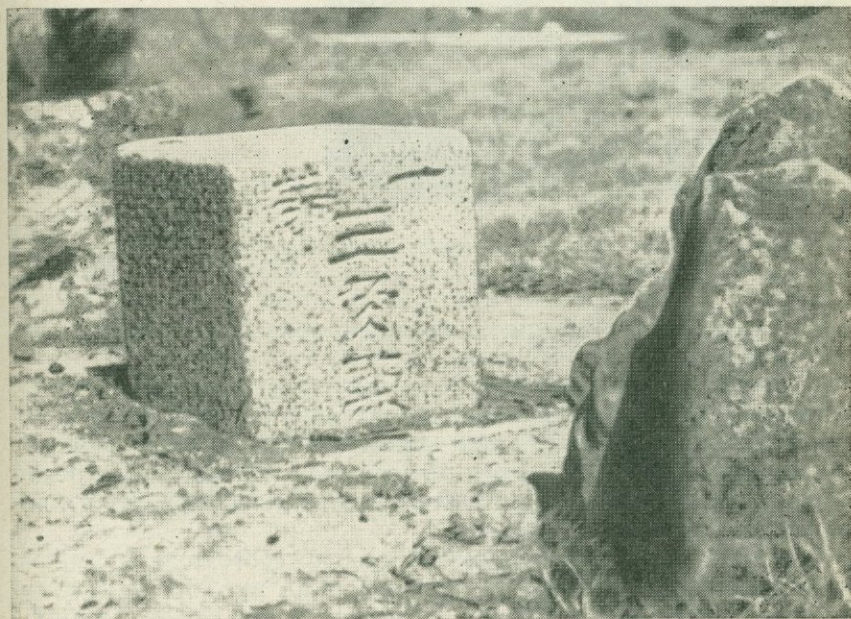


Рис. 5.1. Гранитный блок пункта триангуляции I класса на геодезической обсерватории Канодзан в нескольких десятках километров к юго-востоку от Токио.

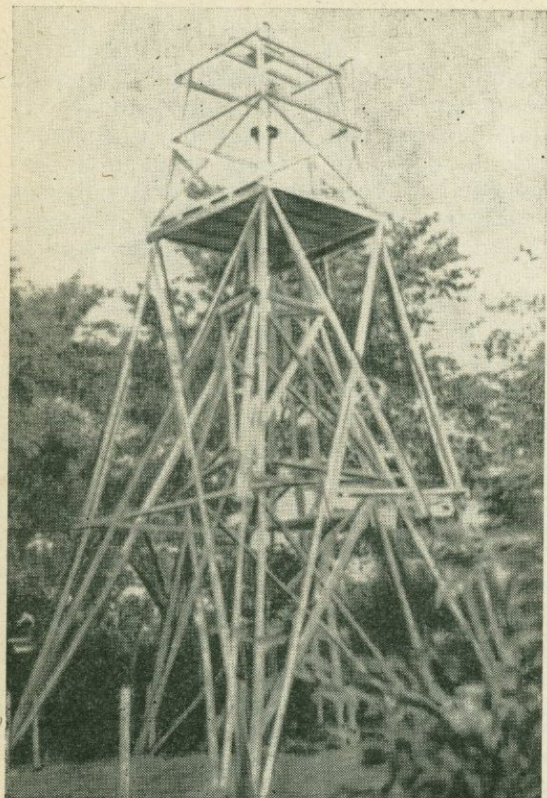


Рис. 5.2. Временная вышка для триангуляционной съемки.

линии длиной 40—50 км, положение конечных точек которой установлено.

Такая линия называется базисом триангуляции I класса, а конечные точки — пунктами триангуляции I класса. Все остальные пункты триангуляции затем относят к этим базисам. Развитие электрооптического метода для прямого измерения длины базиса триангуляции I класса позволило построить в Японии около 60 базисов.

Японская сеть триангуляции I класса, состоящая примерно из 300 пунктов, показана на рис. 4.2, а на рис. 5.1 изображен японский пункт триангуляции I класса. В нем обычно используют гранитный блок размером  $20 \times 20 \times 100$  см. Другой камень с маркой закапывают непосредственно под первым, чтобы в случае утраты гранитного блока можно было найти пункт. Во

время проведения геодезических работ над опознавательным блоком сооружают временную вышку (рис. 5.2).

Триангуляционные работы столь трудоемки и дороги, что японская сеть I класса была закончена лишь в 1915 г., через 32 года после начала работ. Второй этап работ продолжался с 1949 по 1967 г. На практике требуются очень сложные вычисления для уравнивания ошибок, которые всегда имеются в результате измерений.

Автору мало известны геодезические работы, проводимые за пределами Японии, но можно полагать, что какой-либо принципиальной разницы между геодезическими работами в Японии и в других странах нет. Для получения подробных карт проводятся триангуляции II, III и т. д. классов, которые менее точны, чем триангуляция I класса. Они используются также для выявления деформаций земной поверхности при землетрясениях.

### 5.3. ИЗМЕРЕНИЯ ДЕФОРМАЦИИ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ С ПОМОЩЬЮ ТРИАНГУЛЯЦИИ

После того как произошло сильное землетрясение, необходимо провести триангуляционную съемку данного района, с тем чтобы определить положение пунктов триангуляции. В Японии в результате работ Военной геодезической службы [144] и ее преемника GSI часто удавалось обнаружить значительные смещения точек земной поверхности, связанные с сильными землетрясениями. Это следовало из сравнения триангуляций района, испытавшего сотрясение, до и после землетрясения. Вероятно, самым первым примером деформации земной поверхности, обнаруженной таким путем, является Нобийское землетрясение 1891 г. [377]. Здесь было отчетливо обнаружено движение по разрыву, хотя геодезические работы, проводившиеся перед этим землетрясением к северу от разлома Неодани (см. § 3.2; «Неодани» означает «долина Нео»), не были закончены.

Иногда из результатов триангуляции бывает нужно вычислить двумерные деформации в горизонтальной плоскости. Направим оси  $x$  и  $y$  соответственно на восток и на север и обозначим смещение пункта триангуляции по этим направлениям через  $u$  и  $v$ . Тогда деформации объемного расширения, вращения и сдвига будут соответственно равны

$$\Delta = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y}, \quad (5.1)$$

$$\omega = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u}{\partial y} - \frac{\partial v}{\partial x} \right), \quad (5.2)$$

$$\sigma = \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x}. \quad (5.3)$$

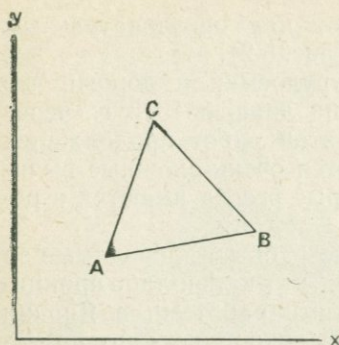


Рис. 5.3. Треугольник для определения горизонтальных деформаций.

Максимальное значение деформации сдвига равно

$$\varepsilon = \left[ \left( \frac{\partial u}{\partial x} - \frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 + \left( \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 \right]^{1/2}. \quad (5.4)$$

Изложим предложенный Терадой и Миябе [446] способ вычисления этих деформаций по данным измерений. Для этого рассмотрим треугольник  $ABC$  (рис. 5.3). Координаты точек  $A$ ,  $B$  и  $C$  обозначим соответственно  $(x_1, y_1)$ ,  $(x_2, y_2)$  и  $(x_3, y_3)$ , а компоненты смещения  $(u_1, v_1)$ ,  $(u_2, v_2)$  и  $(u_3, v_3)$ . Предположим, что смещения линейно зависят от координат:

$$\begin{aligned} u &= ax + by + c, \\ v &= a'x + b'y + c'. \end{aligned} \quad (5.5)$$

Мы видим, что у нас имеется шесть линейных уравнений для  $u_1, u_2, u_3, v_1, v_2, v_3$ , аналогичных уравнениям (5.5). Решая их относительно  $a, b, c, a', b', c'$ , получим

$$\begin{aligned} a &= \frac{(y_3 - y_1)(u_2 - u_1) - (y_2 - y_1)(u_3 - u_1)}{(x_2 - x_1)(y_3 - y_1) - (x_3 - x_1)(y_2 - y_1)}, \\ b &= \frac{(x_2 - x_1)(u_3 - u_1) - (x_3 - x_1)(u_2 - u_1)}{(x_2 - x_1)(y_3 - y_1) - (x_3 - x_1)(y_2 - y_1)}, \\ a' &= \frac{(y_3 - y_1)(v_2 - v_1) - (y_2 - y_1)(v_3 - v_1)}{(x_2 - x_1)(y_3 - y_1) - (x_3 - x_1)(y_2 - y_1)}, \\ b' &= \frac{(x_2 - x_1)(v_3 - v_1) - (x_3 - x_1)(v_2 - v_1)}{(x_2 - x_1)(y_3 - y_1) - (x_3 - x_1)(y_2 - y_1)}. \end{aligned} \quad (5.6)$$

Используя уравнения (5.1) — (5.4) и (5.6), приходим к следующему результату:

$$\begin{aligned} \Delta &= a + b', & \omega &= \frac{1}{2}(b - a'), \\ \sigma &= b + a', & \varepsilon &= [(b + a')^2 + (a - b')^2]^{1/2}. \end{aligned} \quad (5.7)$$

Эти выражения рассматриваются как значения соответствующих деформаций в геометрическом центре треугольника.

Для большего числа пунктов триангуляции Цубои [449] предложил более простой способ вычисления двумерных деформаций. Таким же образом, как описано выше, легко получить главные деформации  $\varepsilon_1$  и  $\varepsilon_2$  и их направления  $\theta_1$  и  $\theta_2$ , если воспользоваться формулами

$$\left. \varepsilon_1 \right\} = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \left[ \left( \frac{\partial u}{\partial x} - \frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 + \left( \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right)^2 \right]^{1/2}, \quad (5.8)$$

$$\left. \begin{aligned} \operatorname{tg} \theta_1 \\ \operatorname{tg} \theta_2 \end{aligned} \right\} = \frac{\frac{\partial v}{\partial y} - \frac{\partial u}{\partial x} + \left[ \left( \frac{\partial u}{\partial x} - \frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 + \left( \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right)^2 \right]^{1/2}}{\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x}}. \quad (5.9)$$

Цубои собрал воедино ранние результаты измерения деформаций земной коры методом триангуляций [449] и показал, что деформации, связанные с землетрясениями, не превышают  $10^{-4}$ , если не считать деформаций в зонах разломов. После этого проведены другие аналогичные работы, главным образом в Японии и США; таким образом, за последние десятилетия накоплен определенный наблюдательный материал о деформациях земной коры при землетрясениях. На этих данных основаны наши знания о механизме очага, предельных деформациях земной коры и др.

Однако следует иметь в виду, что для вычисления смещений пунктов триангуляции приходится вводить некоторые допущения. Так, обычно предполагают, что две или более станции вдали от эпицентральной зоны не сдвигаются с места. Вместо этого предположения можно было бы сделать какие-либо другие. Из-за этих предположений сравнение результатов двух триангуляций не позволяет получить величины абсолютных смещений. Тем не менее, сделав какое-то физически приемлемое допущение, вполне можно получить значимые данные о смещениях.

### 5.3.1. Землетрясение в Канто

Землетрясение 1923 г. в Канто было кратко описано в § 3.3. Муро [268] сравнил результаты двух триангуляций, проведенных в 1891 и 1925 гг., и получил смещения пунктов триангуляции, показанные на рис. 5.4. По всей видимости, землетрясение произошло из-за движения по разрыву вдоль подводного каньона (рва Сагами), который проходит через залив Сагами в направлении СЗ—ЮВ между о. Осима и п-овом Босо (см. рис. 5.31). Плоскость разрыва длиной 130 км и шириной

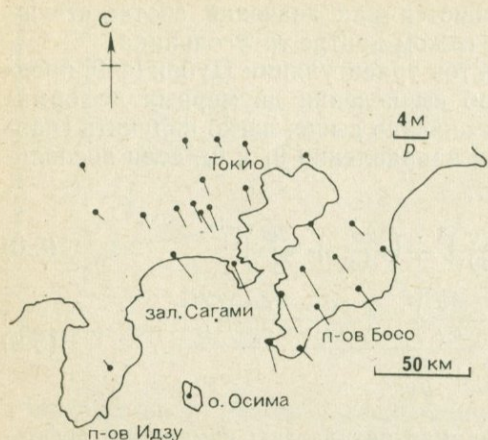


Рис. 5.4. Горизонтальные смещения  $D$  пунктов триангуляции I класса при землетрясении 1923 г. в Канто [268].

65 км погружается в северо-восточном направлении под углом  $30^\circ$ . Согласно работам [20, 22], смещения параллельно и перпендикулярно простиранию составляют соответственно 6 и 3 м. Анализ сейсмических данных подтверждает эту интерпретацию [194, 199].

В работе [378] были вновь рассмотрены геодезические данные, относящиеся к землетрясению в Канто; там приводится график, показывающий среднее уменьшение горизонтального смещения, параллельного подводному разлому, в зависимости от расстояния до него. Непосредственно вблизи разлома получено относительное уменьшение, достигающее  $7,5 \cdot 10^{-5}$ .

Цубои [449], анализируя результаты триангуляции III класса, вычислил двумерные деформации для этого землетрясения.

### 5.3.2. Землетрясение в Танго

7 марта 1927 г. в северной части префектуры Киото в Японии произошло землетрясение с магнитудой 7,5. После него появились два хорошо выраженных разлома Гомура и Ямада, показанных на рис. 5.5. На этом же рисунке нанесены смещения пунктов триангуляции, полученные из съемок 1884—1888 и 1927 гг. [448, 449].

На рис. 5.5 показан один из самых ярких примеров движений земной коры, связанных с землетрясениями. Их анализировали многими различными способами. Согласно Касахаре [202], данные триангуляции соответствуют вертикальному левосто-

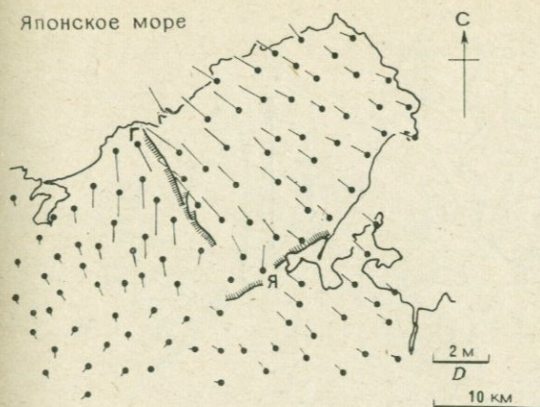


Рис. 5.5. Горизонтальные смещения пунктов триангуляции III класса при землетрясении 1927 г. в Танго [449]. Показаны также два разлома: Г (Гомура) и Я (Ямада).

ронному разрыву с размерами 30 км (длина) на 15 км (ширина по вертикали) и с поверхностным разрывным смещением, равным 3 м. Эту модель он получил по данным об уменьшении величины горизонтального смещения при удалении от разлома (рис. 5.6). Используя теорию дислокаций, Чиннери [62] получил усовершенствованную модель этого разрыва.

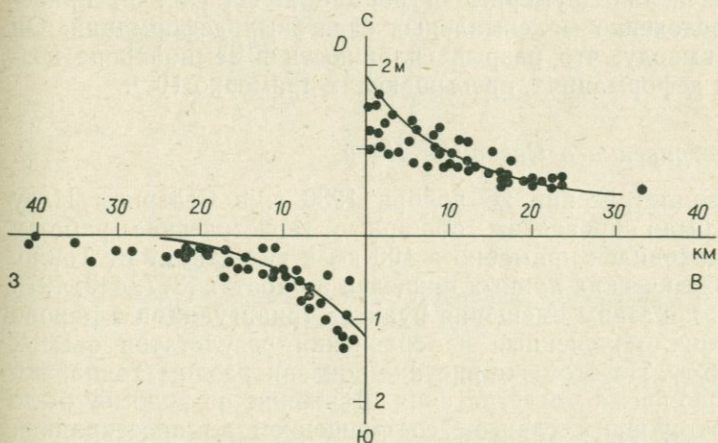


Рис. 5.6. Уменьшение горизонтальных смещений, параллельных разлому Гомура, по мере удаления от него [195].

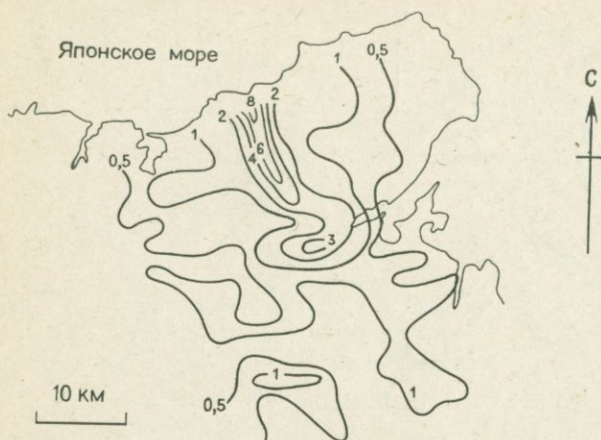


Рис. 5.7. Максимальные сдвиговые деформации (в единицах  $10^{-4}$ ) при землетрясении 1927 г. в Танго [448, 449].

При анализе сейсмограммы землетрясения в Танго, записанной в Токио, Канамори [195] пришел к выводу, что разлом, имеющий приведенные выше размеры, хорошо согласуется с сейсмическими наблюдениями, а именно со значениями сейсмического момента и сброшенного напряжения, оценки которых соответственно равны  $4,6 \cdot 10^{26}$  дин·см и 100 бар.

Цубои [448, 449] по данным триангуляции, показанным на рис. 5.5, вычислил двумерные деформации. На рис. 5.7 приведено распределение максимальных сдвиговых деформаций. Он пришел к выводу, что разрыв сплошности в земной коре возникает при деформациях, превышающих примерно  $10^{-4}$ .

### 5.3.3. Землетрясение в Северном Идзу

После землетрясения 26 ноября 1930 г. в Северном Идзу ( $M=7,0$ ) были проведены обширные геодезические работы. Эпицентр находился примерно в 100 км к юго-западу от Токио. Анализ геодезических данных приведен в работах [377, 449, 497]. На рис. 5.8 показаны смещения пунктов триангуляции в районе землетрясения, полученные из сравнения результатов съемок 1933 и 1925 гг. На этом же рисунке показан разлом Танна, появившийся во время землетрясения. Движение по разрыву было почти левосторонним сдвигом со смещением по простиранию, достигавшим 2—3 м.

Уменьшение горизонтального смещения, параллельного простиранию разлома, оценивалось в работах [62, 202], причем

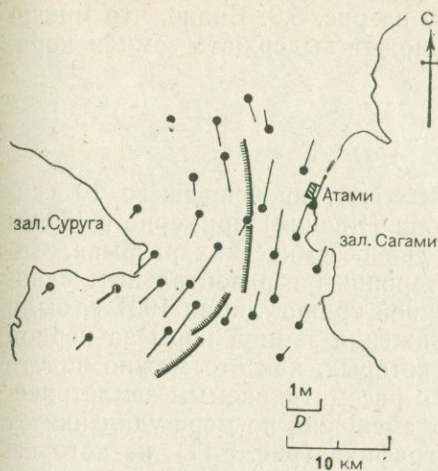


Рис. 5.8. Горизонтальные смещения пунктов триангуляции II и III классов при землетрясении 1930 г. в Северном Идзу [377]. Жирными линиями показаны следы на поверхности разлома Танна, возникшего при землетрясении.

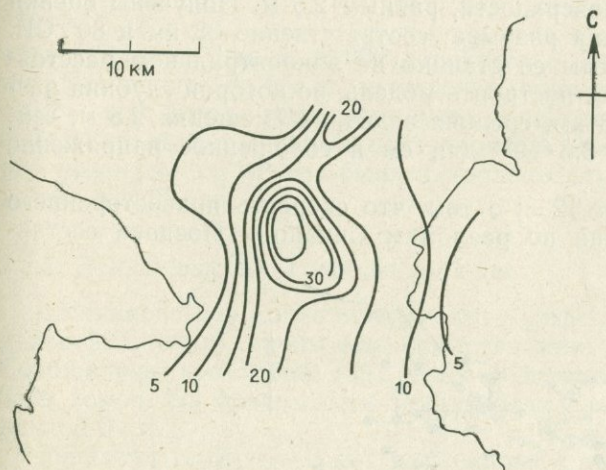


Рис. 5.9. Максимальные сдвиговые деформации (в единицах  $10^{-5}$ ) при землетрясении 1930 г. в Северном Идзу [449].

среднее убывание в непосредственной близости от разлома оказалось равным  $4,0 \cdot 10^{-5}$  \*).

Из геодезических данных Цубои [449] вычислил двумерные деформации. Соответствующее распределение максимальных

\*) Речь идет о деформации сдвига.—Прим. ред.

сдвиговых деформаций показано на рис. 5.9. Видно, что максимальные деформации, которые может выдержать земная кора, составляют около  $10^{-4}$ .

#### 5.3.4. Землетрясение в Тоттори

Во время землетрясения ( $M=7,4$ ), происшедшего 10 сентября 1943 г. в префектуре Тоттори (Япония) примерно в 150 км к западу от Киото, появились два сейсмических разрыва, Сикано и Йоснока, оба с правосторонним горизонтальным сдвигом, равным 2—3 м. При повторной триангуляции 1957 г. были обнаружены горизонтальные движения земной коры за период 1891—1957 гг., большую часть которых, как это можно видеть из рис. 5.10, следует связывать с рассматриваемым землетрясением. Убывание горизонтальных смещений по мере удаления от разрыва можно определить из графика (рис. 5.11), на котором отложены абсолютные величины смещений по обе стороны от разрыва.

Согласно Канамори [195], триангуляционные данные могут соответствовать почти вертикальному правостороннему разрыву со смещением на поверхности, равным 2,5 м. Получены оценки длины и простирания разрыва: соответственно 33 км и  $80^\circ$  СВ. Анализ сейсмограммы со станции на эпицентральной расстоянии 140 км позволил построить модель, по которой глубина разрыва составляет 13 км, средняя величина смещения 2,5 м, сейсмический момент  $3,6 \cdot 10^{26}$  дин·см и сброшенное напряжение 83 бар.

Имеются данные [233] о том, что скорость правостороннего сдвигового смещения по разломам Сикано и Йоснока состав-

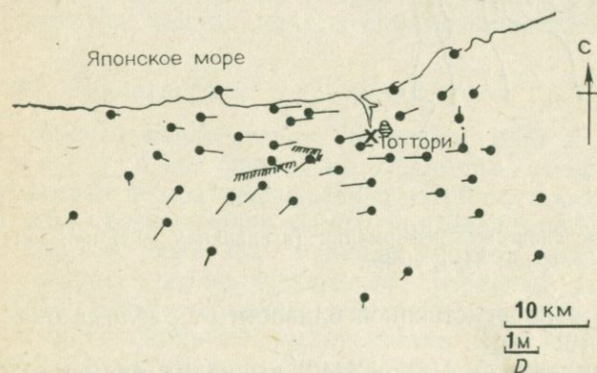


Рис. 5.10. Горизонтальные смещения пунктов триангуляции I, II и III классов при землетрясении 1943 г. в Тоттори. Крестиком отмечен эпицентр [192]. Показаны также два разлома.

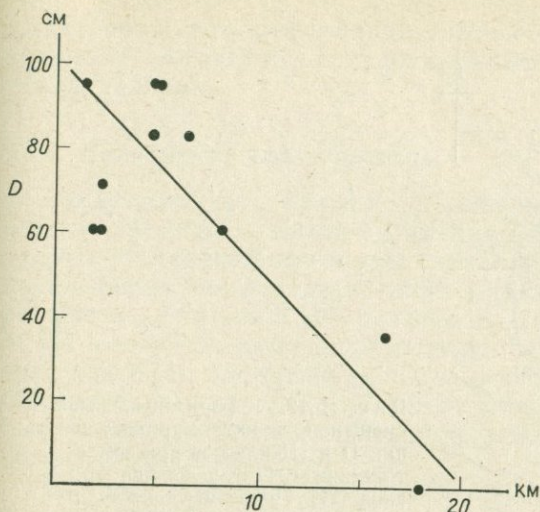


Рис. 5.11. Уменьшение горизонтальных смещений, параллельных разрыву, по мере удаления от него для землетрясения в Тоттори [353].

ляет примерно 3 м за 10 000 лет. Однако нет никаких данных, которые указывали бы на значительные смещения за несколько тысяч лет перед землетрясением. Возможно, землетрясение в Тоттори является внезапным разрывом земной коры, в которой примерно за  $10^4$  лет были накоплены тектонические напряжения до 100 бар.

### 5.3.5. Землетрясение в заливе Микава

12 января 1945 г. в заливе Микава (префектура Айти в Центральной Японии) произошло землетрясение с магнитудой 7,1. Сообщалось, что погиб 1961 человек и полностью разрушено 5539 домов. На поверхности земли появился изогнутый разрыв длиной 9 км.

Институт географических исследований произвел повторную съемку на сети пунктов триангуляции в районе землетрясения спустя 10 лет после него. Как и в случае землетрясения в Тоттори, из-за военного времени было невозможно провести повторную съемку сразу же после толчка. На рис. 5.12 показаны смещения пунктов триангуляции II и III классов за период времени 1887—1955 гг. [21]. Участки разлома также показаны на этом рисунке. Поскольку залив очень мелкий (максимальная глубина всего 20 м), разлом прослеживается даже на морском дне.

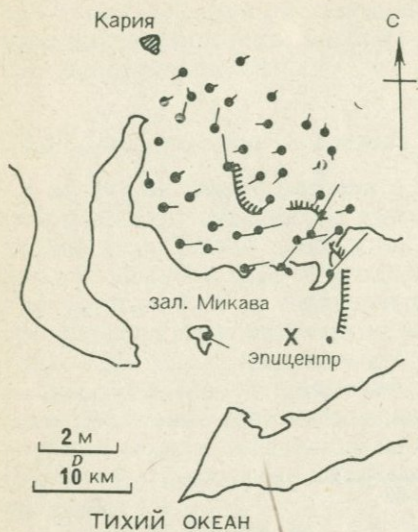


Рис. 5.12. Горизонтальные смещения пунктов триангуляции II и III классов при землетрясении 1944 г. в заливе Микава [21]. Показаны также линии разлома и эпицентр.

В работе [21] приводится график, показывающий убывание горизонтальных смещений, параллельных разлому, по мере удаления от него (рис. 5.13). Модель очага, в которой плоскость разрыва длиной 12 км и шириной 11 км имеет меридиональное простирание и наклонена на запад под углом  $30^\circ$ , с взбросовым движением в 2 м и правосторонним сдвигом 1 м,

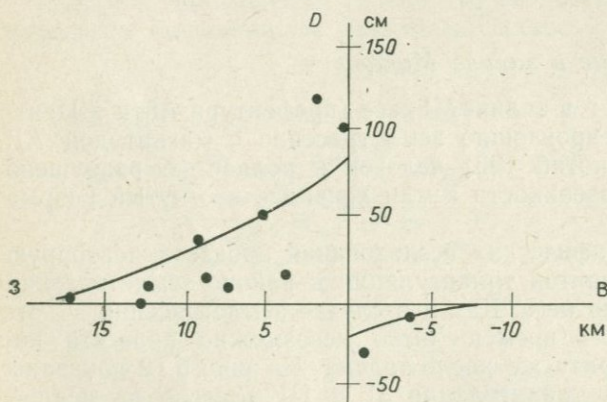


Рис. 5.13. Горизонтальные смещения, параллельные разлому, в зависимости от расстояния до него при землетрясении в заливе Микава. Сплошными линиями показаны смещения, вычисленные для модели с правосторонним сдвигом в 1 м [21].

может объяснить деформации земной коры. Эта модель, по-видимому, согласуется с наблюдаемыми цунами и сейсмическими волнами.

### 5.3.6. Нанкайское землетрясение

Землетрясение с  $M=8,1$ , происшедшее 21 декабря 1946 г. в море у берегов о. Сикоку в Японии, несомненно, следует причислить к катастрофическим землетрясениям, неоднократно поражавшим юго-западную часть Японии в прошлом. Как сообщалось, погибло 1330 человек и 102 пропало без вести, 11 591 здание полностью разрушено. Цунами от этого землетрясения было настолько сильным, что в некоторых местах наблюдались волны до 6 м высотой. Название этого землетрясения происходит от слова Нанкай, или Нанкайдо, что по-японски значит «Южное море».

На рис. 5.14 нанесены горизонтальные смещения пунктов триангуляции I класса за промежуток времени 1899—1949 гг. [98, 99]. Отрезок прямой на о. Хонсю изображает базис, который, как предполагают, не испытал перемещений во время землетрясения. После Тонанкайского землетрясения 1944 г. ( $M=8,0$ ), эпицентр которого находился примерно в 100 км к северо-востоку от эпицентра этого землетрясения, геодезических съемок не проводилось, поэтому данные на рис. 5.14 могут отражать суммарный эффект обоих землетрясений.



Рис. 5.14. Горизонтальные смещения пунктов триангуляции I класса при Нанкайском землетрясении 1946 г. Отрезок прямой, соединяющий две станции на о. Хонсю, представляет собой базис, который, как предполагают, не был затронут землетрясением. Крестиком указан эпицентр [98, 99].

В работе Сато [377] изложены результаты аналогичного исследования с использованием смещений пунктов не только I, но и II класса.

Как будет видно в § 5.6.11, крайние точки о. Сикоку испытали поднятие примерно в 1 м, в то время как обширная внутренняя часть острова опустилась на несколько десятков сантиметров. Примечательно, что территория, затронутая землетрясением, чрезвычайно широка. Фитч и Шольц [91] для интерпретации геодезических данных привлекли механизм упругой отдачи, совместимый с поддвигом тектонических блоков. Предполагается, что разлом находится на расстоянии 100 км от берега, а его след на поверхности совпадает с подводным каньоном, Нанкайским рвом, простирающимся в направлении ЗЮЗ—ВСВ. Площадь разлома была оценена в  $2,5 \cdot 10^4$  км<sup>2</sup>, а для объяснения деформаций при землетрясении смещение должно составлять от 5 до 18 м. Анализ сейсмограмм [196] показывает, что при Нанкайском землетрясении, по-видимому, произошел пологий надвиг, размер которого и смещение по разрыву равны соответственно  $10^4$  км<sup>2</sup> и 3 м.

Величина смещения, вычисленная из сейсмических данных, явно меньше, чем из геодезических. Канамори [195, 196] предположил, что это расхождение можно объяснить, учитывая процессы неидеальной упругости в механизме отдачи.

### 5.3.7. Землетрясение в Фукуи

28 июня 1948 г. в г. Фукуи в Центральной Японии на берегу Японского моря произошло сильное землетрясение ( $M=7,3$ ), унесшее 3895 человеческих жизней и полностью разрушившее 35 420 домов. Хотя на поверхности не было замечено никакого смещения, повторная триангуляция выявила глубинный левосторонний сброс простирания  $10-20^\circ$  СЗ [269, 278]. Отмечено несколько кулисообразно расположенных трещин в почве в направлении разлома, который, вероятно, был замаскирован мощным слоем наносов. Оценки длины разлома и максимальной величины смещения составляют соответственно 25 км и 2 м (рис. 5.15).

Канамори [195] предложил модель очага Фукуйского землетрясения, в которой разрыв имеет длину 30 км, ширину (по вертикали) 13 км, а смещение по нему равно 2 м. По сейсмическим данным определены сейсмический момент, сброшенное напряжение и эффективное напряжение, которые оказались равны соответственно  $3,3 \cdot 10^{26}$  дин·см, 83 бар и 36—120 бар.

По всей видимости, модель очага, определенная по сейсмическим данным, хорошо согласуется с геодезическими измерениями. Зависимость горизонтального смещения от расстояния



Рис. 5.15. Горизонтальные смещения пунктов триангуляции при Фукуйском землетрясении 1948 г. Цифры указывают величину вертикальных перемещений (в см), а штриховкой показан подземный разлом. Крестиком отмечен эпицентр [192].

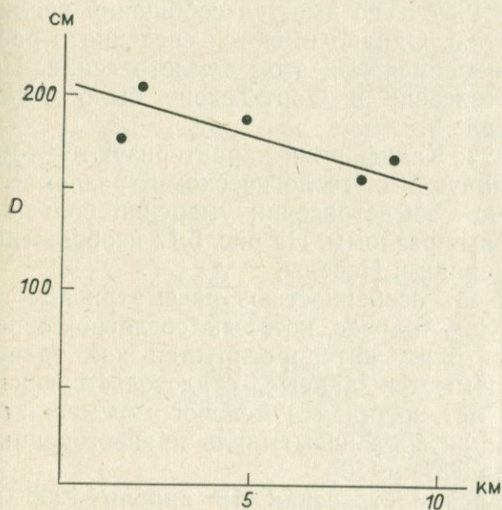


Рис. 5.16. Уменьшение горизонтального смещения, параллельного разрыву, по мере удаления от него для Фукуйского землетрясения [353].

до разлома, показанная на рис. 5.16, вполне укладывается в рамки этой модели. На рисунке показаны перемещения пунктов триангуляции лишь в области вблизи центра разрыва.

Судя по хорошей согласованности между собой сейсмических и геодезических данных, причиной японских землетрясений, происходящих внутри суши, может быть почти целиком механизм упругой отдачи. В противоположность этим землетрясениям очень сильные землетрясения, происходящие вблизи тихоокеанского побережья Японии (такие, как в Канто и Нанкайдо), по-видимому, связаны с неупругими процессами в земной коре, так как поверхность разрыва, полученная из геодезических данных, намного больше, чем из сейсмических.

### 5.3.8. Землетрясение в Сан-Франциско

Исторические данные о землетрясениях в Калифорнии (США) имеются начиная с сильного землетрясения 28 июля 1769 г., ощущавшегося в районе Лос-Анджелеса. После этого в Неваде и Калифорнии было зарегистрировано еще большее количество землетрясений. Читатели, интересующиеся землетрясениями в Америке, могут обратиться к книге Рихтера [331] и обзору [279].

Землетрясения 1857 и 1906 г., происшедшие соответственно в районе Форт-Техона, в 100 км севернее Лос-Анджелеса, и в Сан-Франциско, вероятно, были наиболее разрушительными из многочисленных землетрясений в штатах Калифорния и Невада. Для землетрясения 1857 г. не имеется сообщений квалифицированных наблюдателей. Однако имеются сведения о разрыве длиной 64 км, появившемся при этом землетрясении. По всей вероятности, землетрясение в Форт-Техоне было очень сильным, с магнитудой около 8.

Землетрясения Невады и Калифорнии характеризуются тем, что они хорошо коррелируют с геологическими разломами и почти при каждом новом землетрясении умеренно большой магнитуды появляются новые разломы. На рис. 5.17 изображены основные разломы Калифорнии и Невады.

Основной тектонической особенностью рассматриваемого района является разлом Сан-Андреас, который, согласно современной теории тектоники плит, интерпретируется как трансформный разлом [468]. Имеются данные, свидетельствующие о том, что в течение  $10^8$  лет, начиная с мелового времени, по разлому Сан-Андреас земная кора испытывала правосторонние движения с амплитудой до 500 км [10].

При Сан-Францисском землетрясении 18 апреля 1906 г. ( $M=8,3$ ) погибло несколько сотен человек в Сан-Франциско и его окрестностях. Возник обширный пожар [51].

С землетрясением связывали преимущественно сдвиговое движение по разлому длиной 320 км, идущему от мыса Арены к югу. Согласно Рихтеру [331], наибольшие смещения наблюдались в Мартин-Каунти, к северу от Золотых Ворот. Относительное смещение пород имело общий максимум около 4,7 м, но на мягких аллювиальных грунтах оно достигало 6,4 м.

С июля 1906 г. по июль 1907 г. в Калифорнии была проведена новая триангуляция, и результаты сравнивались со старыми съемками периода 1851—1899 гг. Были обнаружены значительные смещения пунктов триангуляции, связанные с землетрясением 1906 г. [156]. Любопытно отметить, что наблюдались также движения по разлому Хейвард, которые, вероятно, были связаны с землетрясением 1868 г., причинившим значительный ущерб Сан-Франциско.

На рис. 5.18, а—г показана картина подвижек при землетрясении 1906 г. [156]. Видно, что перемещения пунктов триангуляции параллельны простиранию разлома и что большие перемещения приурочены к узкой полосе, расположенной вдоль разлома.

На рис. 5.19, взятом из работы Чиннери [62], нанесены кривые горизонтальных смещений, параллельных разлому,



Рис. 5.17. Основные системы геологических разломов в штатах Калифорния и Невада (США).

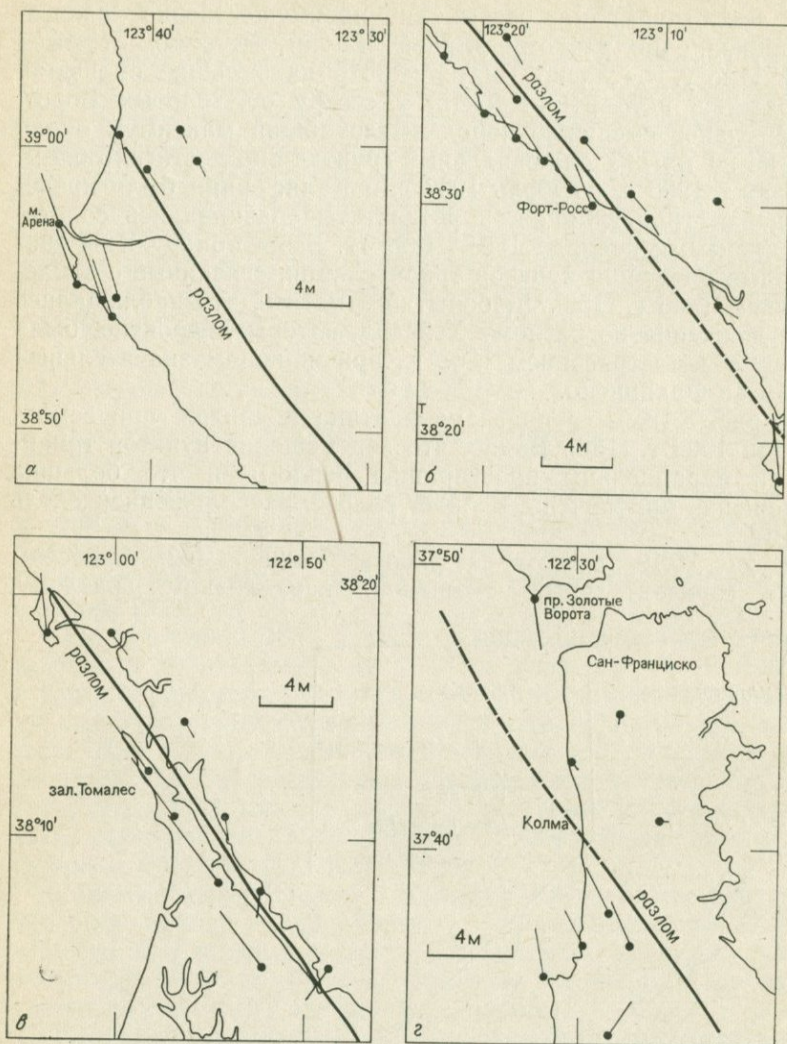


Рис. 5.18. Горизонтальные смещения пунктов триангуляции при Сан-Франциском землетрясении 1906 г. [156].  
*а* — район м. Арена, *б* — район Форт-Росса, *в* — район залива Томалес, *г* — Сан-Франциско—Колма.

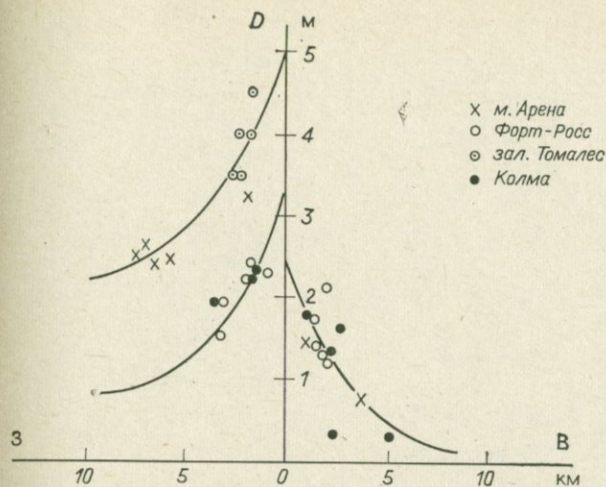


Рис. 5.19. Уменьшение горизонтальных смещений с расстоянием для Сан-Францисского землетрясения [62].

в зависимости от расстояния до него, для четырех районов, показанных на рис. 5.18. Поскольку суммарная величина подвижки по разлому изменяется вдоль всей его длины, тенденцию уменьшения горизонтальных подвижек можно выявить лишь с помощью нескольких кривых. Среднее относительное уменьшение смещений получается равным  $1,7 \cdot 10^{-4}$ , что существенно превышает аналогичную величину для других землетрясений.

### 5.3.9. Землетрясение в Импириал-Валли

Землетрясение с магнитудой 7,1 (9 жертв), происшедшее в Импириал-Валли близ Эль-Сентро, на юге Калифорнии, 18 мая 1940 г., сопровождалось образованием разрыва протяженностью около 65 км или больше, пересекающего государственную границу между США и Мексикой. Этот разлом, который проходит параллельно разлому Сан-Андреас, назвали разломом Импириал (см. рис. 5.17). Рихтер [331, стр. 450—457] дает подробное описание этого землетрясения.

В районе землетрясения в 1935 г. была проведена триангуляционная съемка, а затем в 1939 г. сделаны дополнительные измерения. После проведения повторной съемки в 1941 г. обнаружилась интересная картина движений почвы, как это видно из рис. 5.20 [241, 482], который отчетливо иллюстрирует правосторонний сдвиг.

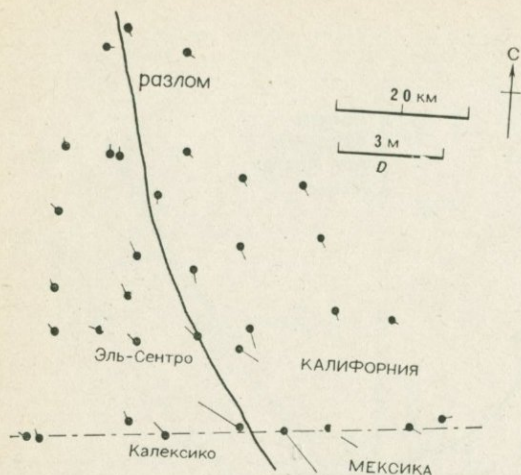


Рис. 5.20. Горизонтальные смещения пунктов триангуляции при землетрясении 1940 г. в Импириал-Валли [241].

Анализ уменьшения горизонтальных смещений, параллельных разлому, дал величину горизонтальных деформаций в непосредственной близости от разлома, достигающую  $8,5 \cdot 10^{-5}$ .

### 5.3.10. Землетрясение в Керн-Каунти

21 июля 1952 г. в Калифорнии произошло землетрясение ( $M=7,7$ ), сильнейшее после 1906 г. Оно унесло 12 жизней и причинило значительные разрушения в Бейкерсфилде, Арвине и других городах. Эпицентр был расположен очень близко к разлому Уайт-Вулф; о его существовании было известно, но никто не предполагал, что он может явиться причиной сильного землетрясения. Новый разрыв можно было проследить на протяжении более 30 км; там произошла подвижка типа сброса, в противоположность разлому Сан-Андреас, где в основном наблюдаются сдвиговые движения. У Рихтера [331, стр. 480—491] приводится подробное описание этого землетрясения.

На рис. 5.21 представлено распределение горизонтальных и вертикальных смещений земной коры во время землетрясения в Керн-Каунти [482]. По удачному стечению обстоятельств как раз за несколько месяцев до землетрясения была закончена триангуляционная съемка, и горизонтальные смещения, приведенные на рис. 5.21, получены из сравнения результатов двух съемок: 1951—1952 гг. и 1952—1953 гг. Среднее относительное

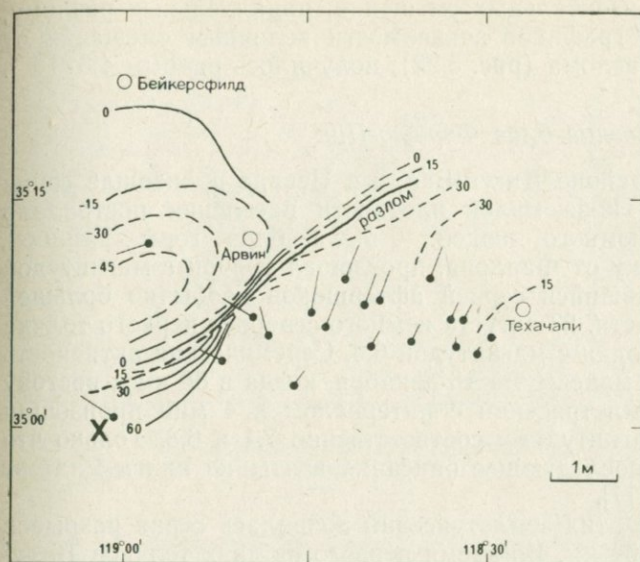


Рис. 5.21. Горизонтальные смещения пунктов триангуляции при землетрясении 1952 г. в Керн-Каунти. Цифрами указаны вертикальные смещения (в см). Крестиком нанесен эпицентр [482].

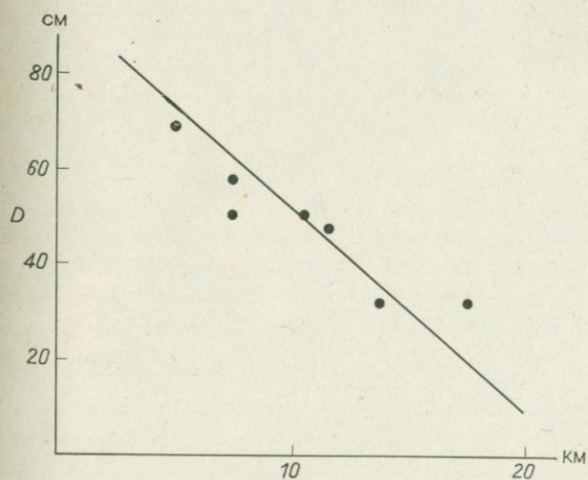


Рис. 5.22. Убывание величины горизонтальных смещений, параллельных разлому, в зависимости от расстояния до него при землетрясении в Керн-Каунти [353].

уменьшение горизонтальных смещений, параллельных разлому, вычисленное из графиков зависимости величины смещения от расстояния до разлома (рис. 5.22), получилось равным  $4,3 \cdot 10^{-5}$ .

### 5.3.11. Землетрясение близ Фэрвью-Пик

В 1954 г. в районе Дикси-Валли в Неваде произошла серия землетрясений. Из-за малой плотности населения пострадало сравнительно немного людей. 6 июля близ горы Рейнбоу, в 16 км к востоку от Фаллона, произошел толчок с магнитудой 6,6, сопровождавшийся серией афтершоков необычно большой продолжительности. 23 августа немного севернее первого толчка произошел еще один с магнитудой 6,8. Сейсмическая активность достигла своего максимума 16 декабря, когда в 50 км к востоку от июльских землетрясений с интервалом в 4 мин произошли два толчка с магнитудами соответственно 7,1 и 6,8. Только что приведенное и последующее описания взяты из книги Рихтера [331, стр. 471—477].

В результате этих землетрясений появилась серия разрывов общей длиной 104 км. Во время первого из двух толчков 16 де-



Рис. 5.23. Разлом, появившийся при землетрясении 1954 г. на Фэрвью-Пик (фото автора, 1966 г.).

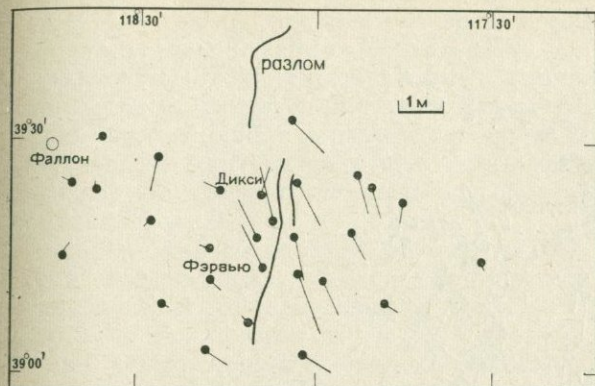


Рис. 5.24. Горизонтальные смещения пунктов триангуляции при землетрясении 1954 г. на Фэрвью-Пик [483].

кабря на Фэрвью-Пик появился весьма впечатляющий сброс (рис. 5.23). В противоположность разлому Сан-Андреас подвижки на разломах к востоку от хребта Сьерра-Невада характеризуются преобладанием сбросовых движений.

Триангуляции, проведенные в связи с этими землетрясениями, предоставили в распоряжение ученых одну из лучших возможностей исследовать деформации земной коры при сильных землетрясениях. Летом 1954 г. к востоку от Фаллона работала триангуляционная партия. Съемка была закончена как раз перед декабрьскими землетрясениями. По просьбам сейсмологов, геологов и других специалистов эта партия вернулась в тот же район и в течение лета 1955 г. завершила повторную съемку всей сети.

Как видно из рис. 5.24 [483, 484], при сравнении этих двух съемок получились поразительные результаты. На рисунке ясно проступает правостороннее сдвиговое движение. Среднее уменьшение величины горизонтальных смещений, параллельных разлому, составило  $6,2 \cdot 10^{-5}$ .

### 5.3.12. Аляскинское землетрясение

Катастрофическое Аляскинское землетрясение ( $M=8,4$ ), происшедшее 28 марта 1964 г. в районе пролива Принс-Вильям, причинило большой ущерб городу Анкоридж и прилегающей к нему территории. Число погибших или пропавших без вести достигло 112 человек, и еще 12 погибло от цунами, сопровождавшего землетрясение. Движения земной коры произошли на столь обширной территории, что поднятия и опускания

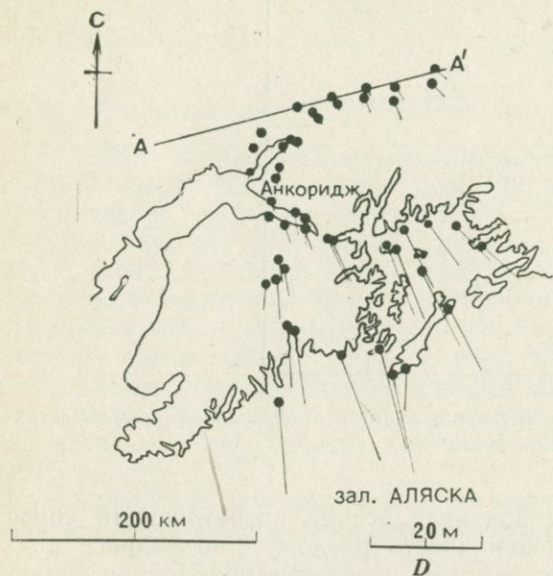


Рис. 5.25. Горизонтальные смещения пунктов триангуляции при Аляскинском землетрясении 1964 г. [316].

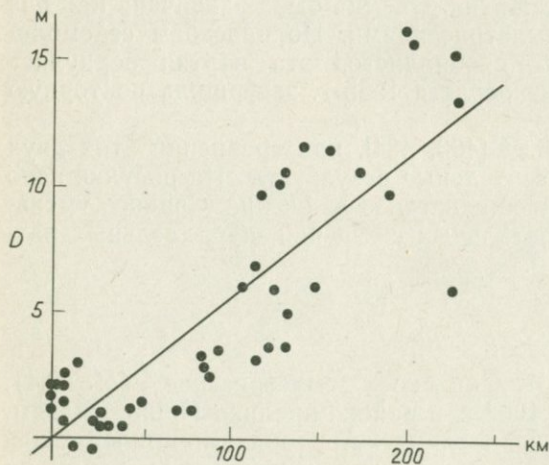


Рис. 5.26. Увеличение с расстоянием от прямой  $AA'$  горизонтальных смещений, перпендикулярных этой прямой (см. рис. 5.25) при Аляскинском землетрясении [353].

наблюдались на протяжении нескольких сотен километров, а общая площадь, испытавшая воздействие землетрясения, составила около 200 000 км<sup>2</sup> [79—81, 317].

Согласно [316], горизонтальные смещения пунктов триангуляции при землетрясении были приблизительно такими, как показано на рис. 5.25, где имеются смещения, превышающие 20 м. Плафкер [318] интерпретирует эти движения как результат надвига под Алеутско-Аляскинской дугой с амплитудой смещения порядка 20 м.

Чтобы оценить средние горизонтальные деформации в очаговой зоне, вычисляют изменения горизонтальных смещений по отношению к произвольной прямой  $AA'$ , как показано на рис. 5.25. Эта прямая почти перпендикулярна общему направлению горизонтальных перемещений. На рис. 5.26 точками нанесены величины горизонтальных смещений, спроектированных на направление, перпендикулярное прямой  $AA'$ , как функции расстояния от  $AA'$ . Прямая на рисунке, полученная методом наименьших квадратов, дает значение среднего градиента спадания горизонтальных смещений  $8,4 \cdot 10^{-5}$ .

### 5.3.13. Ромбические базисы в Митаке (Япония)

В 1916 г. Токийская астрономическая обсерватория в Митаке (в пригороде Токио) разбила сеть геодезических базисов в форме ромба. Как видно из рис. 5.27, ромб состоит из четырех базисов, длина каждого из которых 100 м [449].

Длина базисов периодически, чаще всего с промежутком в 1—2 года, измерялась с помощью инварных мерных проволок. Оказалось, что их длина изменяется. Рис. 5.27 иллюстрирует изменения объемного расширения и максимальных сдвиговых

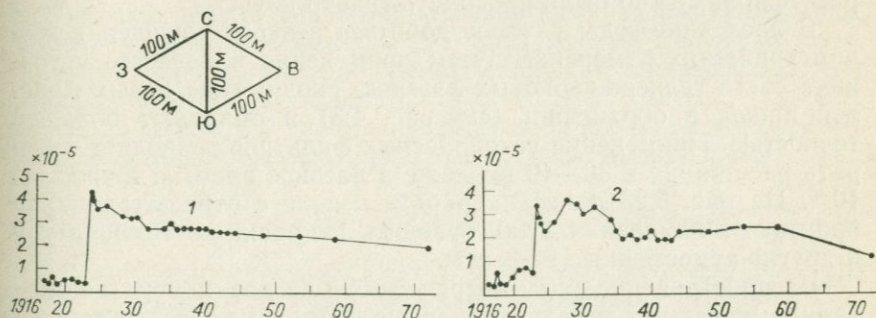


Рис. 5.27. Изменения максимальных сдвиговых (1) и объемных (2) деформаций по данным о вековых изменениях длины базисов ромбической сети в Митаке [105].

деформаций, вычисленные по изменениям длины базисов [105]. Интересно отметить, что относительное увеличение площади ромба на  $3 \cdot 10^{-5}$  наблюдалось в связи с землетрясением 1923 г. в Канто, эпицентр которого находился в нескольких десятках километров от ромба.

Внимательное рассмотрение рис. 5.27 показывает, что аномальное увеличение площади ромба началось за 4 года до землетрясения, что могло являться его предвестником.

Метод, в котором используется расположение базисов в виде ромба или четырехугольника с длиной профилей в несколько километров, сейчас широко применяется в тех районах, где можно ожидать значительных движений земной коры [150, 243].

#### 5.4. МЕТОД ГЕОДИМЕТРИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ

Если измерить время  $T$ , за которое луч света проходит расстояние от точки  $A$  до точки  $B$ , отражается в точке  $B$  и снова возвращается в  $A$ , то расстояние между  $A$  и  $B$  будет равно

$$d = cT/2, \quad (5.10)$$

где  $c$  — скорость света.

Геодиметр — это прибор, работающий по описанному выше принципу. Однако на практике луч света, идущий к отражателю, модулируют колебаниями высокой частоты  $\omega$  от 10 до 30 МГц. Поскольку модулированные световые волны испытывают фазовый сдвиг, равный  $2d\omega/c$ , то можно определить  $d$  путем измерений этого сдвига.

Примерно с 1950 г. геодиметры использовали для измерения расстояний порядка нескольких десятков километров. Первые модели были громоздкими, и, кроме того, измерения больших расстояний можно было проводить только ночью.

В последние годы удалось добиться резкого улучшения геодиметрических измерений путем применения в качестве источника света гелиево-неоновых лазеров. Геодиметры новых моделей проще в обращении (см. рис. 4.3) и обладают большей точностью. Применение узкополосных фильтров позволяет измерять расстояния в 30—40 км даже в дневное время с точностью  $10^{-6}$ . На рис. 5.28 показана работа в поле с отражателем. На практике в измерениях нужно вводить поправки за температуру и другие атмосферные эффекты.

Распространение геодиметрических методов измерения позволило проводить триангуляционные съемки I класса путем измерения не углов в треугольнике, а расстояний между пунктами. Общая точность съемки при этом повышается в несколько раз по сравнению с классической триангуляцией.

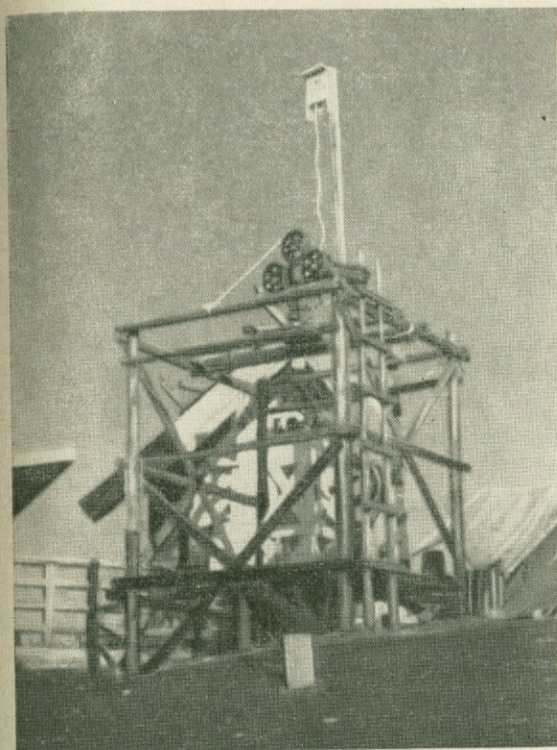


Рис. 5.28. Отражатель геодинетра во время полевых работ.

Ведется разработка геодинетрических методов, основанных на синхронном измерении света двух цветов. Введение соответствующей поправки за преломление при использовании лазерных источников красного (He—Ne) и синего (He—Cd) света, по-видимому, даст точность на порядок выше, чем при измерениях прибором с монохроматическим источником [40].

#### *5.4.1. Горизонтальные деформации в Южном Канто*

После землетрясения 1923 г. в Канто, безусловно самого разрушительного в истории Японии, население опасалось повторения сильного землетрясения в этом районе, к юго-западу от Токио. На основании статистического изучения сейсмичности Кавасуми в 1970 г. [210], несмотря на ряд возражений (например, [403, 407]), предположил, что существует 69-летний цикл

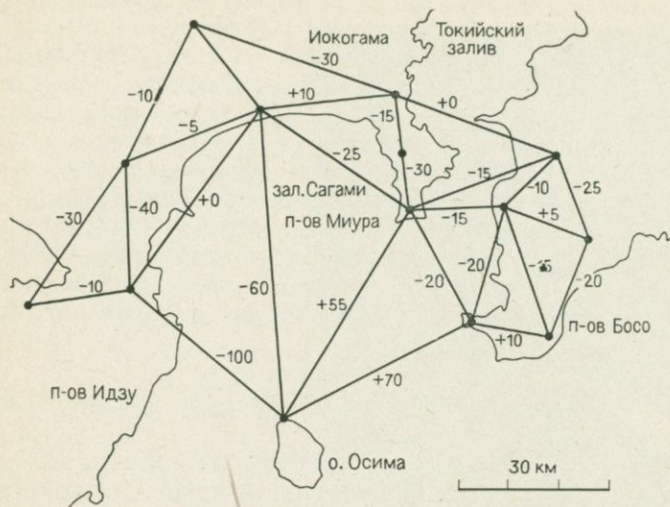


Рис. 5.29. Изменения расстояний (в см) между пунктами триангуляции в Южном Канто за период 1925—1971 гг. [104].

повторяемости сильных землетрясений в районе Токио. Пресса приняла результат Кавасуми всерьез, и, поскольку со времени землетрясения в Канто прошло уже 50 лет, в газетах, еженедельниках и подобных изданиях оживленно обсуждалась возможность повторения сильного землетрясения в районе Токио.

При этих обстоятельствах GSI провел повторную триангуляцию пунктов в Южном Канто с целью исследовать напряжения, накопившиеся в земной коре [104]. По рис. 5.29 можно видеть изменения горизонтальных расстояний между пунктами триангуляции I класса, имевшие место за период с 1925 г. по 1971 г. Эти данные были получены сравнением результатов геодезической съемки с триангуляцией, проведенной через несколько лет после землетрясения в Канто. Примечательно, что за 46 лет расстояние от о. Осима до пункта триангуляции на п-ове Идзу сократилось на 100 см, а расстояния от этого же острова до крайних точек п-овов Миура и Босо увеличились на несколько десятков сантиметров. Заметно также значительное сокращение расстояний примерно в меридиональном направлении п-ова Босо.

Было бы чрезвычайно интересно сравнить эти деформации с теми, которые имели место при землетрясении 1923 г. На рис. 5.30 [104] показаны направления главных горизонтальных осей деформаций в Южном Канто по результатам триангуляций за периоды 1887—1925 гг. и 1925—1971 гг. Из рисунка ясно следует, что направление деформации после землетрясения

почти в точности противоположно направлению деформации, сопровождавшей землетрясение, и что за эти 46 лет восстановилась примерно одна треть этой последней деформации. Таким образом, экстраполируя, мы можем ожидать, что оставшиеся две трети могут накопиться за 92 года, начиная с 1971 г., и будет не удивительно, если по прошествии указанного срока в заливе Сагами действительно произойдет еще одно сильное землетрясение.

Закономерности распределения горизонтальных деформаций позволяют предполагать, что их основной причиной является движение плиты Филиппинского моря в северо-западном направлении, как показано на рис. 5.31. По-видимому, подводный разлом, след которого на поверхности, вероятно, совпадает с рвом Сагами, был «заперт» после того, как по нему произошли движения во время землетрясения 1923 г. В результате этого в его окрестности накопились значительные сдвиговые деформации. Они указаны на рис. 5.32 для каждого из треугольников. Средняя скорость накопления максимальных сдвиговых деформаций получилась равной  $0,05668 \cdot 10^{-5}$  год<sup>-1</sup>.

Повторные геодезические измерения в Южном Канто представляют собой уникальный пример наблюдения деформаций земной коры в очаговой зоне, где уже произошло сильное землетрясение и ожидается еще одно. Повторные измерения

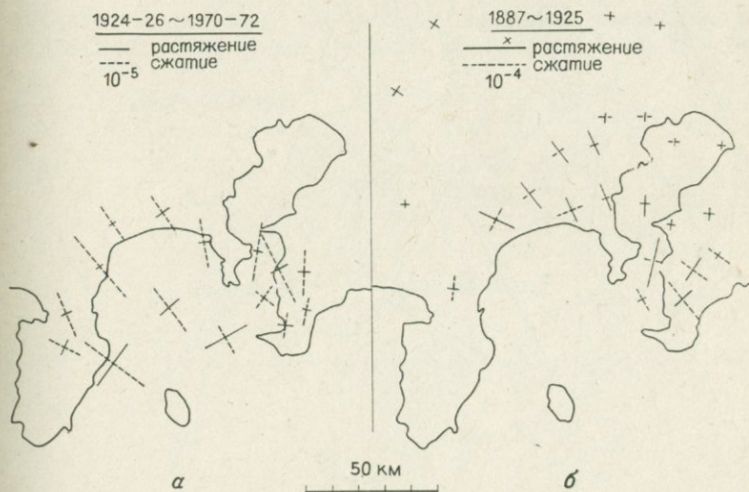


Рис. 5.30. Направления главных горизонтальных осей деформаций в Южном Канто, определенные путем сравнения результатов триангуляционных или геодезических съемок.

а — 1925 (1924—1926) — 1971 (1970—1972) гг.; б — 1887—1925 гг. [104].



расстояний между триангуляционными пунктами на о. Осима и п-вах Идзу, Миура и Босо начиная с 1971 г. проводятся ежегодно; однако до настоящего времени никаких существенных изменений не обнаружено.

#### 5.4.2. Горизонтальные деформации в области Северного Идзу

Институт географических исследований [108] недавно закончил геодиметрическую съемку пунктов триангуляции II и III классов в Северном Идзу (Япония), где в 1930 г. произошло разрушительное землетрясение (см. § 5.3.3). На рис. 5.33 нанесены горизонтальные смещения каждого пункта за период 1933—1973 гг., полученные сопоставлением результатов настоящей съемки и триангуляционных измерений, выполненных вскоре после землетрясения.

Интересно отметить, что вблизи разлома Танна, движения по которому происходили во время землетрясения 1930 г., смещения малы, а направления перемещений по обе стороны от разлома совпадают с теми, которые наблюдались при землетрясении (см. рис. 5.8). Ясно, что все это время происходили сдвиговые движения при, по-видимому, «запертом» разрыве, и их отдача может повести к повторному землетрясению, как это впервые предположил Рейд [326, стр. 16—32].

В работе Дамбары [68] показана невозможность получить правильную картину смещений, поскольку вычисления смещений триангуляционных пунктов (типа рис. 5.33) основываются

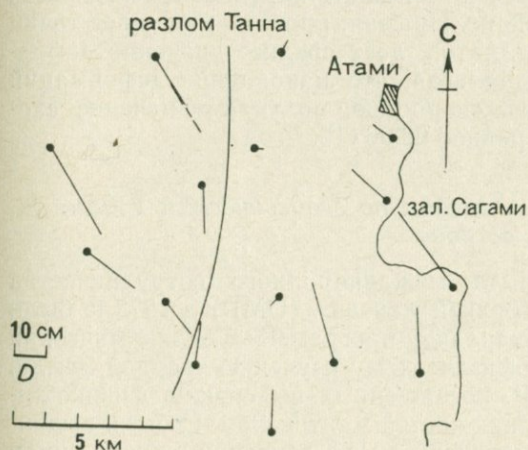


Рис. 5.33. Горизонтальные смещения пунктов триангуляции в Северном Идзу за период 1933—1973 гг. [108].

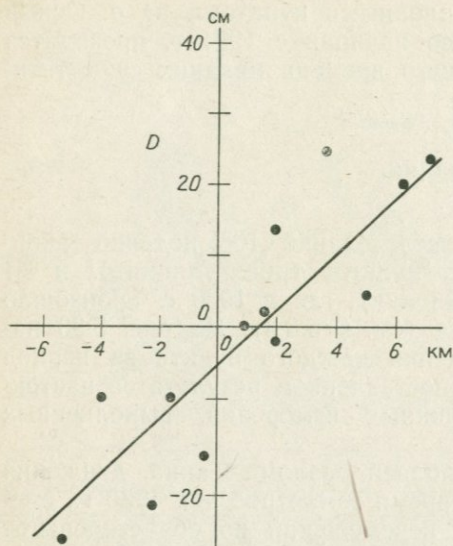


Рис. 5.34. Изменение горизонтальных смещений, параллельных разлому Танна, в функции расстояния от него [353].

на определенном допущении. Однако здесь мы в предварительном порядке примем, что смещения, показанные на рис. 5.33, приблизительно верны.

На графике рис. 5.34 нанесены значения смещений, параллельных разрыву, в функции расстояния от него. При этом пренебрегается небольшой кривизной разрыва. Несмотря на разброс точек, выявляется отчетливая картина срезающих напряжений в данном районе. Прямая, проведенная через точки методом наименьших квадратов, дает среднее значение деформации до  $3,8 \cdot 10^{-5}$ . Предполагая, что накопление деформаций происходило с постоянной скоростью, получаем значение скорости, начиная с 1930 г., равное  $0,096 \cdot 10^{-5}$  год<sup>-1</sup>.

#### 5.4.3. Высокочастотные измерения по геодезическим ходам, пересекающим Японские острова

После успешного опыта международного сотрудничества 60-х годов по «Проекту верхней мантии» (УМР) в 1972 г. были начаты работы по международной программе «Геодинамический проект», посвященной геофизическому изучению твердой Земли. Во время работ по УМР, посвященных выяснению физико-химического состояния верхних частей мантии Земли, были выдвинуты идеи расширения морского дна и тектоники плит. Ввиду этих волнующих открытий было решено продолжить совместные международные работы по геодинамике, в результате чего по

предложению IUGG и Международного союза геологических наук (IUGS) была образована Международная комиссия по геодинамике (ICG) под эгидой Международного совета научных союзов (ICSU). В этом проекте принимают участие десятки стран.

Одной из наиболее важных задач в рамках работ по Геодинамическому проекту, проводимых в Японии, является проверка сжатия Японских о-вов между плитами Тихого океана и Филиппинского моря, как это предполагается гипотезой тектоники плит. Институт географических исследований в Японии произвел ряд высокоточных профильных измерений вдоль нескольких почти прямых линий, соединяющих триангуляционные пункты поперек Японской островной дуги, с целью выяснить наличие или отсутствие такого сжатия.

На рис. 5.35 показан профиль на о. Хоккайдо [106], приблизительно перпендикулярный оси Японии — Курильский желоб, где, как предполагают, погружается Тихоокеанская плита. Изменение расстояния между соседними пунктами триангуляции вычисляется путем сравнения результатов проведенной съемки (1972 г.) и триангуляции I класса, выполненной в 1907 г. Интересно отметить, что по южной половине профиля получается сокращение, которое может быть результатом сжимающего движения Тихоокеанской плиты.

На рис. 5.36 [106] показаны представляющие исключительный интерес результаты по профилю, идущему приблизительно на север к Японскому морю и начинающемуся несколько западнее Токио. За период 1900—1972 гг. расстояния между пунктами на южной половине профиля заметно сократились. Однако во время



Рис. 5.35. Изменение расстояний (в см) между соседними пунктами триангуляции по профилю на востоке Хоккайдо за период 1907—1972 гг. [106].

землетрясения 1923 г. в Канто произошел обратный процесс, т. е. расстояния увеличились (см. § 5.3.1, 5.4.1); после этого они снова стали уменьшаться. Напротив, северная половина профиля, по-видимому, довольно стабильна, поскольку за эти 72 года там не было замечено никакой существенной деформации.

В 1973 г. подобные же съемки были проведены на северо-востоке и в центре Японии [107, 109] по профилю, идущему примерно вдоль 39-й параллели. За период 1894—1973 гг. там не было обнаружено заметного сжатия, хотя между двумя пунктами в середине профиля отмечено большое сжатие (рис. 5.37). Поскольку этот район находится довольно далеко от Японского желоба, эффект сжатия от Тихоокеанской плиты невелик.

Как видно из рис. 5.38, на котором представлены изменения расстояний за период 1890—1973 г., результаты измерений по профилю, пересекающему Центральную Японию, представляются чрезвычайно любопытными. На этом рисунке ясно видно громадное сокращение в северо-западном направлении. На про-

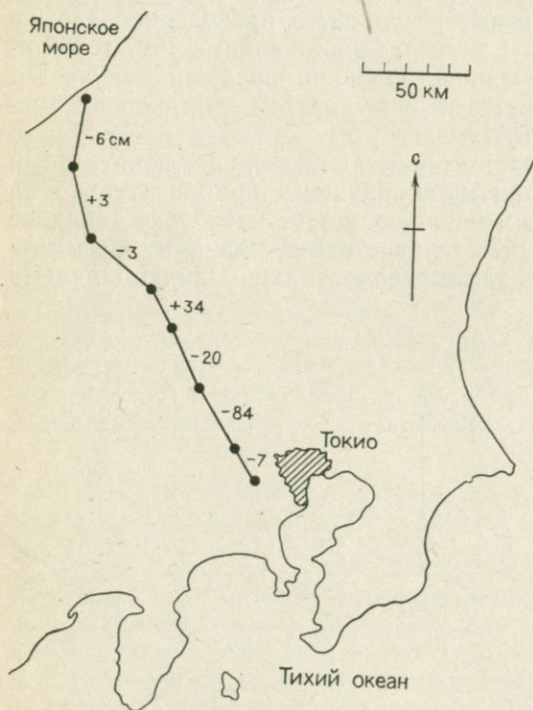


Рис. 5.36. Изменение расстояний (в см) между соседними пунктами триангуляции вдоль профиля, пересекающего о. Хонсю и идущего на север от западных предместий Токио, за период 1900—1972 гг. [106].

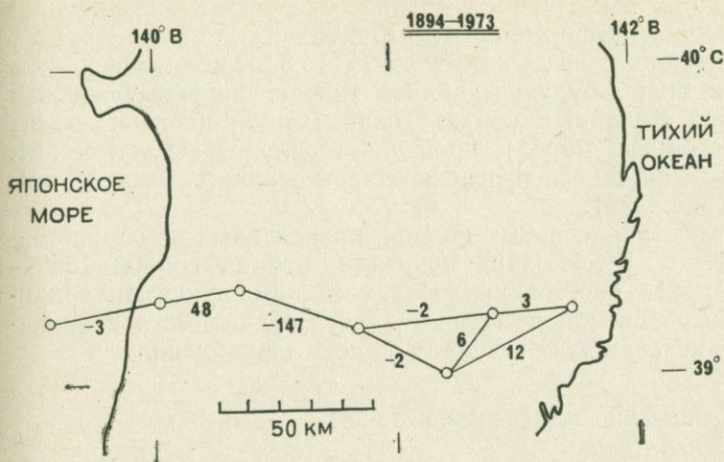


Рис. 5.37. Изменение расстояний (в см) между соседними пунктами триангуляции по субширотному профилю, пересекающему о. Хонсю близ 39-й параллели, за период 1894—1973 гг. [107].

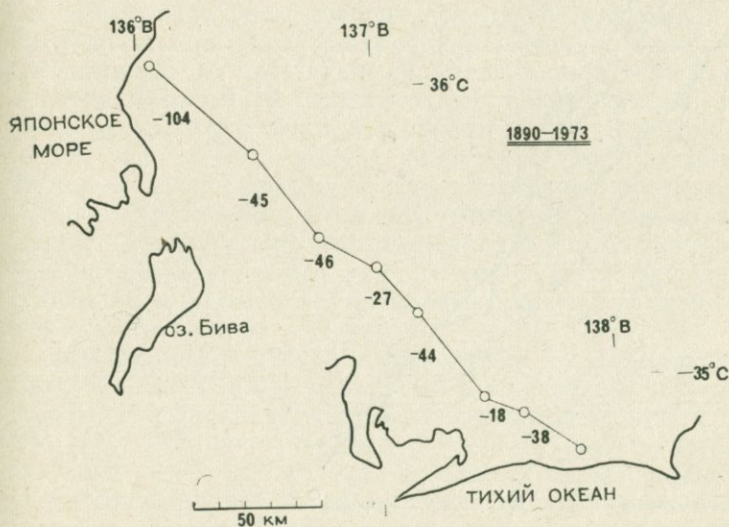


Рис. 5.38. Изменение расстояний (в см) между соседними пунктами триангуляции на о. Хонсю в Центральной Японии за период 1890—1973 гг. [109].

тяжении 230 км сокращение составило 3,22 м, что соответствует средней скорости деформации  $1,6 \cdot 10^{-7}$  год<sup>-1</sup>.

Как будет видно из дальнейшего (§ 15.3.2), весьма вероятно, что в ближайшем будущем вблизи тихоокеанского побережья Центральной Японии, в округе Токай (что по-японски значит «округ Восточного моря»), произойдет сильное землетрясение. Основанием для такого прогноза отчасти является сжатие земной коры (рис. 5.38).

Результаты аналогичных съемок, проведенных вдоль восточного берега о. Кюсю [110], показали, что за период 1899—1973 гг. почти все расстояния между соседними пунктами триангуляции возросли на несколько десятков сантиметров. Физического объяснения этих результатов пока не найдено.

#### 5.4.4. Геодезические измерения в зоне разлома Сан-Андреас

Начиная с 1959 г. в зоне разлома Сан-Андреас ведутся интенсивные работы по наблюдению временных вариаций горизонтальных расстояний с использованием геодезического прибора. Работы

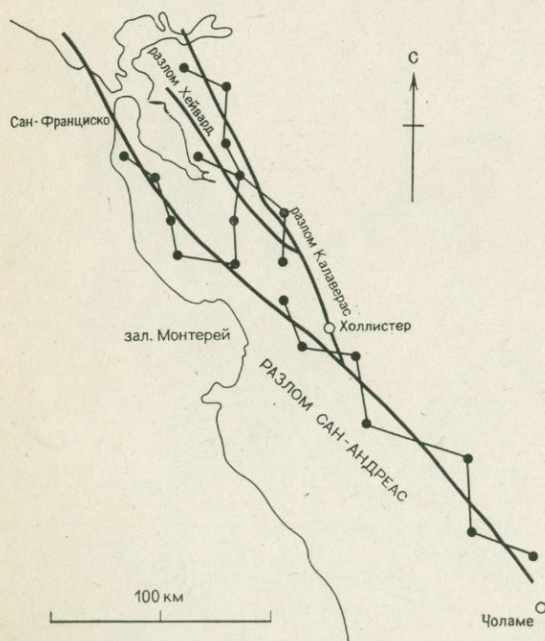


Рис. 5.39. Всокоточные геодезические ходы в системе разломов Сан-Андреас на участке Сан-Франциско—Чоламе [242].

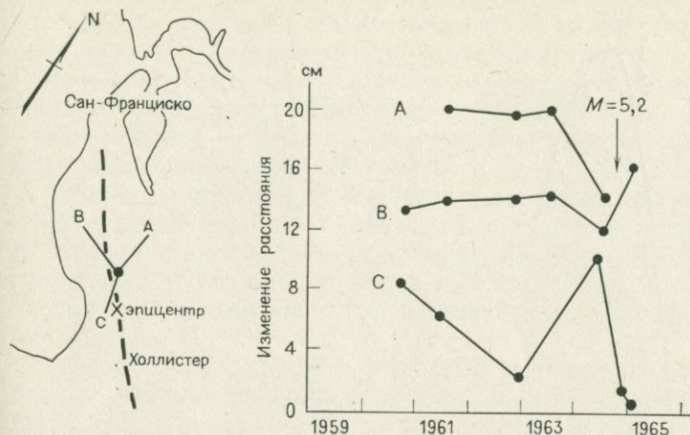


Рис. 5.40. Изменение расстояний, связанное с землетрясением 1964 г. в Корралитосе на севере Калифорнии [162, фиг. 33].

были начаты Калифорнийским департаментом водных ресурсов, а затем продолжены силами Калифорнийского отдела геологии и горного дела и Геологической службой США.

Большая часть вод в Калифорнии концентрируется на севере штата и передается в южные густонаселенные районы системами акведуков, которые пересекают разлом Сан-Андреас. Поэтому для жителей Калифорнии жизненно важно знать, какое влияние на акведуки оказывают движения по разлому.

Геодиметрические ходы, пересекающие систему разломов, часто располагают так, как показано на рис. 5.39 [242], где изображен разлом Сан-Андреас на участке Сан-Франциско — Холлистер — Чоламе. Неоднократные измерения расстояний между указанными точками показали, что наибольшая среднегодовая скорость движений на разломе Сан-Андреас наблюдается южнее Холлистера и достигает там 4,4 см/год [162]. Перед землетрясением часто происходят изменения скорости движений по близлежащим разломам.

Землетрясение 1964 г. с магнитудой 5,2, происшедшее в Корралитосе (в 20 км к северу от Холлистера), сопровождалось переменами знака вариаций расстояний. Это можно видеть на рис. 5.40. 19 января 1960 г. близ Холлистера произошло землетрясение с магнитудой 5. В это время проводились измерения по профилю длиной 25 км, пересекающему разлом Сан-Андреас севернее Холлистера. В течение 15 мин перед толчком длина профиля увеличилась на 8 см, а за 10 мин, прошедшие после толчка, к этому добавилось еще несколько сантиметров.

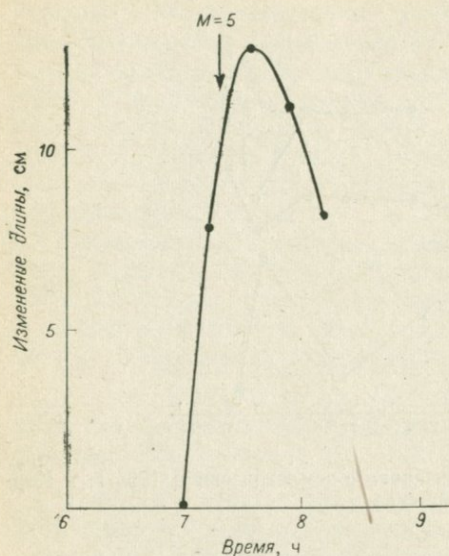


Рис. 5.41. Кратковременная аномалия длины геодиметрического профиля непосредственно перед и после землетрясения 1960 г. в Холлистере [168, фиг. 40].

В течение последующего часа произошло сокращение расстояния на несколько сантиметров. На рис. 5.41 показаны краткосрочные изменения расстояния во время этого землетрясения.

В работах Шольца и Фитча [392, 393], Сэвиджа и Бурфорда [379—381] и др. [118, 382] анализируются более современные данные, полученные в результате геодиметрических измерений. Шольц и Фитч обнаружили значительное накопление деформаций на участках разлома Сан-Андреас, а по мнению Сэвиджа и Бурфорда, большая часть изменений расстояний может быть связана с проскальзыванием по разлому, что не связано с накоплением деформаций. Вопрос о том, какой из этих точек зрения отдать предпочтение, находится вне компетенции автора.

### 5.5. МЕТОДЫ НИВЕЛИРОВАНИЯ

При проведении в Японии нивелирования реперы устанавливают под землей вдоль основных дорог на расстоянии около 2 км друг от друга. Эти реперы являются опорными при картировании. Нивелирование осуществляют взятием отсчета со шкалы на вертикальной рейке. Это делается с помощью подзорной трубы с точным уровнем, установленной на определенном расстоянии; поворачивая уровень почти на  $180^\circ$ , берут затем отсчет с другой вертикальной рейки, помещенной

на некотором расстоянии от трубы. Вычитая первое измерение из второго, получают разность высот в точках, где располагались рейки. Повторение этой операции позволяет последовательно определять высоты реперов относительно опорного. Для Японии таковым является репер, установленный в центре Токио. Считается, что его высота над средним уровнем моря в Токийском заливе составляет 24,4140 м.

Как мы уже видели (см. рис. 4.4), Японские о-ва покрыты нивелирными ходами I класса общей длиной около 20 000 км. Повторные нивелировки позволяют получить изменения высот реперов за время между двумя съемками. При этом необходимо сделать предположение, что высота одного из реперов не изменялась.

Автор плохо знаком с работами по нивелированию за пределами Японии, но полагает, что между нивелированием в разных странах не должно быть больших различий.

Поскольку нивелирование требует меньших затрат труда и средств, чем триангуляция, его повторяют по линиям, показанным на рис. 4.4, как можно чаще. Как говорилось в § 4.2.2, сейчас имеется возможность повторять нивелирование I класса по линиям через всю Японию (рис. 4.4) каждые пять лет. В особо важных областях, таких, как Южный Канто и Токай, повторное нивелирование проводилось и впредь будет проводиться каждые 1—2 года.

Ввиду быстрой индустриализации Японии при реконструкции дорог в последние годы многие реперы разрушаются. Вследствие увеличившейся моторизации Японии иногда с людьми, занятыми работами по нивелированию, случаются дорожные происшествия, так что проведение обширных работ по нивелированию становится затруднительным. Но положение Японии в этом отношении, вероятно, не очень плохо по сравнению с другими странами.

Высоту пункта триангуляции можно также определить в процессе триангуляционной съемки посредством тригонометрического нивелирования, хотя точность такого определения высоты значительно ниже, чем при нивелировании. Иногда для обнаружения изменений высот пунктов триангуляции на большой площади после сильного землетрясения бывает удобно использовать метод тригонометрического нивелирования.

## 5.6. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДЕФОРМАЦИЙ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ МЕТОДОМ НИВЕЛИРОВАНИЯ

В Японии после сильного землетрясения обычно проводится нивелирование в эпицентральной зоне для точного определения

высот реперов. Таким образом, в Японии накопилось большое количество данных по деформациям земной поверхности, связанным с землетрясениями. Данные до 1933 г. были собраны Цубои [449].

Данные об изменениях высот по нивелированиям, проводимым до и после землетрясений, имеются также в США, СССР, Болгарии, Венгрии, Новой Зеландии, Австралии и других странах.

### 5.6.1. Нобийское землетрясение

В § 3.2 были даны краткие сведения о землетрясении 1891 г. в Ноби ( $M=7,9$ ). Было проложено две линии нивелирования по эпицентральной области к северу от Нагой, крупнейшего города Центральной Японии (рис. 5.42). Линии пересекают в точках  $d$  и  $e$  разлом Неодани, появившийся во время землетрясения. На рис. 5.42,  $a$  [449] нанесены также линии нивелировок в окрестностях Нагой.

На рис. 5.42,  $b$  показаны изменения высот, полученные по линиям  $a-d-b$  и  $a-e-c$  при сравнении результатов нивелировок 1895 и 1889 гг. Хорошо видны, кроме резкого изменения высот на разломе, деформации земной поверхности в окрестности разлома.

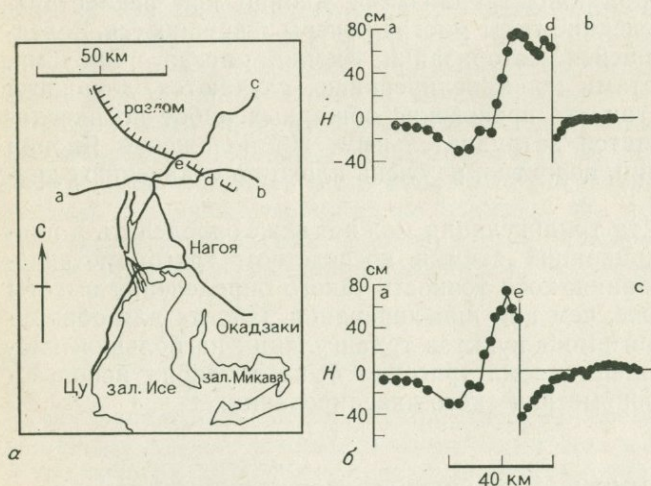


Рис. 5.42.  $a$  — карта нивелировок в окрестностях г. Нагой (Центральная Япония). Показан также разлом Неодани, появившийся во время Нобийского землетрясения 1891 г.  $b$  — изменения высот реперов по линиям  $a-d-b$  и  $a-e-c$  [449].

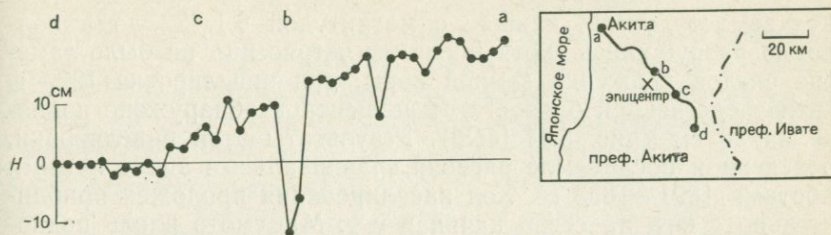


Рис. 5.43. Изменения уровня поверхности земли при землетрясении 1914 г. на горе Уго [192].

### 5.6.2. Землетрясение на горе Уго

В 1914 г. в префектуре Акита на северо-востоке Японии произошло землетрясение с магнитудой 6,4. Сообщалось, что погибло 94 человека и 640 домов полностью разрушено. Хотя непосредственно после землетрясения нивелирование не проводилось, при съемках в 1934 г. в эпицентральной зоне обнаружилось опускание поверхности земли, показанное на рис. 5.43 [192]. Изменения высот получены из сравнения нивелировок 1934 и 1900 гг.

### 5.6.3. Землетрясение в Омати

11 ноября 1918 г. город Омати (префектура Нагано в Центральной Японии, см. рис. 5.55) подвергся сильному воздействию

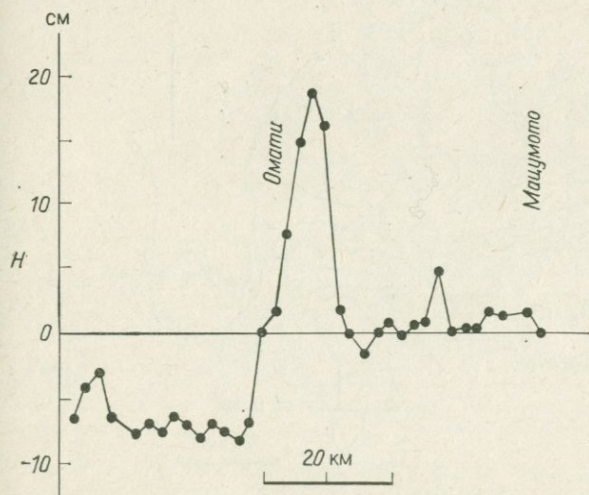


Рис. 5.44. Изменения уровня, связанные с землетрясениями 1918 г. в Омати [449].

двух землетрясений, каждое с магнитудой 6,1. 22 дома полностью разрушились. Хотя после землетрясения не было замечено следов движения земной коры, при нивелировке 1920 г. в непосредственной близости от эпицентров обнаружено поднятие на 20 см (рис. 5.44 [449]). Результаты этой нивелировки, проведенной после землетрясения, сравнивались с аналогичными работами 1891—1893 гг. Ход нивелирования проложен приблизительно с юга на север начиная с г. Мацумото вдоль подножия хребта, имеющего название «Японские Альпы» (см. рис. 5.55).

#### 5.6.4. Землетрясение в Канто

О разрушениях и социальных последствиях землетрясения в Канто было рассказано в § 3.3. Движения земной коры при землетрясении охватили очень большую площадь. Это видно из данных о горизонтальных смещениях, приведенных в § 5.3.1.

В результате повторного нивелирования по большому числу линий в Южном Канто обнаружилось, что берег залива Сагами и п-ова Миура и Босо (см. рис. 5.29) испытали поднятие более чем на 1 м [449]. Для выяснения общих закономерностей в картине поднятий и опусканий на такой большой площади удобнее использовать изменения высот пунктов триангуляции II и III классов, которые в противоположность линиям нивелирования образуют довольно густую сеть на юге Канто. Миябе [248] вычислил амплитуды вертикальных движений земной поверхности

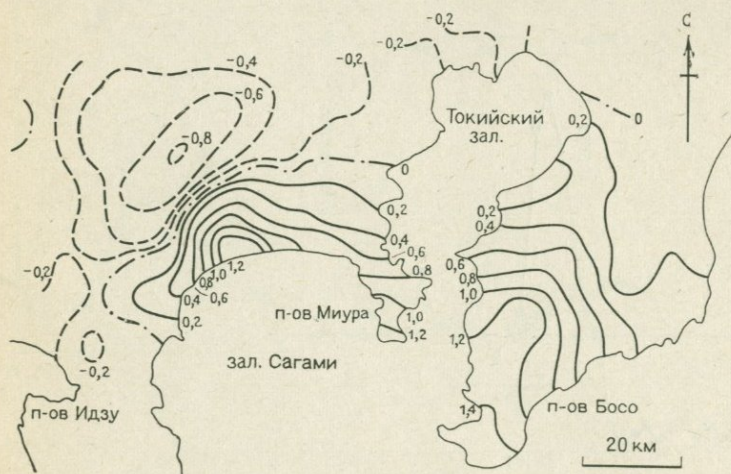


Рис. 5.45. Изменения высот (в м) в Южном Канто, связанные с землетрясением 1923 г. [248].

за 1889—1925 гг. по данным тригонометрического нивелирования для таких пунктов триангуляции. Его результаты приведены на рис. 5.45 в виде изолиний, полученных после осреднения по всем пунктам. Распределение вертикальных перемещений, показанное на рисунке, согласуется с моделью разрыва [20, 22], описанной в § 5.3.1.

### 5.6.5. Землетрясение в Танго

Это землетрясение (1927 г.) известно весьма детальными геодезическими работами, проведенными после него. Данные

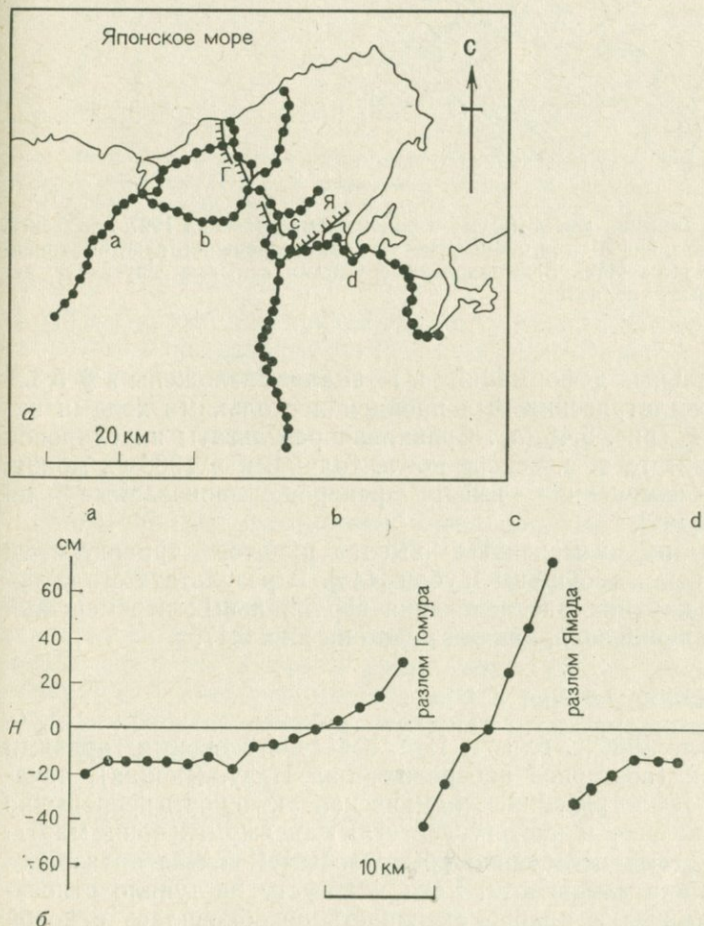


Рис. 5.46. а — ходы нивелирования в районе землетрясения 1927 г. в Танго. Г — разлом Гомура, Я — разлом Ямада [449]. б — изменения уровня вдоль линии а—б—с—д в связи с землетрясением 1927 г. в Танго [449].

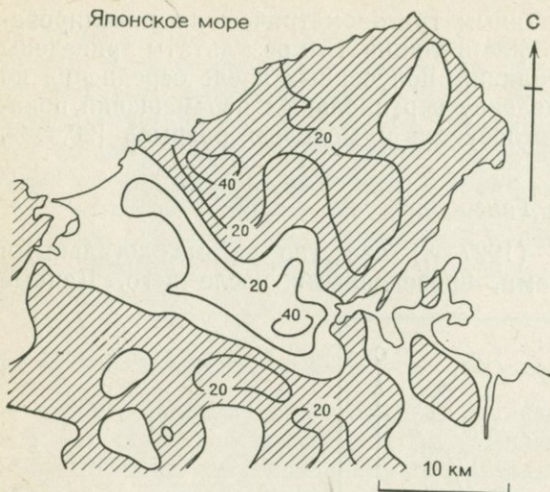


Рис. 5.47. Изменения высот (в см) в районе землетрясения 1927 г. в Танго, полученные по данным тригонометрического нивелирования пунктов триангуляции III класса [448]. Заштрихованные участки испытали опускание, незаштрихованные — поднятие.

о горизонтальных деформациях и их анализе изложены в § 5.3.2.

Район землетрясения был пройден несколькими ходами нивелирования (рис. 5.46, а). Сравнивая результаты нивелировок в апреле 1927 г., т. е. вскоре после толчка, и в 1888 г., можно получить изменения высот реперов, показанные на рис. 5.46, б [449].

Данные по изменениям высот пунктов триангуляции III класса были обобщены Цубои [448]. В результате стала ясной общая картина распределения вертикальных перемещений в эпицентральной зоне, как это видно на рис. 5.47.

#### 5.6.6. Рой землетрясений в Ито

В феврале 1930 г. близ г. Ито, известного своими горячими источниками (восточное побережье п-ва Идзу, Япония), началась серия землетрясений. Сейсмическая активность непрерывно нарастала по силе и частоте, достигла максимума в конце марта, после чего стала постепенно убывать. Затем в мае произошла новая вспышка активности. Хотя к августу наступило относительное затишье, в ноябре активность возобновилась с новой силой. Например, в один только день 25 ноября в Ито было зарегистрировано 690 толчков, а на следующий день произошло землетрясение в Северном Идзу ( $M=7,0$ ), уже описанное

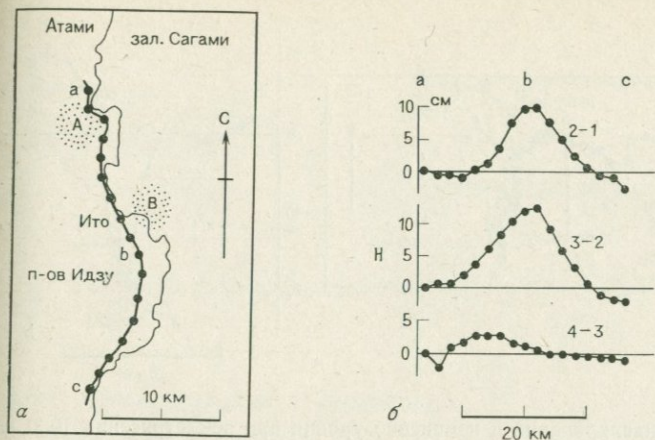


Рис. 5.48. а — ходы нивелирования вдоль восточного берега п-ва Идзу и эпицентральной области сейсмической активности осенью (А) и весной (В). б — изменения высот реперов в промежутках между нивелировками. Нивелирование № 1: 1923—1924 гг.; № 2: март—апрель 1930 г.; № 3: ноябрь 1930 г.; № 4: декабрь 1930 г.—январь 1931 г. [449].

в § 5.3.3. Частота повторения землетрясений во время описываемого периода активности показана на рис. 2.1 вместе с данными об улове рыбы в это время.

По просьбе ЕРИ Служба военных съемок провела повторное нивелирование вдоль восточного берега полуострова, как показано на рис. 5.48 [449], где нанесены также значения, на которые изменилась высота реперов за время, прошедшее между соответствующими повторными нивелировками. Первое нивелирование было проведено в 1923—1924 гг., второе — в марте—апреле 1930 г., третье — в ноябре 1930 г. и четвертое — в декабре 1930 г.—январе 1931 г. Сейсмометрические наблюдения показали, что во время осенней и весенней вспышек активности землетрясения в основном происходили соответственно в областях А и В. Интересно отметить, что в обоих случаях максимальные поднятия земной поверхности были приурочены к эпицентральной зонам.

#### 5.6.7. Землетрясение в Северном Идзу

При проведении линии нивелирования, пересекающей разлом Танна, который образовался при землетрясении в Северном Идзу (см. рис. 5.8), обнаружилось опускание поверхности до 20 см (рис. 5.49 [449]), происшедшее в период 1924—1930 гг. Ямагути [497] составил карту вертикальных деформаций по данным об изменениях высот пунктов триангуляции III класса.

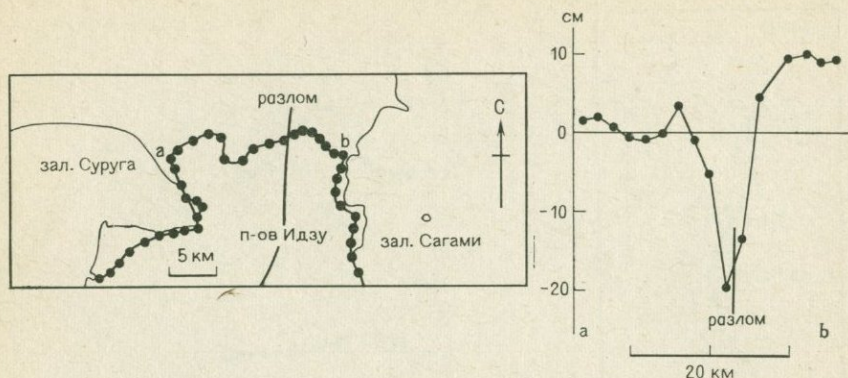


Рис. 5.49. Ход нивелирования и изменение уровня при землетрясении 1930 г. в Северном Идзу [449].

### 5.6.8. Землетрясение в Нагано

15 июля 1941 г. в нескольких километрах к северо-востоку от г. Нагано в Центральной Японии (см. рис. 5.55) произошло землетрясение с магнитудой 6,2. Согласно сообщениям, погибло 5 человек и 29 домов полностью разрушились. На рис. 5.50 [192] нанесены изменения высот реперов за периоды времени 1894—1928 гг. и 1928—1941 гг. вдоль линии нивелировки, идущей на северо-восток от Нагано. Изменения в течение второго из этих периодов должны отражать эффект землетрясения.

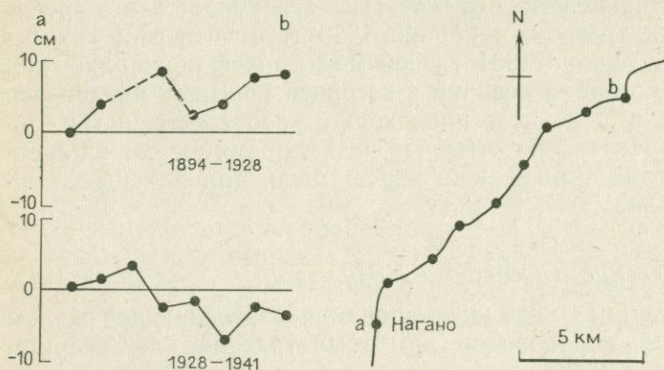


Рис. 5.50. Ход нивелирования и изменения уровня за периоды 1894—1928 гг. и 1928—1941 гг. По-видимому, изменения во второй период связаны с землетрясением 1941 г. в Нагано [192].

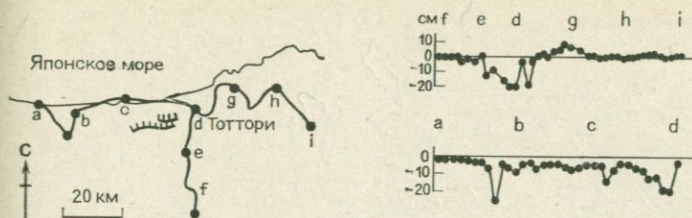


Рис. 5.51. Ходы нивелирования и изменения уровня при землетрясении 1943 г. в Тоттори [192].

### 5.6.9. Землетрясение в Тоттори

При землетрясении, происшедшем 10 сентября 1943 г. в Тоттори ( $M=7,4$ ), погибло 1083 человека и было полностью разрушено 7485 домов. Данные о горизонтальных смещениях пунктов триангуляции описаны в § 5.3.4.

При повторном нивелировании, произведенном в 1943 г. по линиям, показанным на рис. 5.51 [192], были обнаружены изменения высот реперов (рис. 5.51). Результаты по ходам  $f-d$ ,  $d-i$ ,  $a-d$  сравнивались с результатами работ соответственно 1935, 1927 и 1935 г.

### 5.6.10. Землетрясение в заливе Микава

В работе Андо [21] анализировались движения земной коры при землетрясении 1945 г. в заливе Микава, причем к данным об изменениях высот пунктов триангуляции по методу тригонометрического нивелирования были добавлены данные об изме-

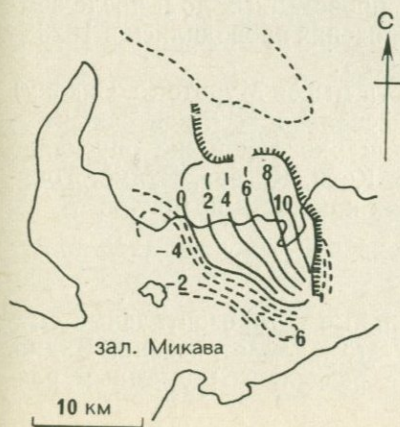


Рис. 5.52. Изменения уровня поверхности (в десятках сантиметров) в связи с землетрясением 1945 г. в заливе Микава [21].



Рис. 5.53. Изменения высот (в см) при Нанкайском землетрясении 1946 г. [100].

нениях глубин в заливе Микава. Таким образом, было получено общее распределение вертикальных смещений (рис. 5.52). Средний градиент убывания вертикальных смещений с удалением от разлома оказался равным  $1,3 \cdot 10^{-4}$ .

#### 5.6.11. Нанкайское землетрясение

В § 5.3.6 были даны краткие сведения о Нанкайском землетрясении 1946 г. (магнитуда 8,1). Там были приведены данные о горизонтальных движениях земной коры в связи с этим землетрясением.

На рис. 5.53 приведены значения поднятий и опусканий, полученные из нивелировок I класса, проведенных до и после землетрясения [100]. Съёмки до землетрясения проводились в 1928—1939 гг., а съёмка после него — в 1947 г.

Из рисунка видно, что оконечности мысов Мурото (о. Сикоку) и Кии (о. Хонсю) поднялись на несколько десятков сантиметров. Одновременно произошло примерно такое же опускание земной поверхности в префектурах Коти, Кагава, Ехиме, Токусима, Вакаяма и Мие, примыкающих к области поднятия.

#### 5.6.12. Фукуйское землетрясение

На рис. 5.15 показаны вертикальные и горизонтальные смещения пунктов триангуляции при этом землетрясении. Видно, что области поднятия и опускания разделены подземным разломом.

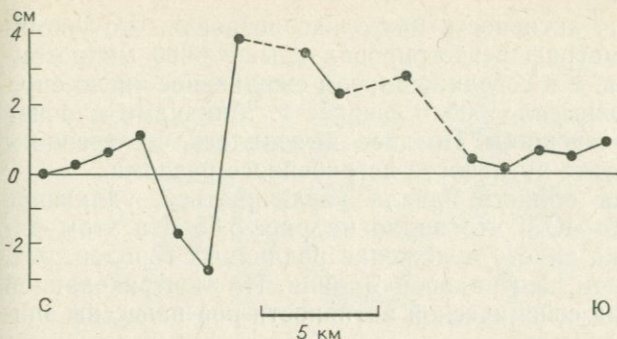


Рис. 5.54. Изменения уровня по субмеридиональной линии при землетрясении 1962 г. на севере Мияги [192].

### 5.6.13. Землетрясение на севере префектуры Мияги

30 апреля 1962 г. в 50 км к северу от Сендая на северо-востоке Японии произошло землетрясение с магнитудой 6,5. Согласно официальному сообщению, погибло 3 человека и разрушено 369 домов. При повторном нивелировании вдоль субмеридиональной линии выявились изменения высот реперов за период 1954—1962 гг. (рис. 5.54 [192]). Эпицентр землетрясения находился в 5 км от линии нивелирования. Наибольшее изменение высоты наблюдалось у ближайшего к эпицентру репера.

### 5.6.14. Мацусирские землетрясения

Микроземлетрясения в августе 1965 г. первой зарегистрировала Мацусирская сейсмологическая обсерватория, принадлежащая ЖМА. Эта обсерватория, расположенная в предместьях небольшого города Мацусиро, в 10 км к югу от Нагано в Центральной Японии, предназначена главным образом для записи сейсмических волн от удаленных землетрясений. Уровень сейсмической активности рос день ото дня, и к октябрю число микроземлетрясений, регистрируемых за сутки сейсмографом с увеличением  $10^4$ , достигло нескольких сотен. Участились и ощутимые толчки.

В районе г. Мацусиро была установлена сеть временных сейсмических станций. Выяснилось, что землетрясения происходили в пределах района с центром на горе Минаками, представляющей собой четвертичный дацитовый вулканический конус. Гипоцентры землетрясений располагались на глубинах от 2 до 5 км. После ноября время от времени стали происходить более сильные землетрясения, с магнитудами от 4 до 5.

В марте 1966 г. активность настолько возросла, что упомянутый выше сейсмограф регистрировал свыше 6000 микроземлетрясений в сутки, а в середине апреля ежедневное число ощутимых толчков превысило 600. Севернее г. Минаками в почве стали появляться трещины. Позднее выяснилось, что трещины возникли в результате активности погребенного разлома.

Эпицентральная область начала увеличиваться, удлиняясь в направлении СВ—ЮЗ, что видно на рис. 5.55. На этом рисунке можно также видеть положение различных городов, рек, гор в северной части Центральной Японии. На заштрихованной области проявления сейсмической активности роя нанесены эпи-

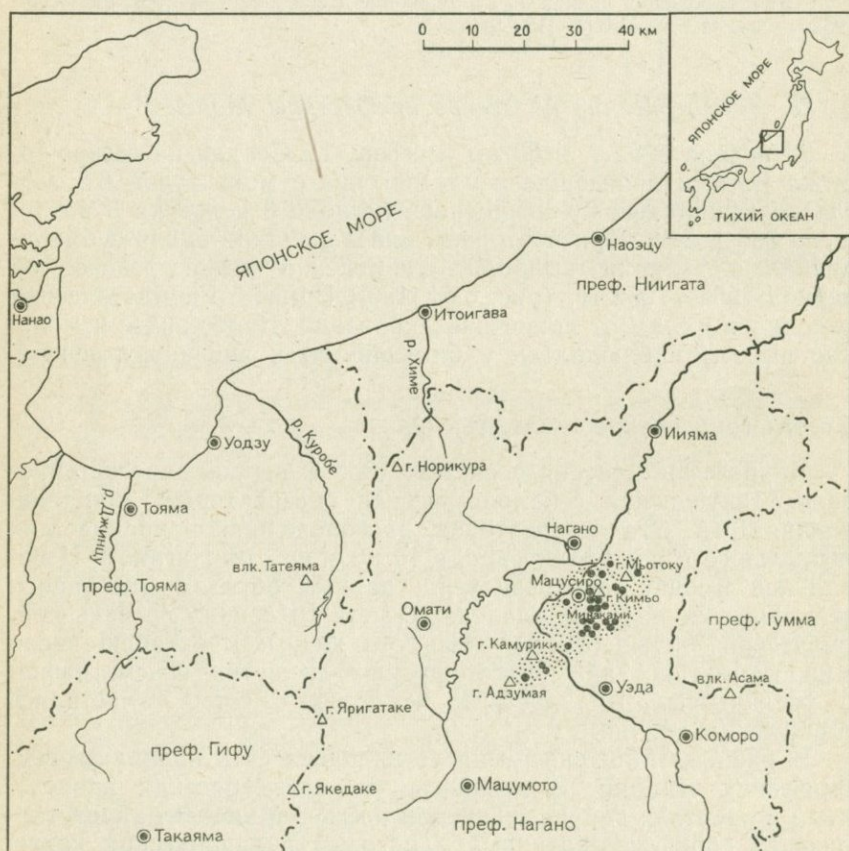


Рис. 5.55. Заштрихованный участок — район роя землетрясений 1965—1967 гг. с центром в Мацусиро. Наиболее сильные толчки ( $M \geq 4,7$ ) обозначены черными точками [137, фиг. 4].

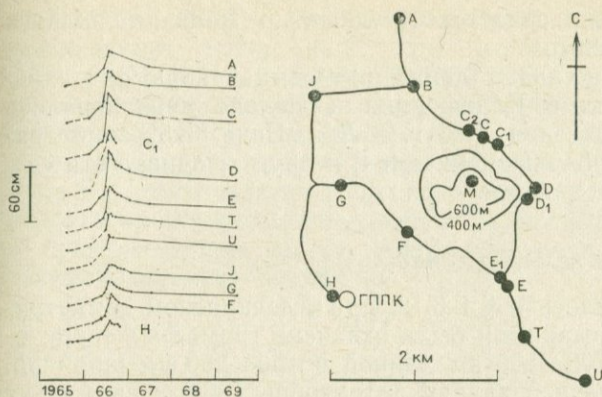


Рис. 5.56. Ходы нивелирования и изменения высот реперов вокруг горы Минаками (М), показанной с помощью горизонталей. Репер J расположен в центре г. Мацусиро. ГППК обозначает гравиметрический пункт первого класса, входящий в Мацусирскую сейсмологическую обсерваторию. Некоторые из реперов предназначены лишь для гравиметрических наблюдений (И. Хагивара, личное сообщение, 1974).

центры сравнительно сильных землетрясений (с магнитудами 4,7 и более).

Уровень активности несколько понизился в июне—июле, но в августе и сентябре опять возрос. Число микроземлетрясений не было столь большим, как в апреле, но процесс поднятия в районе горы Минаками ускорился, и в то же время из-за образования обильных подземных вод участились оползни. Согласно оценкам, объем воды в этой области составлял  $10^7$  м<sup>3</sup> [174].

ERI проводил нивелирование вокруг г. Минаками. Это делалось в тесном сотрудничестве с GSI. В результате вблизи горы Минаками было обнаружено значительное поднятие, более чем на 70 см. Результаты этих работ публиковались в ряде статей на японском языке; они обобщены в работе [302].

На рис. 5.56 показано изменение высот реперов в центральной области роя землетрясений. На этом рисунке исправлены некоторые ошибки в кривых, уже опубликованных ранее (И. Хагивара, личное сообщение, 1974).

#### 5.6.15. Землетрясение в Керн-Каунти

По счастливому стечению обстоятельств ходы нивелирования в районе Бейкерсфилд—Арвин были пройдены за несколько месяцев до землетрясения 1952 г. в Керн-Каунти (Калифорния). Как следует из рис. 5.21, севернее разрыва имеется понижение

земной поверхности, свидетельствующее о наличии надвига с левосторонним сдвигом.

Данные о вертикальных движениях земной коры при сильных землетрясениях в Калифорнии и Неваде публиковались также для землетрясения 1933 г. в Лонг-Биче [315], землетрясения 1954 г. близ Фэрвью-Пика [484] и других; однако эти сведения здесь не учитываются.

### 5.6.16. Аляскинское землетрясение

Как уже говорилось в § 5.3.12, при Аляскинском землетрясении 1964 г. деформациями была охвачена громадная территория [317]—около 700—800 км длиной и 150—250 км шириной.

За период времени с апреля по октябрь 1964 г. на Аляске силами Береговой и геодезической службы США была создана сеть нивелирования I класса общей протяженностью 1538 км [412]. В 1965 г. было пройдено еще несколько ходов нивелирования. Результаты сравнивали в совпадающих участках с нивелировками, выполненными в 1922—1923 и 1944 г. Оказалось, что район Сьюард—Анкоридж опустился на 1—2 м. Данные нивелирования имелись для очень ограниченной территории, видимо недостаточной для выявления общей обширной картины деформаций земной поверхности, сопровождавших это землетрясение.

Плафкер [317] провел измерения вертикальных движений вдоль берега моря, используя при этом свыше 800 измерений смещений прикрепленных морских организмов приливной зоны. Кроме того, на 16 приливных реперах имелись пары уровнемерных отсчетов (до и после землетрясения), произведенных Береговой и геодезической службой США. Максимальная величина поднятия на суше, равная 10 м, обнаружена на юго-западном конце о. Монтею. Распределение изменений уровня земной поверхности при этом землетрясении показано на рис. 5.57 [317]. Можно видеть, что основная область поднятия имеет длину примерно 800 км и простирается в северо-восточном направлении от южной части о. Кодьяк до пролива Принс-Вильям.

В статье Плафкера [317] даются три схематических профиля деформации поверхности (они приведены в нижней части рис. 5.57) для профилей  $A-A'$ ,  $B-B'$ ,  $C-C'$ , нанесенных на карту в верхней половине рисунка. Разрывы, возникшие при землетрясении, были обнаружены в двух местах на о. Монтею. Они оказались почти вертикальными и имеют характер взбросов.

Вполне вероятно, что это землетрясение было вызвано упругой отдачей в континентальной плите в связи с разрывом, возникшим на границе континентальной и океанической плит при погружении последней под Алеутскую островную дугу.

Плафкер [318] указал на удивительное сходство характера деформаций земной коры при Алякинском землетрясении 1964 г. и Чилийском ( $M=8,3$ ) 1960 г. Он делает вывод, что эти землетрясения возникли из-за внезапного снятия почти горизонтальных упругих деформаций сжатия, ориентированных перпендикулярно простирающимся восточного участка Алеутской дуги и южного участка Перуанско-Чилийской дуги. На главном надвиге произошло смещение на 20 м со средним углом наклона  $9^\circ$  под восточной частью Алеутской дуги и  $20^\circ$  под южной частью Перуанско-Чилийской.

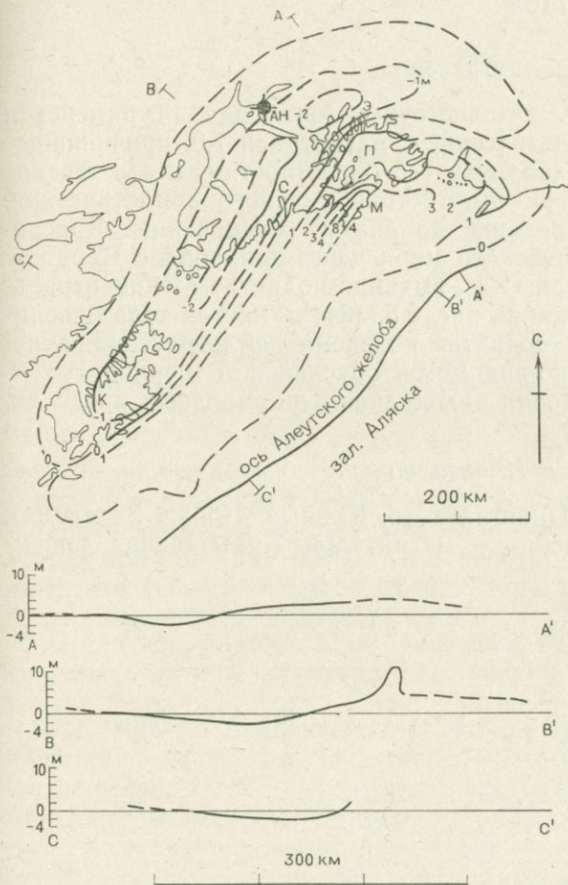


Рис. 5.57. Поднятия и опускания при Алякинском землетрясении 1964 г. Цифрами указаны вертикальные смещения (в м). В нижней части рисунка приведены результаты по профилям  $A-A'$ ,  $B-B'$ ,  $C-C'$ . АН — Анкоридж, Э — эпицентр, П — пр. Принс-Вильям, С — Сьюард, М — о. Монтегю, К — о. Кодьяк [317, фиг. 2 и 6].

### 5.6.17. Землетрясения на юге Болгарии

Рихтер [331] описал деформации земной поверхности при землетрясениях, происшедших 14 и 18 апреля 1928 г. на юге Болгарии; оба они имели магнитуду 6,8. Там образовались сбросы с наибольшей вертикальной амплитудой 3—4 м. В этой работе [331, стр 578] приводятся данные об изменениях уровня при этих землетрясениях, обнаруженных в результате высокоточных повторных нивелировок. Градиент убывания вертикальных смещений по мере удаления от разлома достигает значительной величины  $1,5 \cdot 10^{-4}$ .

### 5.6.18. Ашхабадское землетрясение

5 октября 1948 г. юго-восточнее Ашхабада (Туркменская ССР) произошло землетрясение с магнитудой 7,6, причинившее серьезный ущерб Ашхабаду и его окрестностям, где в течение нескольких столетий не было столь сильного землетрясения.

Повторное нивелирование по линии, соединяющей Красноводск на берегу Каспийского моря через Ашхабад с Чарджоу на востоке Туркменской ССР, выявило поднятие в эпицентральной области, показанное на рис. 5.58 [244]. Участок хода нивелирования, испытывавший поднятие во время землетрясения, в период 1895—1943 гг., по-видимому, опускался. В период 1952—1962 гг. изменения уровня находились в нормальных пределах.

### 5.6.19. Землетрясение в Инангахуа

24 мая 1968 г. в Инангахуа (о. Южный, Новая Зеландия) произошло землетрясение с магнитудой 7, вызвавшее значи-

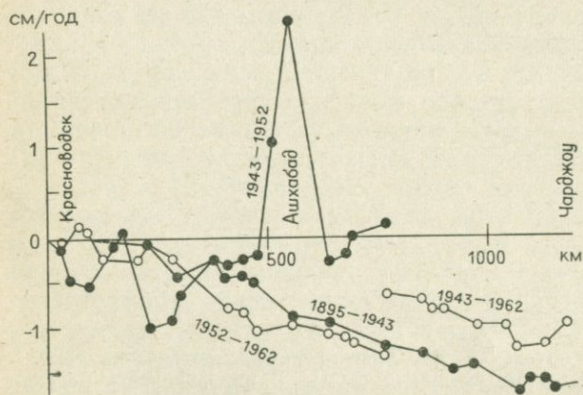


Рис. 5.58. Вертикальные движения земной коры по линии Красноводск—Ашхабад—Чарджоу (Туркменская ССР) [244].

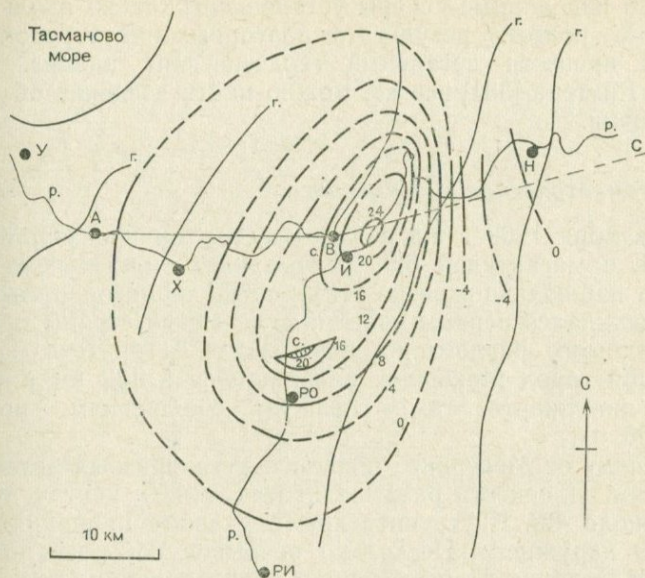


Рис. 5.59. Вертикальные деформации (в десятках сантиметров) при землетрясении 1968 г. в Инангауа. *р.*, *г.*, *с.* обозначают соответственно реки, геологические разломы и вновь появившиеся следы разломов на поверхности. *У* — Уэстпорт, *Х* — Хокс-Крэг, *И* — Инангауа, *Н* — Ньютон-Флэт, *РО* — Ротокоху, *РИ* — Рифтон [228].

тельные повреждения строений и путей сообщения [41, 229]. На земной поверхности появились два разлома с вертикальными и горизонтальными смещениями от нескольких сантиметров до 1 м (рис. 5.59). При региональном нивелировании обнаружилось, что имеется область площадью 1000 км<sup>2</sup>, испытывавшая поднятие в среднем на 1 м.

Амплитуды вертикальных движений на рис. 5.59 [229] были получены путем сопоставления результатов нивелирования и тригонометрических съемок для периодов 1954—1967 и 1968—1969 гг. В цитированной работе приведен профиль вертикальных деформаций по линии *А—В—С*. Полученные оценки среднего градиента убывания вертикальных деформаций с расстоянием равны  $2,0 \cdot 10^{-4}$  и  $4,0 \cdot 10^{-4}$  соответственно для западного и восточного участков профиля с центром в Инангауа.

На территории, показанной на рис. 5.59, были обнаружены также значительные горизонтальные перемещения, достигавшие нескольких десятков сантиметров.

Многие сильные землетрясения, происшедшие в Новой Зеландии до 1942 г., описаны в книге Рихтера [331]. В Новой

Зеландии нивелирные реперы установлены только вдоль железных дорог, поэтому результаты повторных нивелировок не позволяют провести детальный геодезический анализ. Однако в книге Рихтера [331] все же можно найти сведения об изменениях уровня.

### 5.6.20. Землетрясение в Мекеринге

14 октября 1968 г. на западе Австралии произошло землетрясение с магнитудой 6,9. Толчок имел наибольшую балльность из наблюдавшихся до этих пор на территории Австралии и сопровождался первым известным для этой страны образованием видимого разлома на поверхности [114]. Был разрушен небольшой город Мекеринг, находящийся в 132 км к ВСВ от Перта, но жертв там, согласно сообщениям, не было (рис. 5.60, а).

К западу от Мекеринга появился дугообразный разлом длиной 37 км. Плоскость разрыва падает вниз к центру дуги под углом около  $40^\circ$ . Внутреннее крыло разлома приподнято относительно наружного. Несколько разрывов покороче появилось вблизи Мекеринга. При повторном нивелировании вдоль дороги, идущей приблизительно в широтном направлении, обнаружилось изменение уровня, показанные на рис. 5.60, б [114]. Максимальная вертикальная высота сброса достигала 2 м непосредственно к югу от Мекеринга. Распределение вертикальных деформаций изображено в изолиниях на рис. 5.61.

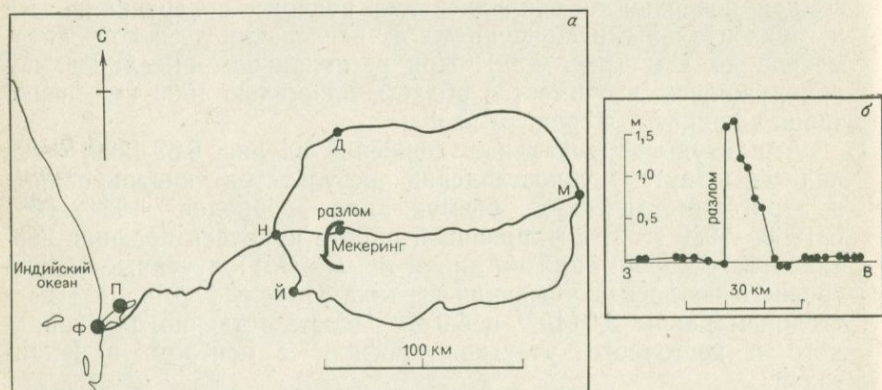


Рис. 5.60. а — разлом Мекеринг, образовавшийся при землетрясении 1968 г., и ход нивелирования. Ф — Фримантл, П — Перт, Н — Нортем, Д — Дауэрин, М — Мерредин, Й — Йорк. б — изменения уровня по субширотной линии, проходящей от Нортема до Мерредина, вызванные Мекерингским землетрясением 1968 г. [114].

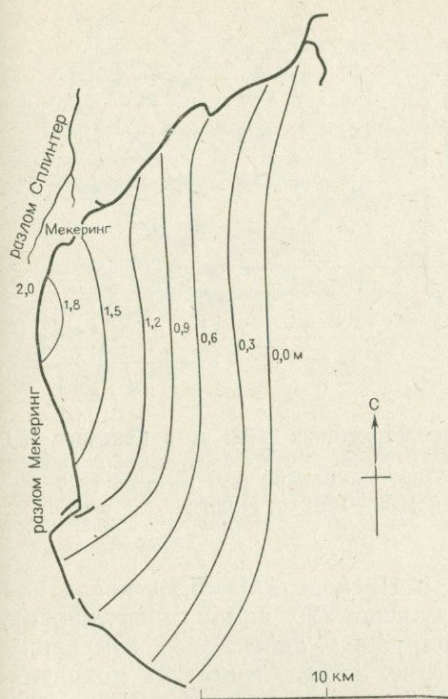


Рис. 5.61. Карта изолиний изменения уровня при Мекерингском землетрясении 1968 г. [114].

## 5.7. АНОМАЛЬНОЕ ПОДНЯТИЕ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ ПЕРЕД ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯМИ

В ряде случаев, проводя повторное нивелирование, удавалось заметить деформации земной поверхности перед землетрясениями.

### 5.7.1. Землетрясения в Секихаре и Нагаоке

По случайному стечению обстоятельств за два месяца до землетрясения с магнитудой 5,3, происшедшего в октябре 1927 г. в Секихаре, небольшом городке недалеко от Нагаоки (префектура Ниигата, Япония), было проведено нивелирование по линии, показанной на рис. 5.62. Сравнение результатов этих измерений и нивелирования, выполненного в 1894 г., показало, что за указанный 33-летний период произошло поднятие земной поверхности (рис. 5.62). Повторное нивелирование, проведенное сразу же после землетрясения, позволило обнаружить дополнительное поднятие за трехмесячный период, во время которого произошло землетрясение [449, 192].

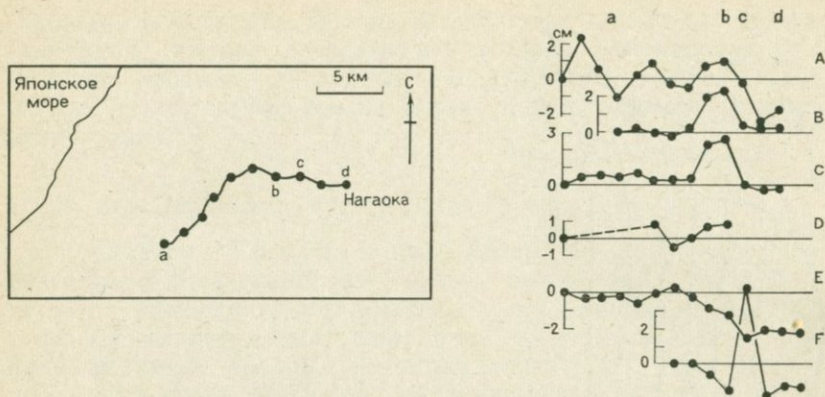


Рис. 5.62. Изменения уровня при землетрясениях 1961 г. в Секихаре (*b*) и Нагаоке (*d*). Графики *A, B, C, D, E, F* соответствуют следующим периодам времени: 1894 г.— июль 1927 г., июль 1927 г.— ноябрь 1927 г., июль 1927 г.— 1930 г., 1930—1955 г., 1955—1958 г. и 1958—1961 г. [192].

При землетрясении 1961 г. в Нагаоке ( $M=5,2$ ), когда погибло 5 человек и было разрушено 220 домов, нивелировки 1955 и 1958 г. позволили обнаружить anomальное изменение высот в эпицентральной зоне (рис. 5.62). Амплитуда поднятия составила 4 см. Эти предвестники землетрясений в Секихаре и Нагаоке были обнаружены после землетрясения, ибо величина вариаций была мала. Эти примеры вселили в японских сейсмологов надежду, что перед более сильными землетрясениями должны обнаружиться вариации большей амплитуды.

### 5.7.2. Тонанкайское землетрясение

Для Тонанкайского землетрясения 1944 г. ( $M=8,0$ , 998 погибших и 26 130 полностью разрушенных домов) не имеется надежных данных, так как это был трудный период конца второй мировой войны. Несколько лет назад при просмотре сотрудниками GSI записей о геодезических работах, проведенных во время войны, был обнаружен следующий интересный факт.

7 декабря 1944 г., в день, когда произошло землетрясение (в 13 ч 36 мин местного времени примерно в 150 км к юго-западу от г. Какегава, см. рис. 5.31), в окрестностях Какегавы (префектура Сидзуока) вблизи тихоокеанского побережья Центральной Японии производилось нивелирование. Оно велось с 10 до 12 ч дня по линии севернее Какегавы. При обработке данных получилась невязка, равная 9 мм на 2 км хода, что слишком много для ошибки измерений. Было выдвинуто предполо-

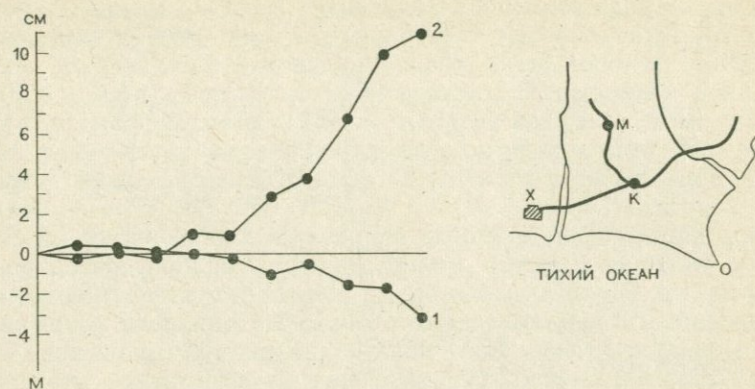


Рис. 5.63. Ход нивелирования близ мыса Омаэ и вариации уровня по линии М—К. Вариация 1 имела место за время март 1934 г.—ноябрь 1944 г., а вариация 2 — за время ноябрь—декабрь 1944 г. Тонанкайское землетрясение произошло 7 декабря 1944 г. X—Хамамацу, М—Микура, К—Какегава, О—м. Омаэ [102].

жение, что во время работ происходил наклон поверхности в северном направлении.

Сразу же после землетрясения было проведено повторное нивелирование по профилю длиной 20 км от Какегавы на север до Микуры. К большому удивлению наблюдателей, оказалось, что за период с ноября по декабрь, во время которого произошло землетрясение, Какегава поднялась на 11 см относительно Микуры (рис. 5.63 [102]).

На том же рисунке показано опускание Какегавы относительно Микуры на несколько сантиметров за период с 1934 г. по ноябрь 1944 г. Обобщение результатов нивелирования по гораздо большей территории позволяет с уверенностью утверждать, что скорость опускания в районе Какегава—мыс Омаэ, который постепенно опускался на протяжении многих лет, начала снижаться примерно за 10 лет до землетрясения, а за несколько часов до него началось внезапное поднятие этого района. Результаты цитированной работы позволяют почти с несомненной уверенностью считать, что существовал предвестник Тонанкайского землетрясения в виде поднятия земной поверхности.

### 5.7.3. Ниигатское землетрясение

Вероятно, одним из наиболее ярких примеров предвестников, обнаруженных в результате повторного нивелирования, является поднятие поверхности перед Ниигатским

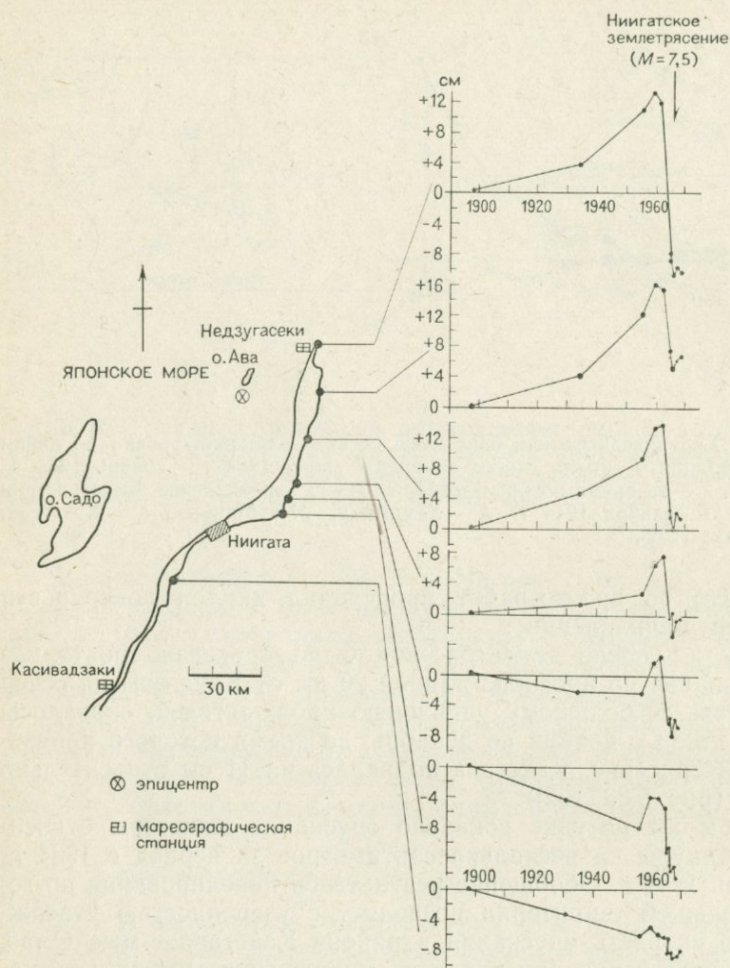


Рис. 5.64. Изменения высот реперов перед землетрясением 1964 г. в Ниигате и после него [67].

землетрясением 1964 г. ( $M=7,5$ ), при котором погибло 26 человек и 1960 домов было полностью разрушено.

Начиная с 1898 г. был проведен целый ряд повторных нивелировок по линии, проходящей вдоль берега Японского моря через г. Ниигата. Предполагалось, что выкачивание из равнинного района больших количеств воды, содержащей природные газы, приводит к опусканию поверхности. Для проверки этого

факта начиная с 1954 г. через небольшие интервалы времени проводилось повторное нивелирование. На рис. 5.64 [67, 455] видны постепенные изменения уровня, происходящие с 1900 г. В 1954 г. они значительно убыстрились. Аномальное поднятие достигло максимума в 1959 г., продержалось на этом уровне несколько лет, а затем произошло землетрясение. Во время самого землетрясения реперы испытали значительное опускание.

Если бы внезапное изменение скорости деформации земной поверхности являлось предвестником, предупреждение о том, что готовится землетрясение, имелось бы за 5—10 лет до него. Некоторые японские сейсмологи хорошо знали об обнаруженных аномальных движениях земной коры, но официально о возможности землетрясения ничего не сообщалось, поскольку в то время не знали, следует ли считать этот факт предвестником.

#### 5.7.4. Ташкентское землетрясение

Город Ташкент (Узбекская ССР) 25 апреля 1966 г. сильно пострадал от землетрясения с магнитудой 5,5. На рис. 5.65 [244] показаны изменения высот в четырех пунктах в районе Ташкента. Пункты *А* и *Б*, расположенные близко к эпицентру, с 1900 г. испытывали поднятие. Примерно в 1940 г. знак

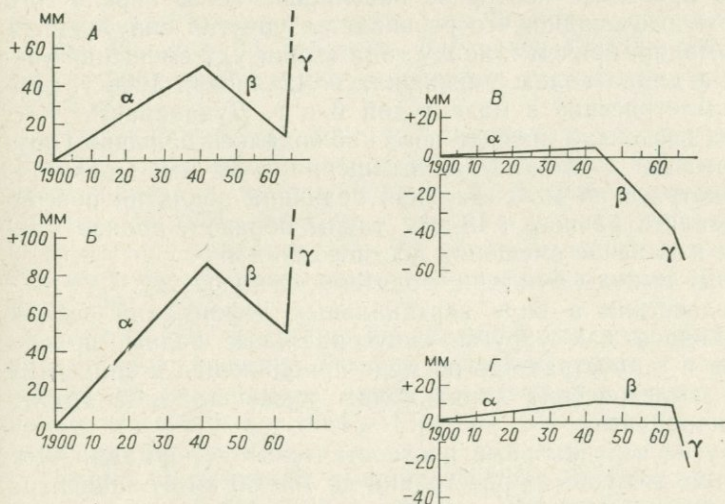


Рис. 5.65. Три фазы деформаций земной коры, обнаруженные при анализе изменений высот в четырех пунктах. Пункты *А* и *Б* расположены в эпицентральной зоне Ташкентского землетрясения 1966 г., *В* и *Г* — вдали от эпицентра [244].

движения изменился и началось опускание. В период сейсмической активности снова началось поднятие, но со скоростью, в 10—20 раз большей прежней. В пунктах *В* и *Г*, расположенных далеко от эпицентральной зоны, изменения высот были невелики. Но смена поднятий и опусканий была по характеру такой же, как в пунктах *А* и *Б*.

Обобщение большого числа изменений уровня в ряде стран привело Мещерякова [244] к выводу о существовании трех фаз движений земной коры в сейсмических областях, а именно: 1) медленные движения в период между вспышками сейсмической активности ( $\alpha$ -фаза); 2) движения, предвещающие готовящееся землетрясение ( $\beta$ -фаза); 3) движения, вызванные самим землетрясением ( $\gamma$ -фаза). Эти фазы отмечены и на рис. 5.65.

### 5.7.5. Землетрясение в Дунахарати

Согласно Ленсену [228], самым ярким примером процесса вертикальных деформаций, происходящих до и после землетрясения, является случай, описанный Бендефи [34]. Цитируем по статье Ленсена [228]:

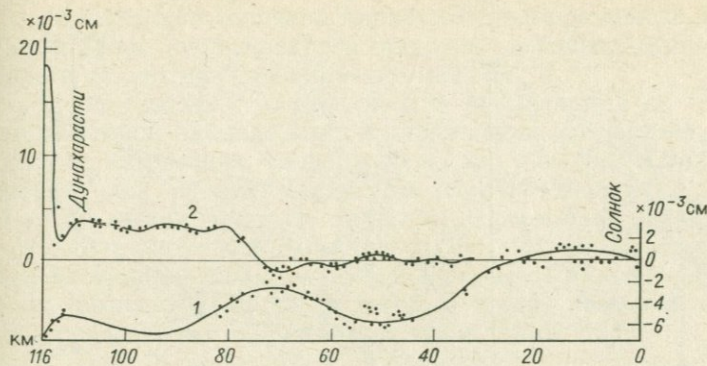
«В начале 1955 г. при проведении нивелирования в Венгрии были обнаружены большие невязки, более чем в 10 раз превышающие допустимые значения. На некоторых отрезках полигона длиной 450 км через короткие интервалы времени четыре раза было проведено повторное нивелирование. В апреле того же года стало очевидно, что развивается упругая синусоидальная деформация, причем к концу года амплитуда смещения увеличилась, а длина волны уменьшилась. 12 января 1956 г. произошло землетрясение с магнитудой 6 в г. Дунахарати, т. е. там, где за несколько дней до него наблюдались большие упругие деформации с амплитудой смещения —55 мм. Сразу же после землетрясения максимальная величина поднятия поверхности оказалась равной +43 мм; таким образом, полное максимальное изменение смещений достигло 98 мм.

Основные выводы Бендефи сводятся к следующему.

1) Предвестник в виде вертикальных деформаций земной коры проявился как упругие синусоидальные волны, причем во времени и в пространстве по мере приближения к эпицентру будущего землетрясения длина волны уменьшалась, а амплитуда увеличивалась.

2) Упругие вертикальные прогностические деформации земной коры имели место на расстоянии до 70—80 км от эпицентра будущего землетрясения.

На графике рис. 5.66 нанесены скорости прогностических (1) и происходивших одновременно с землетрясением (2) вертикальных деформаций при землетрясении в Дунахарати.



Р и с. 5.66. Вертикальные деформации (в  $10^{-3}$  см/сут) при землетрясении в Дунахарести [34, 228]: 1 — предвестники, 2 — сопровождающие землетрясения.

### 5.7.6. Землетрясение в Сан-Фернандо

В работе [59] сообщается об изменениях высот перед землетрясением 9 февраля 1971 г. в Сан-Фернандо ( $M=6,4$ ). Эпицентр землетрясения располагался в районе горного хребта Сан-Габриель, имеющего субширотное простирание; глубина очага равнялась 8 км. Разрушения в районе Сан-Фернандо (округ Лос-Анджелес) были значительными, так как эпицентральное расстояние в центре Сан-Фернандо составляло всего 14 км. Погибло 64 человека. Восточнее Сан-Фернандо на поверхности появились два взбросовых нарушения, каждое длиной 2 км.

Изучение результатов нивелирования за период 1961—1964 гг. позволило выявить южнее Палмдейла, примерно в 28 км от эпицентра в направлении ВСВ, поднятие поверхности на 207 мм. За 1961—1968 гг. в 13 км к юго-западу от эпицентра обнаружено поднятие на 96 мм; аналогичное поднятие на 129 мм в 30 км северо-восточнее эпицентра имело место за период 1964—1968 гг.

На рис. 5.67 показаны изменения высот ряда реперов в зависимости от времени. Там же приведена карта с ходами нивелирования. Эти данные взяты из графика в статье [59]. Ясно видно, что начиная с 1964 г. в районе Сан-Фернандо земная поверхность поднималась.

Кроме приведенных выше примеров, имеются еще два случая предвестников, обнаруженных методом повторного нивелирования. Они описаны в работе Цубокавы [453] и относятся к землетрясениям 1961 г. в Северном Мино,  $M=7,0$ , и 1967 г. в Оми,  $M=5,0$  (оба в Центральной Японии).

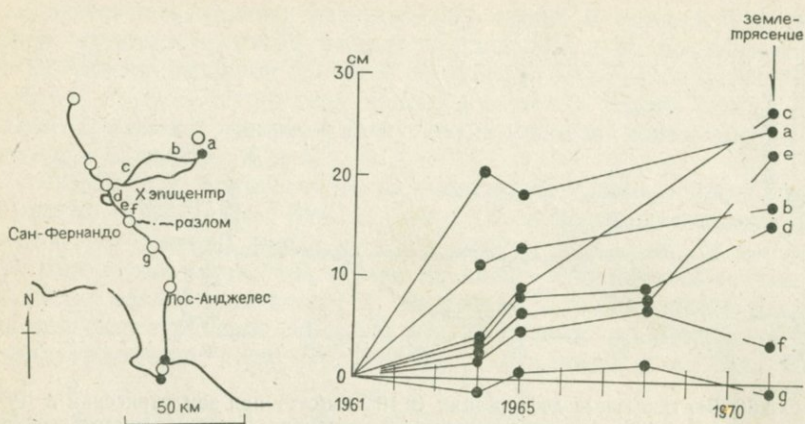


Рис. 5.67. Изменения высот реперов при землетрясении 1971 г. в Сан-Фернандо [59].

### 5.8. ЗАВИСИМОСТЬ МЕЖДУ МАГНИТУДОЙ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ И ПЛОЩАДЬЮ ПОВЕРХНОСТИ, ОХВАЧЕННОЙ ДЕФОРМАЦИЯМИ

Было замечено, что, чем больше магнитуда землетрясения, тем больше площадь поверхности, на которой проявляются деформации, связанные с подготовкой землетрясения. В работе Дамбары [66] предложена эмпирическая зависимость между магнитудой землетрясения  $M$  и средним радиусом  $r$  (в см) области деформаций земной коры:

$$\lg r^3 = 8,18 + 1,53M, \quad (5.11)$$

которую можно переписать еще в виде

$$M = 1,96 \lg r + 4,45, \quad (5.12)$$

если  $r$  измерять в км.

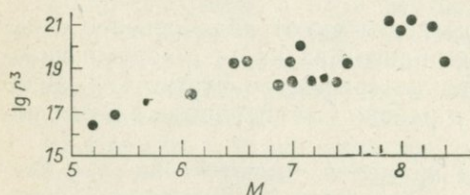


Рис. 5.68. Зависимость  $\lg r^3$  от  $M$ , где  $r$  — эффективный радиус (в см) той области, где наблюдались аномальные движения земной коры, связанные с землетрясением [66].

На рис. 5.68 показана эмпирическая зависимость десятичного логарифма куба среднего радиуса деформированной поверхности от магнитуды землетрясения  $M$ .

Если считать, что деформации проявляются на поверхности, под которой накапливаются напряжения, связанные с подготовкой землетрясения, то формулу (5.11) или (5.12) можно использовать для оценки магнитуды подготавливаемого землетрясения по площади прогностических деформаций земной коры [66, 340, 341]. Формула Дамбары (5.11) или (5.12) была получена чисто эмпирическим путем, а в работе Рикитакэ [352] предложен физический процесс, который может привести к этой формуле, на основе модели дилатансии (см. § 14.1).

### 5.9. НЕСЕЙСМИЧЕСКИЕ ДЕФОРМАЦИИ ЗЕМНОЙ КОРЫ

Движения земной коры не обязательно связаны с сильными землетрясениями. Например, послеледниковые поднятия Скандинавии не приводили к возникновению сильных землетрясений. Даже в такой сейсмичной стране, как Япония, наблюдались движения земной коры, не имевшие никакой связи с землетрясениями.

Так, во время Мацусирского роя землетрясений было отмечено несколько случаев поднятия земной коры на площади в несколько километров в поперечнике, обнаруженных при повторных нивелировках; однако никаких землетрясений вблизи этих поднятий не произошло.

Вероятно, при некоторых видах деформаций земной коры основную роль играет пластичность коры, и в таком случае внезапного разрыва в коре не произойдет. Пока еще физическая природа таких пластических деформаций нам не ясна полностью, но деформации земной коры, захватывающие большие территории, несомненно могут иметь и несейсмическое происхождение.

Если наблюдаются аномальные деформации земной коры, то еще совершенно не ясно, связаны ли они с землетрясениями. Однако обычно считается, что движения со скоростями свыше 1 см/год вполне могут быть связаны с сейсмической активностью. Поэтому для целей предсказания землетрясений важно уметь обнаруживать движения земной коры во время  $\beta$ -фазы (см. § 5.7.3 и работу Мещерякова [244]). Медленные движения с малыми скоростями, которые Мещеряков называет  $\alpha$ -фазой, могут не быть непосредственно связаны с сейсмичностью, хотя и на этой стадии должен происходить процесс накопления деформаций.

## ДЕФОРМАЦИИ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ ОТНОСИТЕЛЬНО УРОВНЯ МОРЯ

### 6.1. АНОМАЛЬНЫЙ МОРСКОЙ ОТЛИВ ПЕРЕД ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЕМ

В ряде японских исторических документов имеются сообщения об аномальных морских отливах перед землетрясениями. Такие отливы, по-видимому, происходили на ограниченной части побережья. А потому весьма вероятно, что имели место лишь локальные поднятия земной поверхности относительно уровня моря. Материалы об этих отливах на английском языке можно найти в книге Имамуры [177].

#### 6.1.1. Адзигасавское землетрясение

Один из самых замечательных примеров предвестника в виде морского отлива является отлив при Адзигасавском землетрясении ( $M=6,9$ ), происшедшем в самой северной части о. Хонсю в 1793 г. Толчок возник в 14 ч 00 мин местного времени. Жители, заметившие утром необычайный отлив моря, так боялись цунами, что убежали в горы, где днем ощутили сильный толчок. Люди в ужасе прибежали обратно к берегу, где на них обрушилось пришедшее через некоторое время цунами. Несколько детей было унесено громадными волнами. Из рассказа об этих событиях видно, что за несколько часов до землетрясения произошло аномальное поднятие земной поверхности.

#### 6.1.2. Землетрясение на о. Садо

При землетрясении 1802 г. ( $M=6,6$ ), происшедшем недалеко от о. Садо (см. рис. 5.64) в Японском море к северу от префектуры Ниигата, в гавани Оги в 10 ч 00 мин местного времени был замечен сильный отлив. Обычно глубина воды в этом месте такова, что в гавань могут входить довольно большие корабли. Поскольку во время этого отлива произошло сравнительно сильное землетрясение, местные жители опасались прихода цунами. Тем временем на острове произошел основной толчок, разрушивший много домов.

#### 6.1.3. Землетрясение в Хамаде

В течение нескольких дней перед землетрясением 1872 г. в Хамаде ( $M=7,1$ ) ощущались слабые толчки и дрожание

почвы. Город Хамада находится в префектуре Симане, на западе о. Хонсю на берегу Японского моря. Согласно сообщениям, отлив был столь значительным, что можно было дойти до острова, находящегося на расстоянии 140 м от берега, и на обнажившемся пляже люди собирали раковины. Через несколько десятков минут произошло сильное землетрясение и на берег обрушилось огромное цунами.

По-видимому, отлив происходил вдоль нескольких десятков километров побережья. В противоположность землетрясениям в Адзигасаве и на о. Садо, описанным выше, это землетрясение произошло уже в цивилизованное время, и в Хамаде действовала метеорологическая станция, так что сообщениям об этом землетрясении вполне можно верить. По всей вероятности, перед землетрясением земная поверхность в окрестностях Хамады поднялась примерно на 2 м.

#### *6.1.4. Землетрясение в Танго*

Сообщалось, что за несколько часов до землетрясения 1927 г. в Танго ( $M=7,5$ ) в некоторых местах эпицентральной зоны наблюдалось понижение уровня моря приблизительно на 1 м. Сообщения поступили из нескольких деревень от рыбаков, которые видели выступившие из воды рифы, обычно скрытые под поверхностью моря.

Необходимо отметить, что четыре приведенных примера аномальных морских отливов наблюдались на берегу Японского моря, где приливные явления вообще слабо выражены. Не ясно, связано ли это со слабостью приливов или с особенностями происходящих там землетрясений.

Вызывает некоторое удивление и тот факт, что после повсеместной установки мареографических станций такие отливы не наблюдались. Автору не известен ни один пример морского отлива перед землетрясениями, который был бы зарегистрирован вне Японии.

## 6.2. УРОВНЕМЕРНЫЕ НАБЛЮДЕНИЯ

### *6.2.1. Помехи при наблюдениях вертикальных движений земной поверхности*

Наблюдения за уровнем моря в настоящее время ведутся при помощи мареографов. Стандартная модель мареографа работает по принципу записи вертикальных движений поплавка, плавающего на поверхности воды в колодце, сообщающемся с морем. Это устройство позволяет гасить короткопериодные

волны. В другой модели мареографа измеряются изменения давления воды на морское дно.

В § 4.2.3 отмечалось, что вдоль береговой линии Японских о-вов сейчас действует 80 мареографических станций, отстоящих друг от друга примерно на 100 км.

На высоту уровня моря оказывают влияние различные факторы окружающей среды,—такие, как атмосферное давление, температура воды, ветер, океанские течения и т. д. В октябре 1971 г. на тихоокеанском побережье Японии наблюдался аномально высокий прилив, превышающий нормальный уровень на 20 см. Это явление наблюдалось около недели, но не имело никакой связи с сейсмичностью, и океанографы не нашли ему никакого объяснения.

Чтобы устранить помехи уровнемерных наблюдений, возникающие от подобных океанографических и метеорологических источников, обычно находят разность уровней моря в соседних мареографических пунктах. При этом предполагается, что помехи влияют на записи приборов в обоих пунктах приблизительно одинаково. Однако на практике даже после применения этого способа все же остается некоторый уровень помех, вероятно порядка нескольких сантиметров.

### 6.2.2. Изменения уровня моря перед землетрясением и в период землетрясения

Как видно из рис. 5.64, недалеко от эпицентральной зоны Нингатского землетрясения 1964 г. имеются две мареографические станции: Недзугасеки и Касивадзаки. На рис. 6.1 показаны

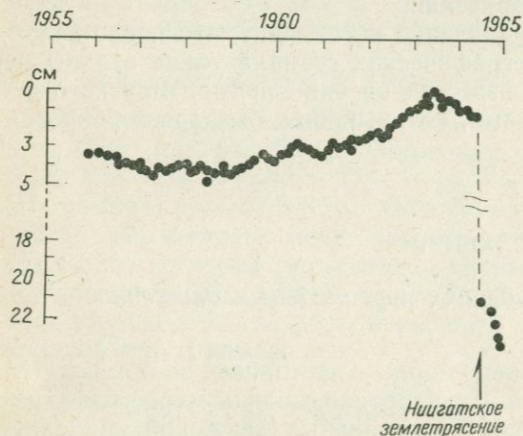


Рис. 6.1. Изменение среднего месячного уровня моря на станции Недзугасеки относительно Касивадзаки [455].

изменения средних месячных разностей уровней моря, полученных из записей приливов на этих двух станциях [455]. Видно, что начиная примерно с 1958 г. поверхность земли в Недзугасеки поднялась на несколько сантиметров относительно земной поверхности в Касивадзаки. Это поднятие находится в удовлетворительном согласии с результатами повторных нивелировок. В середине 1963 г. земная поверхность в Недзугасеки начала опускаться, и спустя год произошло Ниигатское землетрясение. Во время основного толчка уровень моря резко изменился.

Из вариаций, показанных на рис. 6.1, нельзя сделать никаких определенных выводов из-за помех, обусловленных изменениями уровня моря, о которых говорилось выше. Однако смена знака градиента за год перед землетрясением могла иметь прогностическое значение. При сильных землетрясениях часто наблюдались резкие изменения уровня моря, но об изменении уровня как предвестнике землетрясения сообщалось редко.

Цумура [456, 457], проанализировав громадный наблюдательный материал приливных наблюдений, накопленный в Японии за много лет, пришел к выводу, что о прогнозировании землетрясений с помощью записей приливов следует говорить с осторожностью.

### 6.2.3. Сопоставление результатов нивелирования и уровневых наблюдений

Было бы интересно сравнить изменения уровня моря с изменениями высот, полученными при повторных нивелировках. Результаты нивелирования по длинным ходам могут быть искажены накопленными ошибками, поэтому важно проверять результаты нивелирования посредством уровневых наблюдений. На рис. 6.2 показаны изменения высоты репера на мареографической станции в Абурацубо на оконечности п-ва Миура (Южный Канто, см. рис. 5.29) относительно мареографического пункта в Иокогаме, находящейся в 30 км севернее Абурацубо. На этом же рисунке показаны изменения среднегодового уровня моря в Абурацубо относительно мареографического пункта в Иокогаме, где, правда, запись велась начиная лишь с 1960 г.

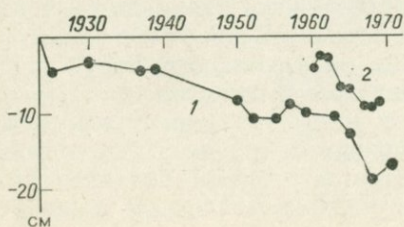


Рис. 6.2. Жирной линией (1) нанесены изменения уровня земной поверхности в Абурацубо относительно Иокогамы по результатам повторного нивелирования, а тонкой (2) — разности среднегодовых уровней моря в тех же двух пунктах [94].

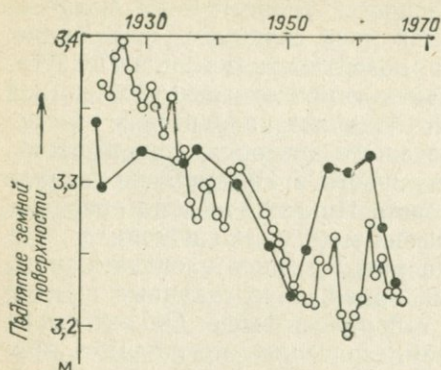


Рис. 6.3. Сплошными кружками показаны изменения высоты репера в Абурацубо по отношению к опорному реперу в Токио, полученные по результатам повторного нивелирования, а светлыми кружками — изменения среднегодового уровня моря на уровнемерном пункте в Абурацубо [101].

Видно, что данные о движениях земной коры, полученные с помощью метода повторного нивелирования, довольно хорошо согласуются с данными наблюдения приливов [94].

В работе [101] дается сопоставление изменений высоты репера в Абурацубо по отношению к опорному реперу в Токио и изменений высот в этих же пунктах по мареографическим наблюдениям. Как видно из рис. 6.3, обе кривые в общем согласуются друг с другом. Расстояние от Абурацубо до Токио равно 60 км. Однако ясно, что кривая уровнемерных наблюдений подвержена короткопериодным флуктуациям, которые, вероятно, имеют метеорологическое и океанографическое происхождение.

## НЕПРЕРЫВНЫЕ НАБЛЮДЕНИЯ ДВИЖЕНИЙ ЗЕМНОЙ КОРЫ

Повторные геодезические съемки безусловно полезны для обнаружения предваряющих и сопровождающих землетрясение деформаций земной коры: об этом было подробно сказано в гл. 5. Однако, поскольку съемки представляют собой прерывистые наблюдения, одними геодезическими методами невозможно вести непрерывные наблюдения за движениями земной коры. В «Проекте исследований по предсказанию землетрясений» в Японии были предусмотрены непрерывные наблюдения за движениями земной коры с помощью наклономеров и деформографов на обсерваториях по регистрации движений земной коры, а в будущем должны широко использоваться измерения с помощью групп приборов, установленных в скважинах.

### 7.1. НАКЛОНОМЕРЫ

Как известно, наклономер — это прибор, которым измеряют очень малые наклоны земной поверхности. Мы опишем три наиболее распространенных типа наклономеров; описание других моделей читатель может найти в специальной литературе.

#### *7.1.1. Наклономеры с горизонтальным маятником*

Маятник, который может вращаться вокруг почти вертикальной оси, совершает колебания с очень большим периодом, так как составляющая силы тяжести, возвращающая его в положение равновесия, очень мала. Поскольку груз маятника колеблется в почти горизонтальной плоскости, такая колебательная система называется горизонтальным маятником.

Если ось горизонтального маятника слегка наклонить вбок, груз будет отклоняться на довольно большой угол. Благодаря этому горизонтальный маятник можно использовать не только для регистрации смещения почвы при прохождении сейсмических волн, но и для измерения ее наклонов. На практике конструирование высокочувствительного наклономера с горизонтальным маятником оказалось нелегким делом из-за наличия

механического трения в оси и в элементах системы увеличения, использовавшихся в первых моделях.

Мы не будем здесь описывать в деталях устройство наклономера с горизонтальным маятником, но отметим, что Ишимото в 1927 г. [181] сконструировал и построил наклономер, пригодный для использования на практике (см. § 3.4). Поскольку наклономер сделан из плавного кварца и имеет высоту около 20 см, то посредством тонкой регулировки можно увеличить период собственных колебаний до нескольких десятков секунд. Движение груза маятника увеличивается посредством оптического рычага и записывается на фотобумагу.

Вероятно, наклономер с горизонтальным маятником записывает лишь локальное движение почвы, так как прибор смонтирован на небольшой платформе с тремя упорами. Было также замечено, что наклономер испытывает дрейф, вероятно из-за неустойчивости крепления на платформе. В результате оказывается, что кварцевый наклономер можно использовать для записи быстрых наклонов. При измерении же долговременных изменений наклонов (в течение нескольких месяцев или лет) он бывает подвержен сильному дрейфу.

### *7.1.2. Водотрубный наклономер*

Если два сосуда с водой, сообщающиеся с помощью трубы, поставить на землю на расстоянии нескольких десятков метров друг от друга, то изменение разности уровней воды в них будет пропорционально среднему наклону участка почвы, на котором установлена эта система. Устройство такого типа называется водотрубным наклономером. Отметим модель Т. Хагивары [131], которая проста по конструкции и лучше приспособлена для практического использования, чем многие другие.

Обширные наблюдения водотрубными наклономерами\* были проведены сотрудниками ERI, в частности Ямадой [496]. Разность высот столба воды в наклономерах системы Хагивары обычно измеряется микрометром с точным указателем. Проведена также работа по созданию самозаписывающего наклономера с использованием для этого отражения ультразвуковых волн [496].

Часто применяются наклономеры, построенные по тому же принципу, что и водотрубный, но с ртутью вместо воды. Наклономеры такого типа установлены на обсерватории Гранит-Маунтин при Университете штата Юта, которая находится в нескольких десятках километров к югу от Солт-Лейк-Сити [64, 219]. В таких наклономерах изменения уровней ртути определяют по изменениям индуктивности. Этот тип наклономеров особенно распространен в США.

### 7.1.3. Скважинные наклономеры

Для установки водотрубного наклономера длиной в несколько десятков метров требуется подземное помещение, длина которого превышала бы длину наклономера. В настоящее время в сейсмичном районе, интересующем исследователя, становится трудно находить места, подходящие для устройства такого помещения, особенно в столь густонаселенной стране, какой является Япония.

Ввиду этих трудностей обратились к использованию скважинного наклономера, установка которого не требует большой площади земли. Принцип действия скважинного наклономера довольно прост. Если на тонкой нити подвесить груз, то небольшое отклонение его от вертикали относительно почвы легко измерить, используя соответствующее изменение индуктивности. Большинство скважинных наклономеров имеют длину от 10 см до 1 м. Если в сейсмичной области установить группу скважинных наклономеров с телеметрической системой регистрации, то в распоряжении сейсмологов окажется мощное средство обнаружения возможных предвестников землетрясений.

В Сейсмологическом институте в Токио [201] и других учреждениях разрабатывается другой тип скважинного наклономера — буйковый. С его помощью записывается движение буяка, плавающего на поверхности воды в скважине глубиной 50 м. Буй соединен с забоем скважины проволокой из нержавеющей стали диаметром 0,5 мм. Движение буя записывается в двух взаимно перпендикулярных направлениях. Предполагается, что такая система записывает наклоны, осредненные по всей длине проволоки.

## 7.2. ДЕФОРМОГРАФ

### 7.2.1. Кварцевый деформограф

Небольшие растяжения или сжатия почвы можно измерить посредством деформографа, иначе называемого экстензометром. Обычная модель деформографа состоит из кварцевой трубки в несколько десятков метров длиной, установленной на двух опорах. Трубку подвешивают на нескольких растяжках без трения. Один конец трубки закрепляют на одной из опор, а движение другого конца относительно почвы воспринимается каким-либо детектором, например записывающей системой с оптическим рычагом, индуктивным или емкостным преобразователем и т. д.

Первый реально действующий деформограф был построен Беньюффом в 1935 г. [35]. После этого было построено много

различных моделей деформографов. Кварцевые деформографы широко применяются в Японии (см., например, [140]), СССР (например, [224]) и США (например, [36, 64, 485]).

Обычно используют группу деформографов, ориентированных в трех направлениях, с тем чтобы полностью определить компоненты деформации. Необходимо также устанавливать приборы под землей, где температура воздуха достаточно стабильна.

### 7.2.2. Суперинварные деформографы

Сотрудники исследовательской группы в Университете Киото (Япония) по традиции применяют для своих деформографов суперинварные стержни [308] или проволоку [376]. В таком приборе натянутой суперинварной проволокой длиной 20 м соединяют две опоры. Если расстояние между опорами меняется, середина проволоки испытывает вертикальное смещение, которое можно записать с большим увеличением при помощи какого-либо устройства, например оптическим бифилярным методом. Однако натянутая проволока неизбежно испытывает остаточную деформацию, так что деформограф этого типа непригоден для наблюдения долговременных или вековых вариаций.

### 7.2.3. Лазерный деформограф

Стабильность кварцевых деформографов и деформографов, использующих суперинварные стержни или проволоку, весьма ограничена вследствие влияния колебаний температуры на длину базиса. Поэтому трудно достичь стабильности  $10^{-10}$  даже при установке в подземной камере. Кроме того, эти традиционные модели деформографов чересчур чувствительны к ускорениям колебаний почвы при землетрясениях.

В последние годы электрооптический метод, который уже использовался для измерения больших расстояний (см. § 5.4), развивается также в применении к непрерывным высокоточным измерениям расстояния. Если использовать когерентный источник света, то можно применять оптическую интерферометрию к расстояниям до 1 км и больше. Однако обсуждение деталей устройства лазерного деформографа выходит за рамки компетенции автора. Читатели, интересующиеся этим вопросом, могут обратиться к обзору Бергера [38].

Сообщалось, что при использовании лазера с поглощающей ячейкой на парах йода можно надеяться достичь стабильности  $10^{-12}$  в год [72]. Сравнение с оценками стабильности деформографов традиционного типа, установленных на обсерваториях движений земной коры в Японии, показало, что стабильность

лазерного деформографа в  $10^5$ — $10^6$  раз выше обычного. Хотя общая стабильность лазерного деформографа может несколько снизиться из-за шумового фона, применение таких деформографов кажется перспективным.

#### 7.2.4. Деформограф Сакса—Эвертсона

Сакс и др. [369] сконструировали деформограф, чувствительный к изменениям объема. Цилиндр длиной 4 м и диаметром 11 см, сделанный из нержавеющей стали, наполняют дегазированным силиконовым маслом и помещают в скважину; его стенки прикрепляют к скальной породе посредством цемента. Эффективную жесткость цилиндра и его содержимого подбирают посредством изменения толщины стенок цилиндра так, чтобы она была приближенно равна жесткости вмещающих пород. Когда объем цилиндра уменьшается, жидкость выдавливается через тонкую трубку, соединенную с цилиндром на его верхнем конце, и полость, сообщающаяся с трубкой, расширяется—это расширение воспринимается соответствующим устройством.

В 1971 г. в районе Мацусиро были установлены три деформографа такого типа. После сильного роя землетрясений 1965—1967 гг. сейсмическая активность там была все еще высокой, и можно было сравнивать данные наблюдений с результатами, полученными с помощью 100-м кварцевых деформографов на Мацусирской сейсмологической обсерватории.

Оказалось, что во многих случаях деформографы Сакса—Эвертсона в отличие от кварцевых не регистрировали сопровождающего землетрясение скачка деформаций (см. § 7.5). Когда же на деформографах Сакса—Эвертсона имеется скачок, он всегда оказывается на порядок меньше скачка, записанного кварцевым деформографом. Поэтому стали думать, что некоторые из скачков, зарегистрированных обычными деформографами, могут быть ложными. Конструкция этих приборов не обеспечивает защиты от действия механических толчков при близких землетрясениях, когда возникают большие ускорения.

### 7.3. ОБСЕРВАТОРИИ ДЛЯ НАБЛЮДЕНИЯ ЗА ДВИЖЕНИЯМИ ЗЕМНОЙ КОРЫ

Как видно из рис. 4.5, к настоящему времени в Японии действует 17 обсерваторий, наблюдающих за движениями земной коры. На таких обсерваториях обычно имеются двухкомпонентные наклонометры с горизонтальным маятником, двухкомпонентные водотрубные наклонометры, трехкомпонентные кварцевые

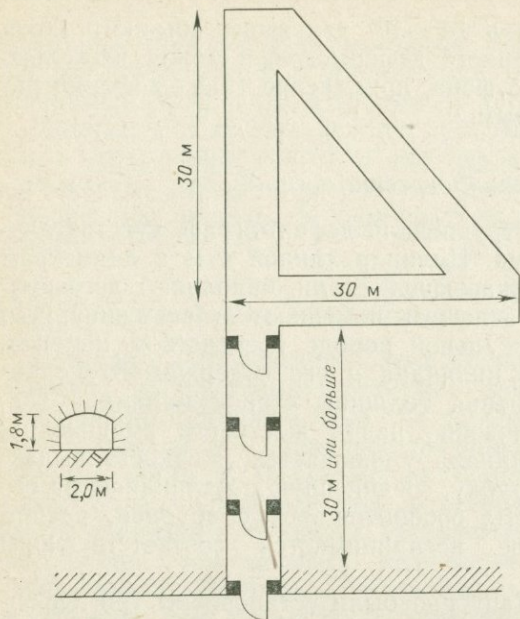


Рис. 7.1. Типовой подземный павильон для непрерывных наблюдений за движениями земной коры в Японии.

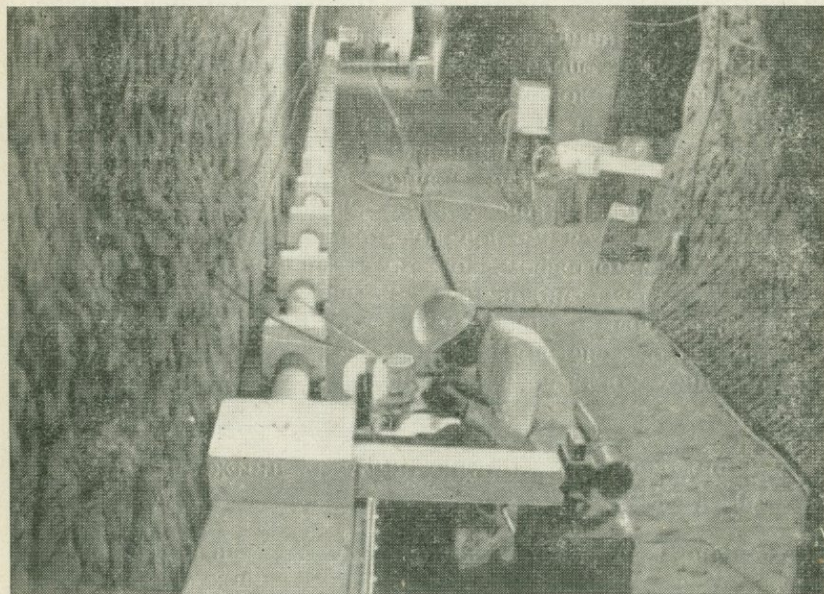


Рис. 7.2. Внутренний вид обсерватории Ногогиряма по наблюдению движений земной коры. Наблюдатель на снимке измеряет высоту уровня воды водотрубного наклономера длиной 25 м. Здесь же можно видеть 25-м кварцевый деформограф вместе с регистрирующей системой.

деформографы и другие дополнительные приборы, такие, как термометры и т. п. Типовой подземный павильон для установки этих приборов схематически показан на рис. 7.1. Как видно из рисунка, для предотвращения влияния изменений температуры в таком подвале используется ряд промежуточных дверей.

На рис. 7.2 показан внутренний вид обсерватории. Снимок сделан на обсерватории Нокогирияма, примерно в 70 км к югу от Токио. Эта обсерватория, функционирующая с 1959 г., уже немного устарела. Обсерватории, сооруженные позднее, оснащены гораздо более тонкой аппаратурой.

Автору довелось посетить несколько обсерваторий за пределами Японии, и он имел случай убедиться в том, что они мало отличаются от японских.

#### 7.4. ВЕКОВЫЕ ВАРИАЦИИ НАКЛОНОВ И ДЕФОРМАЦИИ И ИХ СВЯЗЬ С РЕГИОНАЛЬНЫМИ ДВИЖЕНИЯМИ ЗЕМНОЙ КОРЫ

Когда в Японии начались работы по программе предсказания землетрясений, было не ясно, насколько вариации, регистрируемые наклономерами и деформографами, отражают общее движение земной коры на большой территории, окружающей обсерваторию с ее аппаратурой. Если эти вариации чересчур локальны и определяются лишь деформациями площадки, на которой расположены приборы, не следует переоценивать их записи, так как мы интересуемся состоянием деформаций на сравнительно обширной территории, в пределах которой должна накапливаться энергия землетрясений. Поэтому было решено провести сопоставление вариаций, записанных наклономерами и деформографами, с данными геодезических съемок в районе расположения обсерватории.

Рассмотрим, что представляют собой вековые вариации деформаций земной коры, записанные на типичной обсерватории. На рис. 7.3 показаны сглаженные среднемесячные значения наклонов, деформаций и колебаний уровня моря, зарегистрированные на обсерватории движений земной коры в Абурацубо (примерно в 60 км южнее Токио) за время примерно с 1949 по 1970 г. [496]. Измерительный подвал обсерватории расположен близко к берегу моря. Символами  $E_{25}$ ,  $E_{10}$ ,  $E_8$  на рисунке обозначены записи, полученные с помощью деформографов, имеющих длину соответственно 25, 10 и 8 м и направления  $22^\circ$  СВ,  $81^\circ$  СЗ и  $64^\circ$  ЮЗ. Значения азимутов наклономеров  $N'$  и  $E'$  равны соответственно  $22^\circ$  СВ и  $81^\circ$  СЗ, а длина 25 м и 10 м.

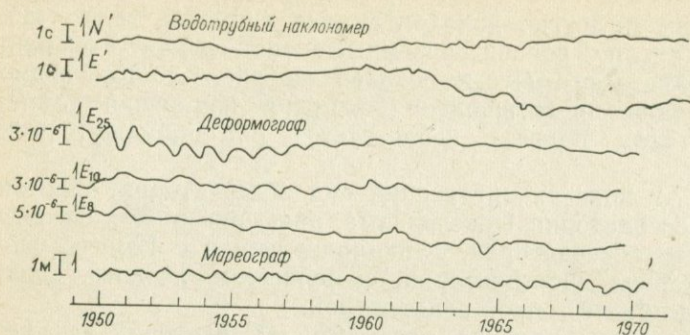


Рис. 7.3. Вековые вариации наклонов, горизонтальных деформаций и уровня моря, зарегистрированные на обсерватории движений земной коры в Абурацубо. Данные об азимуте и длине приборов см. в тексте. Стрелками обозначены наклоны в направлениях  $N'$  и  $W'$ , растяжение для деформографов и поднятие земной поверхности на записи мареографа [496].

Как видно из рисунка, доминируют годовые вариации, вероятно обусловленные изменениями температуры. Такие вариации легко удалить применением годового скользящего среднего или других видов фильтрации. Не ясно, что именно означают наблюдаемые таким образом вековые вариации, но изменения наклонов, записанные, например, наклонмером  $E'$ , по-видимому, значительно превышают возможные ошибки. Наклон примерно в  $1,0''$  или около того в направлении  $W'$  за период 1955—1961 гг. и сменивший его наклон на  $2''$  или несколько больше в направлении  $E'$  за период 1961—1967 гг., вероятно, являются косвенным отражением процессов, происходивших в земной коре в районе Абурацубо.

На рис. 7.4 показаны изменения высоты репера, расположенного вблизи обсерватории, относительно репера в Йокогаме,

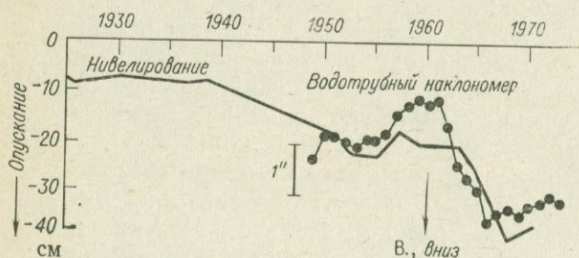


Рис. 7.4. Вариации наклона земной поверхности в субширотном направлении по измерениям водотрубным наклонмером на обсерватории движений земной коры в Абурацубо и опускания земной поверхности относительно репера в Йокогаме по данным повторного нивелирования [496].

(в 30 км севернее Абурацубо) (см. рис. 6.2) и изменения наклона поверхности в направлении  $81^\circ$  СЗ по данным измерений компоненты  $E'$  водотрубного наклономера. Примечательно, что обе кривые приблизительно совпадают по форме, хотя величина наклонов по измерениям наклономером в несколько раз больше, чем по данным повторного нивелирования.

Однако кажется странным, что согласуются между собой наклоны, полученные двумя методами в направлениях, почти перпендикулярных друг другу, в то время как не наблюдается никакого согласия между наклонами по данным нивелировок и по измерениям компоненты  $N'$  ( $22^\circ$  СВ). Можно сказать, что наклоны по измерениям наклономером иногда, вероятно, отражают общие движения земной коры на некоторой территории, окружающей пункт наблюдения, хотя трудно найти количественную корреляцию между геодезическими и непрерывными наблюдениями. Вариации наклонов, измеряемые наклономером, могут лишь свидетельствовать о наличии движений земной коры, но в некоторых случаях они могут быть полезны для предсказания землетрясений.

Известен факт аналогичного согласия между изменениями высоты репера близ обсерватории движений земной коры в префектуре Ниигата и вариациями наклонов в северном направлении, записанными на этой обсерватории. В самой нижней части рис. 5.64 показаны изменения высоты репера в небольшом городе Ивамуро при Ниигатском землетрясении 1964 г. Примерно в 7 км к западу от города начиная с 1953 г. функционировала обсерватория Мадзе (нынешнее название — Обсерватория по наблюдению за движениями земной коры Яхико, см. рис. 4.5). Обе кривые — изменений высот и наклонов земной поверхности — приведены на рис. 7.5, где можно видеть, что общий ход кривых одинаков [204].

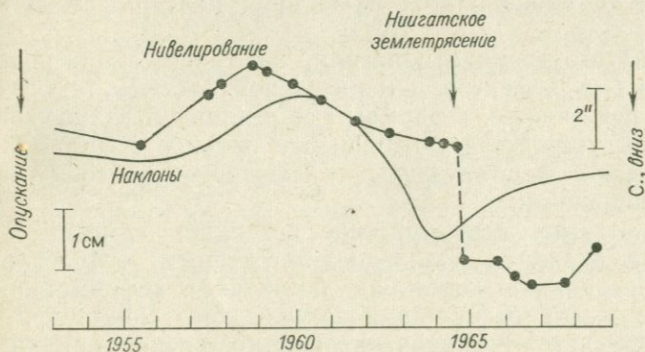


Рис. 7.5. Сопоставление изменений высоты репера в Ивамуро и изменений наклонов на обсерватории Мадзе [204].

Во время землетрясений в Мацусиро ход наклонов по данным водотрубных наклономеров Мацусирской сейсмологической обсерватории согласовался с поднятием земной поверхности по данным повторного нивелирования (см. § 5.6.14) и растяжением по данным геодиметра, установленного в эпицентральной зоне [203]. Ход кривой наклонов хорошо согласуется с усилением и ослаблением сейсмической активности, как уже отмечалось в § 4.2.1.

Такое согласие между наклонами и деформациями земной поверхности по данным повторного нивелирования наблюдается и в других местах в Японии. Из этого следует, что наклоны почвы и деформации, измеряемые на специальной обсерватории, вероятно, отражают действительный процесс деформирования земной коры в районе обсерватории. Несмотря на отсутствие количественного согласия, вариации на записях наклономеров и деформографов могут служить индикаторами происходящих движений земной коры. Исходя из разностей фаз наклонов и данных повторного нивелирования, а также из сопоставления наклономерных записей соседних обсерваторий Абурацубо и Нокогирияма, расстояние между которыми 20 км, Касахара [204] указал на возможную миграцию процесса движений земной коры со скоростью 10—20 км/год, хотя этот вывод не согласуется с мнением автора книги.

## 7.5. СКАЧОК ХОДА ДЕФОРМАЦИЙ ПРИ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯХ

Иногда при землетрясении, когда колебания на записях наклономеров и деформографов уже закончились, линия записи остается отклоненной от ее положения перед землетрясением. Такие изменения называются скачками деформации или наклона. Они иногда наблюдаются даже при удаленных землетрясениях.

В течение долгого времени полагали, что такие скачки возникают от каких-то дефектов измерительной системы, в особенности когда речь идет о деформографе с длинной кварцевой штангой, так как устройства, соединяющие штангу с системой увеличения, бывают чувствительны к механическим толчкам с большими ускорениями.

Если вспомнить, что землетрясение возникает от разрыва земной коры, то окажется довольно естественным, что после землетрясения возникает некоторая остаточная деформация. Если это так, то скачок деформации земной коры может произойти и в отдалении от эпицентра. Так постепенно пришли к выводу, что скачки, наблюдаемые на записях наклономеров и деформографов, существуют на самом деле; однако во мно-

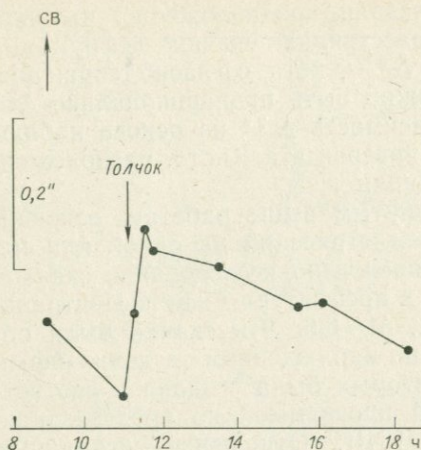


Рис. 7.6. Скачок наклона на записи водотрубного наклономера, наблюдавшийся при одном из афтершоков Фукуйского землетрясения 1948 г. [141].

гих случаях нельзя полностью исключить возможность ложных эффектов [319, 439, 485].

Вскоре после Фукуйского землетрясения 1948 г. Хагивара и др. [141] измеряли движения земной коры на временном наблюдательном пункте, оборудованном в заброшенной шахте под названием Бандодзима, недалеко от эпицентральной зоны землетрясения (см. § 5.3.7, 5.6.12). Когда близ Маруоки (см. рис. 5.15) произошел афтершок с магнитудой между 4 и 5, в записи водотрубного наклономера, ориентированного в северо-восточном направлении и расположенного в 17 км от эпицентра, наблюдались скачкообразные изменения (рис. 7.6). Этот случай, вероятно, является первым наблюдением скачка наклона. Интересно отметить, что, по всей видимости, скачок начался раньше землетрясения.

Пресс [319] показал, что поле деформаций от сильного землетрясения на телесеизмических расстояниях достаточно велико для регистрации его современной аппаратурой. Вайдeman и Мейджер [485] обобщили наблюдения с помощью деформографа на геофизической обсерватории им. Сесила Грина в штате Колорадо (США). В их работе приведены эмпирические кривые, на которых наблюдался скачок деформации. Кривые представляют собой почти прямые линии в координатах магнитуда землетрясения ( $M$ ) — логарифм эпицентрального расстояния ( $\Delta$ ). В результате получается эмпирическое соотношение

$$M = 1,1 + 1,7 \lg \Delta. \quad (7.1)$$

Это уравнение определяет магнитуду самого слабого землетрясения, при котором можно ожидать деформацию порядка  $10^{-9}$  на расстоянии  $\Delta$  км.

Вайдеман и Мейджер высказали предположение, что при увеличении эпицентрального расстояния скачки деформации уменьшаются пропорционально  $\Delta^{-3/2}$ , хотя, согласно теории дислокаций [62, 319], спадание должно быть пропорционально  $\Delta^{-2}$ . Такого [439] предложил зависимость  $\Delta^{-2.4}$  на основе наблюдений на трех обсерваториях Университета Киото, расположенных к югу от Киото в области Кинки.

В противоположность упомянутым выше работам, основанным на наблюдениях многих землетрясений на одной или нескольких обсерваториях, было проведено исследование скачков деформации при землетрясении в префектуре Гифу в Центральной Японии 9 сентября 1969 г.,  $M=6,6$ . Эти скачки были обнаружены на 15 обсерваториях по наблюдениям за движениями земной коры, большая часть которых была создана в соответствии с японской национальной программой по предсказанию землетрясений (см. рис. 4.5 [184]). Отношение сигнал/шум в Японии столь мало, что скачки меньше  $10^{-8}$  могут быть не замечены, а большой разброс данных мешает делать какие-либо определенные выводы. По-видимому, все же наблюдается тенденция уменьшения скачков деформации пропорционально  $\Delta^{-3}$ . Из-за разброса данных следует опасаться поспешных выводов по данным одной обсерватории.

Результаты исследований закона спадания деформаций с расстоянием  $\Delta$  ненадежны. Исследования скачка деформации развиты пока недостаточно, что отчасти связано с трудностями измерений.

Лазерный деформограф в Ла-Холье, примерно в 200 км от Сан-Фернандо в Калифорнии, 9 февраля 1971 г., когда там произошло землетрясение с магнитудой 6,4 (см. § 5.7.5), записал возникшие колебания. После пропускания записи через низкочастотный фильтр отчетливо обнаружился скачок деформации в  $1,6 \cdot 10^{-9}$ , возникший в момент землетрясения [37, 38]. Кварцевые деформографы и ртутные наклонометры на станции Изабелла Калифорнийского технологического института, расположенной в 147 км севернее эпицентра, также записали скачки от  $10^{-9}$  до  $10^{-8}$ . На записях двух деформографов вблизи испытательного полигона Невада, в 380 км к северо-востоку от эпицентра, также были обнаружены скачки порядка  $3 \cdot 10^{-10}$  [191].

Когда сейсмическая активность Мацусирского роя находилась на самом высоком уровне, несколько наблюдателей работали круглые сутки, снимая показания водотрубных наклонометров, установленных на Мацусирской сейсмологической обсерватории. В результате были обнаружены десятки скачков наклона при толчках с магнитудами 4—5. Ямада [496] составил каталог этих скачков. На рис. 7.7 показан один из самых ярких примеров скачка наклона. Интересно отметить, что скачок, видимо, на-

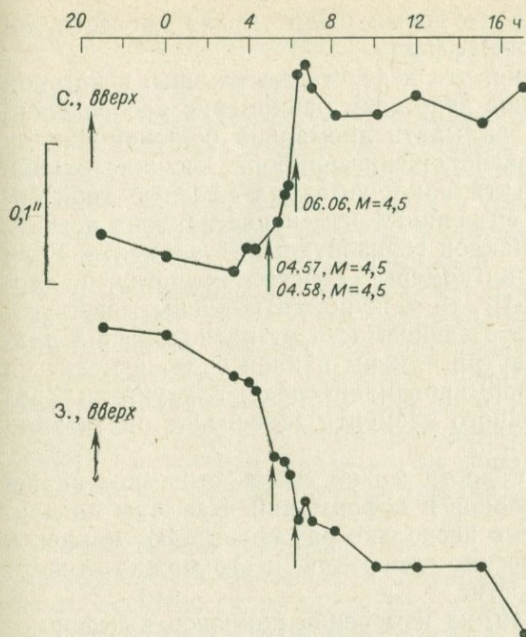


Рис. 7.7. Скачок наклона, записанный водотрубным наклономером на Мацусирской сейсмологической обсерватории 11 апреля 1966 г. [496].

чался за несколько часов до землетрясений. В Мацусиро было отмечено по меньшей мере пять скачков наклона с отчетливыми предвестниками. Возможно, что эти скачки не связаны с землетрясением. Автор не имеет сведений о предвещающих землетрясения скачках деформации, которые были бы обнаружены на записях деформографов. Исключение составляет скачок при землетрясении вблизи Холлистера в Калифорнии, обнаруженный по данным геодезического (см. § 5.4.4).

## 7.6. ВЛИЯНИЕ СТРОЕНИЯ ЗЕМЛИ В ТОЧКЕ НАБЛЮДЕНИЯ

В работе [142] рассматривается влияние рельефа местности на наклоны и деформации земной поверхности на обсерватории по наблюдениям за движениями земной коры в Абурацубо. Рассмотрен лишь двумерный случай, когда на полупространстве лежит полоса прямоугольного возвышения, моделирующая горный массив, в котором вырыта камера наблюдения. Если высота возвышения много меньше, чем его длина, то оказывается, что при действии равномерной нагрузки на поверхность эффект

от рельефа будет мал. В то время было трудно провести детальные вычисления такого эффекта.

В работе [214] показано, что деформация камеры, в которой установлен наклономер, под действием равномерно распределенного напряжения может вызывать аномально большой наклон в зависимости от места расположения прибора. Сначала наивно думали, что если поместить наклономер на плоскую горизонтальную поверхность, то он запишет изменение наклона поверхности и будет измерять наклон горизонтального элемента. Если учесть влияние деформации камеры («эффект полости», по терминологии Харрисона [151]), то кажущиеся наклоны могут увеличиться в несколько раз в зависимости от расположения прибора в камере, так что внутри камеры наклон будет изменяться от точки к точке. В деформированной среде, как указал Харрисон [151], наклон линейного элемента зависит от ориентации этого элемента.

Упомянутый эффект полости может иметь серьезное значение для наблюдений наклонов и деформаций. Наклоны по данным наклономера обычно в несколько раз превышают наклоны, вычисленные из геодезических измерений, и это можно отчасти объяснить эффектом полости.

Кроме эффекта полости, на измерения наклонов и деформаций иногда оказывает заметное влияние рельеф местности (Харрисон, частное сообщение, 1974). Развитый в последнее время метод конечных элементов позволяет рассчитать распределение напряжений в среде со сложным рельефом. Если поверхность представляет собой холм и находится под действием равномерно распределенного сжатия, то в определенной части холма может происходить растяжение. В этом случае едва ли можно записать региональную деформацию земной коры.

Из-за влияния эффекта полости и рельефа местности количественное сравнение наклонов и деформаций иногда может оказаться бессмысленным. Однако следует подчеркнуть, что поскольку в некоторых случаях эти эффекты могут усиливать аномальное изменение наклона или деформации, то их можно использовать в качестве индикатора аномального состояния земной коры, например дилатансии.

### 7.7. ВАРИАЦИИ НАКЛОНОВ И ДЕФОРМАЦИЙ КАК ПРЕДВЕСТНИКИ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

Имеется много сообщений об аномальных наклонах и деформациях, предвещающих землетрясения. Некоторые из них могут быть ненадежны; тем не менее кратко опишем примеры прогностических изменений наклонов и деформаций, известные автору.

### 7.7.1. Японские примеры

#### Землетрясение в Канто

Вероятно, самое раннее сообщение о предвестнике в виде изменения наклона относится к землетрясению 1923 г. в Канто ( $M=7,9$ ) (см. § 3.3, 5.3.1, 5.6.4). Имамуре [176] обратил внимание на внезапный наклон к западу, начавшийся около 04 ч 00 мин местного времени 1 сентября 1923 г. и записанный горизонтальным длиннопериодным сейсмографом системы Омори в Токийском университете. Землетрясение произошло в тот же день в 11 ч 58 мин. Однако, согласно опыту автора настоящей книги, сейсмограф подвержен сильному влиянию трения и неустойчив, так что запись, показанная на рис. 7.8, может оказаться ненадежной. Но если аномальные изменения наклона действительно являются предвестниками, то у сейсмологов появляется некоторая надежда на обнаружение краткосрочного предвестника сильного землетрясения.

#### Землетрясение в Тоттори

Наблюдения наклонов и деформаций издавна ведутся силами Геофизического института и Института исследований по предотвращению стихийных бедствий Университета Киото. Эти наблюдения ведутся столь интенсивно, что в настоящее время наклонометры и деформографы работают в нескольких десятках подземных камер. Некоторые из этих станций не столь совершенны, как современные обсерватории по наблюдениям за движениями земной коры, созданные по программе предсказания землетрясений. Тем не менее группа в Киото сообщила о ряде

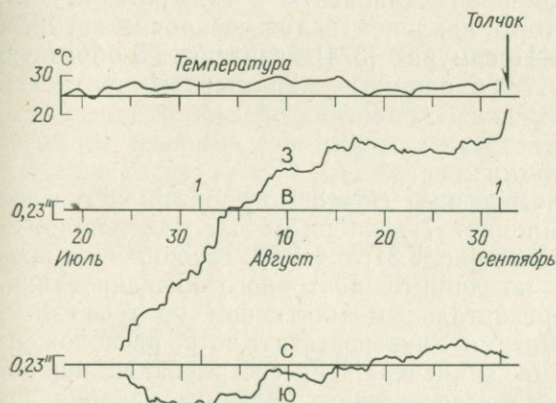


Рис. 7.8. Вариации наклонов земной поверхности перед землетрясением 1 сентября 1923 г. в Канто, записанные горизонтальными сейсмографами системы Омори в Токийском университете [176].

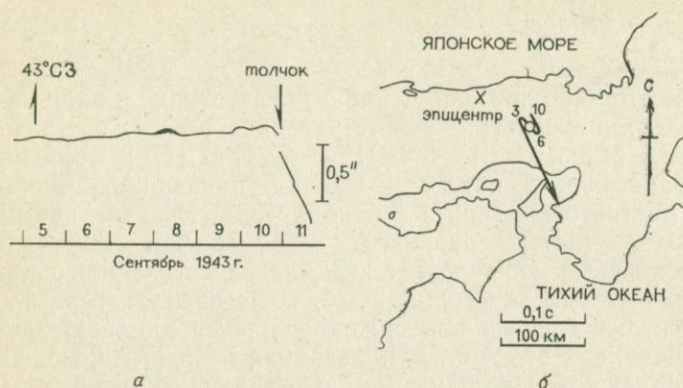


Рис. 7.9. Вариации наклона, зарегистрированные горизонтальными наклономерами на медном руднике в 60 км от эпицентра землетрясения 1943 г. в Тоттори. *а* — запись компоненты  $43^\circ \text{СЗ}$ ; *б* — кривая, заканчивающаяся стрелкой, обозначает направление и амплитуду изменения наклона; цифры — время в часах, отсчитанное назад от момента землетрясения [374].

прогностических эффектов (обзор наблюдений до 1951 г. дан в работе [374]).

Во время землетрясения 1943 г. в Тоттори ( $M=7,4$ ; см. § 5.3.4, 5.6.9) наклономеры с горизонтальным маятником, установленные в медном руднике Икуно в 60 км к юго-востоку от эпицентра, записали за 6 ч до землетрясения интересные вариации, достигавшие  $0,1''$  или больше. На рис. 7.9, *а* воспроизведена запись наклономерной компоненты с азимутом  $43^\circ \text{СЗ}$ , а на рис. 7.9, *б* — векторы наклонов в той же точке за 10 ч до толчка. Сасса и Нисимура [374] считают S-образную форму кривой на рис. 7.9, *б* одним из характерных признаков таких предвестников.

#### Тонанкайское землетрясение

Тонанкайское землетрясение ( $M=8,0$ ) произошло в море у берегов п-ва Кии (Япония) 7 декабря 1944 г. Местоположение эпицентра показано на рис. 5.31; в § 5.7.2 говорилось о прогностическом эффекте по данным повторного нивелирования.

Наклономеры с горизонтальным маятником на геофизической обсерватории Камигамо Университета Киото, расположенной в 160 км к ССЗ от эпицентра, зарегистрировали наклон поверхности за 5,7 ч до землетрясения. Величина наклона достигала лишь  $0,04''$ , но, согласно [374], и здесь, так же как при землетрясении в Тоттори, наблюдалась S-образная форма кривой записи конца вектора наклона.

*Нанкийское землетрясение*

26 апреля 1950 г. в южной части п-ва Кии ( $33,9^\circ$  с. ш.,  $135,8^\circ$  в. д.) произошло землетрясение с магнитудой 6,7. Это землетрясение назвали Нанкийским («юг Кии»). На обсерваториях Тамамидзу, Камигамо и Коти (эпицентральные расстояния равны соответственно 80, 120 и 200 км) наблюдались любопытные прогностические изменения наклонов. Промежутки времени от наблюдавшихся эффектов до землетрясения составляли соответственно 6,9; 6,8 и 5,4 ч, а сами наклоны 0,15; 0,04 и 0,02" [374].

*Землетрясение Дайсёджи-оки*

7 марта 1952 г. в Японском море вблизи префектуры Иси-кава (Япония) произошло землетрясение, названное Дайсёджи-оки ( $M=6,8$ ). В это же время в медном руднике Огоя (на 40 км юго-восточнее эпицентра) производились наклономерные наблюдения [165, 290].

За три месяца до землетрясения был зарегистрирован наклон в направлении к эпицентру, равный  $1'$  и более. За 10 дней до момента толчка скорость изменения наклона несколько увеличилась. Если это аномальное изменение наклона является некоторого рода предвестником, то можно сказать, что, кроме наклономерных предвестников с временами порядка нескольких часов, о которых говорилось выше, перед землетрясениями существуют еще и изменения, длительность которых составляет несколько месяцев. Однако предполагается, что такой огромный наклон мог быть вызван какой-то местной причиной неизвестного происхождения.

*Йосинское землетрясение*

При землетрясении в Йосино ( $M=7,0$ ), происшедшем 18 июля 1952 г. в средней части п-ва Кии на глубине 70 км, деформограф на обсерватории Осакаяма Университета Киото в 94 км севернее эпицентра зарегистрировал аномальное растяжение почвы (рис. 7.10). Величина деформации достигла значения  $2,5 \cdot 10^{-6}$ . Аномальное изменение деформации началось

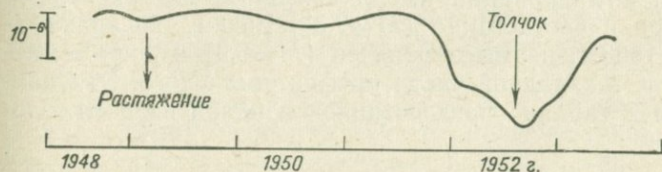


Рис. 7.10. Изменения горизонтальной деформации в направлении  $38^\circ$  ЮЗ— $38^\circ$  СВ, зарегистрированные на обсерватории Осакаяма при землетрясении в Йосино [375].

примерно за 10 месяцев до землетрясения, и спустя год после землетрясения деформация вернулась к прежнему значению [375].

В работах [375, 436] сообщается также об аномальных изменениях деформаций при этом землетрясении, зарегистрированных на обсерватории Иде Университета Киото, расположенной в 72 км от эпицентра. На нескольких других обсерваториях также наблюдались наклоны-предвестники [441].

#### *Одайгахарское землетрясение*

26 декабря 1960 г. на п-ве Кии произошло землетрясение с магнитудой 6,0. В это время в радиусе 100 км от эпицентра работало девять обсерваторий по наблюдению за движениями земной коры. Глубина очага составляла 60 км, так что это землетрясение в общем походило на Йосинское. За 6 месяцев до толчка наклонометры на этих обсерваториях регистрировали характерные вариации. Отчетливые повороты вектора наклона наблюдались за 30 и за несколько дней до толчка. На большинстве обсерваторий амплитуда изменения наклона превышала 1", максимальное значение 6" достигалось на одной из обсерваторий, расположенной на западном берегу полуострова. Аномальные изменения наблюдались и на записях деформографов. Приведенные выше данные взяты из работ [289, 441].

#### *Хиуганадское землетрясение*

За 12 дней до Хиуганадского землетрясения с магнитудой 7,0, происшедшего 27 февраля 1961 г. под морским дном восточнее о. Кюсю (Япония), наблюдалось изменение наклона в 0,1" [289, 441]. За 4 дня до землетрясения изменение наклона, по-видимому, сменило знак. Расстояние от обсерватории до эпицентра было примерно 120 км. Однако автор должен сказать, что изучение записи, на которой Нисимура увидел предвестник, привело его к выводу, что эта вариация ненамного превышает уровень помех.

Кроме последних семи примеров, имеются сообщения о предвестниках того же рода, т. е. о вариациях наклонов и деформаций, и от группы исследователей Университета Киото (см., в частности, [441]). Эти вариации имели связь с землетрясениями 1961 г. в северной части Мино ( $M=7,0$ ), 1962 г. в Сирахамаоки ( $M=6,2$ ), 1963 г. на мысе Этидзен ( $M=6,9$ ) и роем землетрясений 1961 г. в западной части префектуры Хиого. Эти данные приведены в таблице предвестников в одной из последующих глав.

#### *Ниигатское землетрясение*

В § 7.4 отмечалось, что особенности временного хода наклонов почвы, измеренных водотрубным наклономером, и измене-

ний высоты репера, расположенного вблизи обсерватории Мадзе, где производилась запись наклономером, в общих чертах согласуются между собой (см. рис. 7.5). Обсерватория находится недалеко от берега Японского моря, очень близко к реперу, изменения высоты которого изображены кривой в нижней части рис. 5.64. Расстояние от эпицентра Нингатского землетрясения 1964 г. ( $M=7,5$ ) до обсерватории составляет около 80 км. Из кривой наклона на рис. 7.5 видно, что примерно за 8 лет до землетрясения имели место прогностические изменения. Однако непосредственно перед землетрясением ни водотрубный, ни кварцевый наклономеры не зарегистрировали никакого предвестника.

*Землетрясения в центральной части префектуры Гифу и на п-ве Ацуми*

Обсерватория Инуяма по наблюдению за движениями земной коры Университета Нагои, созданная согласно национальной японской программе предсказания землетрясений, начала свою работу в 1967 г. На записи водотрубных наклономеров и деформографов оказывают влияние годовые и другие короткопериодные вариации. Однако, подавляя эти вариации посредством обработки записей низкочастотным фильтром, можно получить сглаженные вековые изменения наклонов и деформаций. В [172] произведена дальнейшая оценка изменений наклонов и деформаций (рис. 7.11). Интересно отметить, что перед землетрясением 9 сентября 1969 г. в центральной части префектуры Гифу ( $M=6,6$ ) наблюдались довольно быстрые изменения наклонов. Эпицентр находился в 48 км от обсерватории в направлении ССВ. Можно сказать, что перед землетрясением 5 января 1971 г. на п-ве Ацуми ( $M=6,1$ ) с эпицентром в 90 км южнее обсерватории имело место похожее изменение, хотя и несколько меньшей амплитуды. Если эти изменения являются предвестниками, то в обоих случаях они появились за 250 дней перед землетрясениями. Величина аномальных вариаций составляет  $0,5 \cdot 10^{-6}$  в год для деформаций и  $0,5 \cdot 10^{-6}$  рад/год для наклонов. В работе [402] сообщается об аналогичных изменениях перед землетрясением в центре префектуры Гифу, наблюдавшихся на обсерватории Камитакара Университета Киото, в 60 км северо-восточнее эпицентра. Кривые для Камитакары также приведены на рис. 7.11.

Как уже упоминалось в § 4.2.4, в Японии в соответствии с программой исследований по предсказанию землетрясений было построено 12 обсерваторий по наблюдению за движениями земной коры. Если не считать приведенных выше примеров, эти обсерватории пока еще не сообщали о предвестниках, вероятно потому, что обнаружение аномальных наклонов и деформаций,

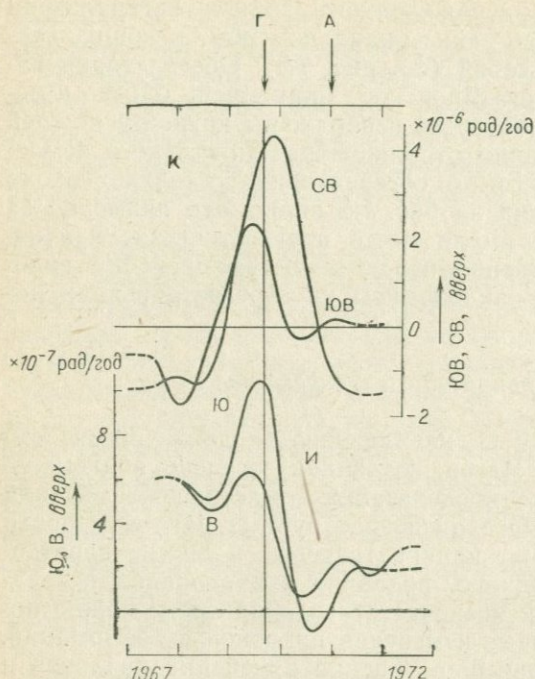


Рис. 7.11. Сглаженные скорости изменения наклона на обсерваториях по наблюдению за движениями земной коры Камитакара (*К*) и Инуяма (*И*). Моменты возникновения землетрясений в центре префектуры Гифу и на п-ве Ацуми обозначены соответственно *Г* и *А* [402].

связанных с землетрясениями, путем наблюдений на обсерватории оказалось нелегким делом. Поскольку трудно резко увеличить число обсерваторий по наблюдению за движениями земной коры, следует интенсифицировать наблюдения с помощью скважинных наклономеров и других подобных способов.

### 7.7.2. Примеры советских исследований

#### Наклономерные наблюдения

Наблюдения наклонов и деформаций в СССР сосредоточены главным образом в Средней Азии, где уровень сейсмической активности довольно высок. Первые исследования наклонов земной поверхности в связи с предсказанием землетрясений выполнены В. Ф. Бончковским (см. [306]).

Сообщалось, что за час до землетрясения с  $M < 4$  25 апреля 1957 г. на станции Ашхабад, расположенной на расстоянии

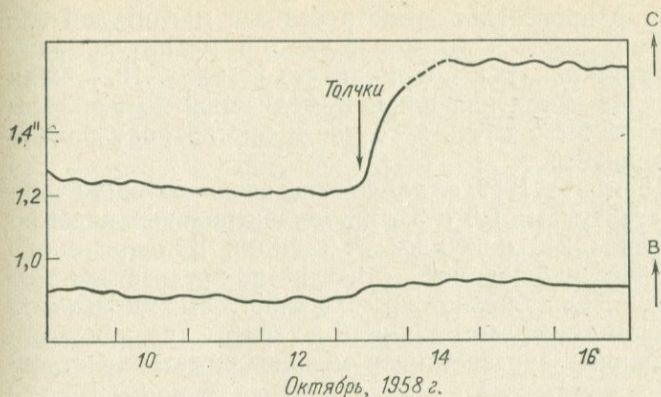


Рис. 7.12. Запись аномальных наклонов на наклономерной станции Алма-Ата<sub>2</sub> при землетрясениях 13 октября 1958 г. [306].

25 км от эпицентра, наблюдался аномальный наклон величиной  $0,1''$ .

На станции Алма-Ата наклонометры были установлены в подземных выработках на глубине 15 м от поверхности земли. Записи свободны от помех, возникающих вследствие флуктуаций атмосферного давления. 13 октября 1958 г. на расстоянии

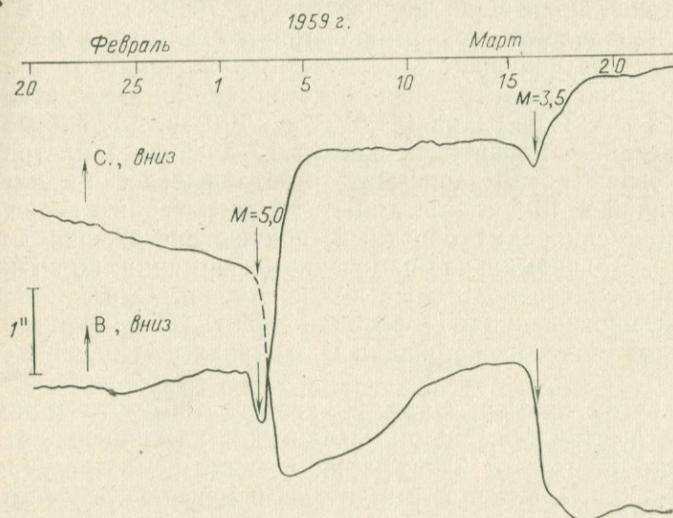


Рис. 7.13. Аномальные наклоны при двух афганских землетрясениях 2 и 16 марта 1959 г., записанные на станции Кондара (Душанбе) [306, 307].

250 км от станции произошло землетрясение с магнитудой 4,0, а через 30 мин после него — еще одно с магнитудой 4,7. За 3 ч до землетрясений, как можно видеть из рис. 7.12, начали происходить резкие изменения наклона величиной до  $0,4''$ . Направление наклона было почти в точности противоположно направлению на эпицентр.

Когда 2 и 16 марта 1959 г. в Афганистане произошли землетрясения с магнитудами 5,0 и 3,5 на эпицентральных расстояниях соответственно 245 и 300 км от станции Кондара около Душанбе, на ней наблюдались отчетливые предвестники со скачками наклона. Они являются, возможно, самыми выразительными наклонами-предвестниками (рис. 7.13). Три приведенных примера наклонов-предвестников описаны в статьях Островского [306, 307].

В работе Садовского и др. [372] приведены примеры наклонов-предвестников, зарегистрированных в Нарыне и Душанбе, правда, без подробного анализа результатов.

#### *Наблюдения с помощью деформографов*

Следующее далее изложение основано на статьях Латыниной и Кармалеевой [224, 225] и Нерсесова и др. [285].

В 1961 г. на станции Талгар, расположенной в отрогах Заильского Алатау на севере Тянь-Шаня, был установлен кварцевый деформограф с длиной штанги 25 м. Сообщалось, что за несколько месяцев до Аляскинского землетрясения 1964 г. ( $M=8,4$ ), которое произошло на расстоянии 7000 км от Талгара, общее направление деформирования в Талгаре изменилось от сжатия к расширению.

5 мая 1965 г. на эпицентрального расстоянии 250 км от станции Талгар, на юге Тянь-Шаня ( $41,8^\circ$  с. ш.,  $79,4^\circ$  в. д.), произошло землетрясение с магнитудой 6,0. За 15 дней до землетрясения деформограф начал записывать отчетливую деформацию сжатия величиной  $9 \cdot 10^{-8}$ , а за 4 дня до землетрясения знак деформирования сменился на обратный, причем растяжение достигало  $4 \cdot 10^{-8}$ . Это аномальное изменение деформации, по-видимому, закончилось через 15 дней после толчка. Однако при землетрясении, происшедшем 11 февраля 1969 г. ( $M=6,6$ ) почти в том же самом месте, не наблюдалось никаких изменений деформации.

Имеется другой пример, когда 20 августа 1967 г. в горах Джунгарского Алатау ( $45,4^\circ$  с. ш.,  $80,4^\circ$  в. д.), на эпицентрального расстоянии 320 км от Талгара, произошло землетрясение с магнитудой 5,0. Характер и амплитуда изменения деформации были примерно такие же, как и в предыдущем случае. За 10 дней до толчка было обнаружено резкое изменение деформации.

Начиная с 1968 г. на станции Гарм работали два деформографа с длиной штанг 26 и 20 м. При землетрясении 9 января 1969 г. с магнитудой 3,0 за двое суток до толчка наблюдалась аномальная деформация величиной около  $3 \cdot 10^{-8}$ . Эпицентрального расстояния равнялось 5 км.

Иногда указывают на изменение скорости векового хода деформаций перед землетрясениями. 14 марта 1965 г. произошло землетрясение с магнитудой 7,5, эпицентр которого находился на расстоянии 300 км от станции Кондара. За 4 дня до землетрясения было замечено отчетливое изменение скорости сжатия почвы: от  $4,5 \cdot 10^{-8}$  до  $1,5 \cdot 10^{-8}$ . С помощью наклономеров, установленных в 50 км от Кондары, были зарегистрированы аномальные наклоны поверхности перед этим землетрясением.

За 3 дня до землетрясения с магнитудой 4,5, происшедшего на расстоянии 100 км от станции Кондара, на ней был отмечен резкий скачок скорости деформации.

Хотя некоторые из приведенных здесь примеров совершенно отчетливо коррелируют с возникновением землетрясений, имеется также ряд примеров, где корреляция не столь ясна. Подобным же образом во многих японских примерах есть основания считать, что отношение сигнала к помехе при непрерывных наблюдениях движений земной коры недостаточно для обнаружения предвестников землетрясений.

### 7.7.3. Американские примеры

В районе залива Сан-Франциско силами NCER, Лаборатории механизма землетрясений (сейчас относящейся к Геологической службе США) и Калифорнийского университета (Беркли) были установлены сгруппированные системы наклономеров. Часто отмечалось, что незадолго до землетрясений с магнитудами около 4 происходят изменения скорости наклонов [159].

12 июня 1970 г. в Данвилле (Калифорния, на 40 км восточнее Сан-Франциско) в течение 50 с произошло три землетрясения с  $M > 4$ . В связи с этим роем землетрясений были замечены интересные изменения в записях наклономеров в сейсмологической камере Калифорнийского университета в Беркли и в форте Сан-Франциско на эпицентральных расстояниях соответственно 30 и 40 км. Наклономеры представляют собой два сообщающихся сосуда со ртутью, и наклоны обнаруживаются через изменения емкости. Наклоны, зарегистрированные на обеих станциях перед землетрясениями, характеризовались почти линейным законом изменения со скоростью, равной  $8 \cdot 10^{-10}$  рад/ч, и, по-видимому, продолжались в течение месяца. Это становится ясно видно после удаления из первоначальных записей

приливных наклонов. Непосредственно перед землетрясениями в Беркли наблюдались убыстряющиеся изменения наклонов, зашкалившие прибор. Записи до и после землетрясений приведены на рис. 7.14 [489].

Силвестер и Поллард [435] во время проведения съемок на четырехугольном полигоне вблизи участка разлома Силмар, появившегося при землетрясении 9 февраля 1971 г. в Сан-Фернандо (см. § 5.7.5), наблюдали аномальное отклонение пузырька уровня теодолита Вильда Т-2. Их пункт наблюдения находился где-то возле точки *e* на рис. 5.67. Такой кажущийся наклон имел место между 00 ч 40 мин и 01 ч 35 мин среднего гринвичского времени 21 февраля 1971 г. Этот кажущийся наклон по направлению к разлому достигал настолько большой величины ( $2'$ ), что кажется невероятным, чтобы он имел связь с сейсмической активностью, но вместе с тем трудно найти какое-либо другое правдоподобное объяснение. Примерно в 10 км к северу от этого пункта наблюдения соответственно в 05 ч 50 мин и 07 ч 15 мин среднего гринвичского времени произошли два сильных афтершока с магнитудами 4,7 и 4,5. Если этот наклон является предвестником, то время предвестника составляет около 4 ч.

К. Л. Кук и Дж. М. Андерсон (см. [219]) сообщали о наблюдении ряда предвестников (наклонов и деформаций) при местных землетрясениях на эпицентральных расстояниях в несколько десятков километров от обсерватории Гранит-Маунтин, расположенной вблизи разлома Уосатч, около 25 км к югу от Солт-Лейк-Сити, штат Юта. Магнитуды землетрясений были в пределах от 2 до 3.

Во время землетрясения 21 февраля 1973 г. с магнитудой 6,0 близ мыса Мугу в Калифорнии на семи станциях Южной Калифорнии работали девять наклономеров [8]. Эпицентральные расстояния были в пределах от 50 до 90 км. Наблюдались необычно большие наклоны, но никаких предвестников обнаружено не было. Согласно опыту японских исследований, это неудивительно. Во многих случаях при землетрясениях с магнитудой около 6 не наблюдалось никаких предвестников, если эпицентральные расстояния превышали 40—50 км.

Недавно вдоль участка разлома Сан-Андреас в районе Холлистера была установлена группа из 14 скважинных наклономеров [188]. Расстояния между соседними приборами около 6 км. Глубина, на которой они установлены, составляет всего 2 м. Расстановка приборов тщательно продумана, с тем чтобы рельеф на расстоянии 1—4 км от разлома был приблизительно радиально-симметричен.

Для десятков землетрясений с магнитудами 2,5—4,3 не было обнаружено никаких следов быстрых изменений наклона непо-

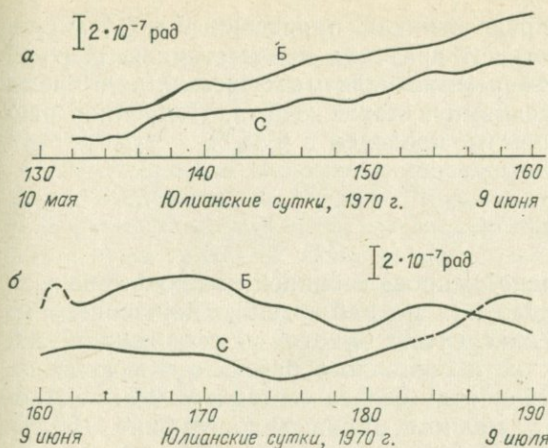


Рис. 7.14. Аномальные изменения наклонов земной поверхности перед роением землетрясений в Данвилле (Калифорния). На кривых наклонов перед землетрясениями (а) и после них (б) на записях в Беркли и в форте Сан-Франциско, обозначенных соответственно Б и С, видны изменения долгосрочного хода и кратковременный сигнал, записанный непосредственно перед роением 12 июня 1970 г. [489].

средственно перед толчком. Однако оказалось, что процесс монотонного наклона в определенном направлении перед местными землетрясениями нарушается, а после толчка процесс монотонного наклона продолжается в другом направлении. К середине 1974 г. накопилось десять случаев подобного эффекта, и не было ни одного случая, где бы он наблюдался без землетрясения. Например, такой эффект имелся вблизи Холлистера к юго-западу от него за 15 суток до землетрясения с магнитудой 4,3, происшедшего 26 декабря 1973 г. на эпицентральной расстоянии 17 км к северо-западу. Согласно [188], время начала предвестника  $T$  (в сутках) связано с магнитудой  $M$  соотношением

$$\lg T = 0,8M - 1,9, \quad (7.2)$$

полученным в [480]. В настоящее время поиски предвестников с помощью групп скважинных наклономеров представляются чрезвычайно перспективными.

#### 7.7.4. Другие примеры

В работе [57] сообщается о наклонах-предвестниках, обнаруженных в Италии. Однако Островский [306] указал, что значения наклонов в этих случаях очень большие, а поскольку погрешки там также велики, к этим данным о предвестниках нужно относиться с большой осторожностью.

Обобщая данные о предвестниках, приведенные в § 7.7, следует указать, что существуют два типа предвестников. Первый тип характеризуется временем, исчисляемым часами, в то время как второй — днями, месяцами и даже годами. Подробное рассмотрение этих двух типов мы проведем в § 15.5.

## 7.8. ЗЕМНЫЕ ПРИЛИВЫ

Нисимура [287] проанализировал записи наклономеров за 1942—1946 гг. на обсерватории по наблюдению движений земной коры Махимине Университета Киото, расположенной недалеко от центральной части восточного берега о. Кюсю (Япония). Кратчайшее расстояние до берега составляет 28 км. Наблюдения проводились в медном руднике на глубине 165 м. Вмещающая порода — палеозойские глинистые сланцы.

В результате анализа Нисимура выделил значительные флуктуации амплитуды приливных компонент  $M_2$ ,  $O_1$  и  $S_2$ . Эти приливы определяются главным образом деформацией земной коры под воздействием давления океанской воды, а не приливными деформациями твердой Земли, вызванными притяжением Луны и Солнца. Флуктуации приливной компоненты  $M_2$  столь велики, что отношение максимальной и минимальной амплитуд достигает 4.

По мнению Нисимуры, существует некоторая связь между изменениями амплитуды приливов и вековыми вариациями наклонов. Представляется вероятным, что увеличение наклона поверхности в направлении ближайшего моря соответствует увеличению амплитуды приливных вариаций. Хотя не было обнаружено определенной корреляции между изменениями амплитуды приливов и землетрясениями под морем к востоку от о. Кюсю, где уровень сейсмической активности довольно высок, Нисимура все же предполагал, что между изменениями амплитуды приливов и общим уровнем сейсмической активности имеется некоторая связь.

Если изменения амплитуды приливов, зарегистрированные в Махимине, представляют собой действительный эффект, тогда можно считать, что упругие свойства земной коры в районе обсерватории довольно сильно меняются, хотя в начале 1950-х годов было трудно предложить какой-либо физический механизм, объясняющий столь большие изменения. Дальнейшие наблюдения в Махимине показывают меньшие флуктуации амплитуд приливов (Т. Танака, частное сообщение, 1974). В этот же период понизился и уровень сейсмической активности.

Учитывая развитую в последние годы теорию дилатансии (см. гл. 14), вполне можно представить себе такое состояние

земной коры, когда ее упругие свойства могут значительно изменяться. Возможно, новаторская работа Нисимуры имеет какое-то отношение к дилатансии, возникающей в районе обсерватории, однако для такого предположения нет никаких доказательств.

На совместной американо-японской конференции в Боулдере (штат Колорадо) в 1973 г. Роминг, Мейджер и Батлер (см. [219]) отмечали важность наблюдения приливов для предсказания землетрясений. Они ссылались на работу Су [426], который анализировал приливы по записям деформографов на пяти обсерваториях, расположенных в пределах круга радиусом 25 км с центром в Денвере (штат Колорадо). Он показал, что амплитуда приливной компоненты  $M_2$  изменяется в два раза между станциями, отстоящими друг от друга на 5 км, и этот эффект, вероятно, вызван различием подстилающих пород и, следовательно, упругих свойств тех местностей, где находится станция. Нисимура [287] уже давно высказал догадку о существовании такого влияния строения земли в месте расположения станции.

Однако следует указать, что, как отмечается в [313], данные, которые анализировал Су, очень сильно искажены помехами, и поэтому его выводы могут быть ошибочными.

Амплитуда приливной компоненты  $M_2$  по записям наклономера в точке на расстоянии 10 км от разлома Сан-Андреас оказалась аномально большой [488]; она почти целиком определяется давлением океанской воды на морское дно.

К 1973—1974 г. стало ясно, что приливы в твердом теле Земли зависят главным образом от местных особенностей упругих свойств земной коры. Особый интерес представляют временные вариации упругих свойств, которые, возможно, вызваны дилатансией в связи с землетрясениями. В работе [33] теоретически исследованы изменения, вызванные в приливной компоненте  $M_2$  кольцевой дилатантной зоной в сферической Земле. На границе между дилатантной и недилатантной зонами должно наблюдаться существенное увеличение наклонов и деформаций, вызванных приливами. Теоретические расчеты показывают, что возможно увеличение наклонов и деформаций на несколько десятков процентов и соответственно изменение  $V_p/V_s$  на 15%. Если перед землетрясением возникает дилатансия, ее будет легко обнаружить по наблюдениям земных приливов. Такака и Като [440] на основе упрощенного расчета земных приливов также указали на возможность обнаружения вариаций в приливах посредством наблюдений на обсерватории, расположенной на берегу моря, для случая, если эти вариации вызваны дилатансией земли близ тихоокеанского побережья Центральной Японии со стороны моря.

## СЕЙСМИЧЕСКАЯ АКТИВНОСТЬ

Чтобы предсказывать землетрясения, исключительно важно знать, где и как именно происходят землетрясения. Этот вопрос является также одним из основных в современной сейсмологии, и ему посвящен ряд прекрасных монографий (например, [129, 231, 331]).

Поскольку в упомянутых книгах подробно рассмотрен вопрос о сейсмичности Земли, автор считает излишним повторять его здесь в деталях. Хотелось бы только отметить, что почти все землетрясения происходят в пределах Тихоокеанского и Альпийско-Азиатского поясов. Действительно, по оценкам Гутенберга и Рихтера [129], соответственно 75,6 и 22,1% энергии, выделяемой при землетрясениях, приходится на эти два пояса.

### 8.1. СВЯЗЬ С ТЕКТОНИКОЙ ПЛИТ

В учебниках по геофизике и сейсмологии (например, [96]) можно найти карты распределения эпицентров землетрясений на земном шаре, и поэтому здесь мы не будем приводить таких иллюстраций. Однако следует отметить, что точность определения эпицентров землетрясений в 60-х годах возросла, в основном благодаря созданию силами Береговой и геодезической службы США (ныне NOAA) во многих странах мира более чем 125 сейсмологических обсерваторий, оснащенных стандартными сейсмографами.

Одной из наиболее интересных особенностей распределения эпицентров на земном шаре является почти линейное расположение эпицентров в средней части основных океанов. Линия эпицентров, идущая с севера на юг в Атлантическом океане, огибает оконечность Южной Африки и входит в Индийский океан, где делится на две ветви. Одна ветвь идет к Красному морю, где делает резкий поворот и заканчивается на Восточно-Африканских рифтах. Вторая огибает южную оконечность Австралии, продолжается до Южной Америки и входит в Калифорнийский залив. В пределах этих поясов очень сильных землетрясений не происходит.

Сейсмическая энергия, превышающая в 40 или более раз энергию, выделяемую в остальных океанических поясах, выделяется вдоль пояса, идущего по периферии Тихого океана и соединяющего Новую Зеландию, о-ва Кермадек, Тонга, Самоа, Фиджи, Соломоновы о-ва, северную часть Новой Гвинеи, Филиппинские о-ва, Тайвань, о-ва Рюкю, Японские и Курильские о-ва, восточную часть Камчатки, Алеутские о-ва, Аляску и западные побережья Северной, Центральной и Южной Америки.

Другой важный сейсмический пояс проходит через Италию, Балканы, Турцию, Среднюю Азию, Иран, Афганистан, Памир, Гималаи, Тибет и Западный Китай.

В последних двух сейсмических поясах часто происходят сильные землетрясения с магнитудой более 8. Большая часть землетрясений с глубиной очага более 100 км происходит вдоль островных дуг, обрамляющих Тихий океан, хотя на такой глубине случаются землетрясения и под Эгейским морем, Гималаями и Бирмой. Землетрясения глубже 700 км пока не отмечены.

### 8.1.1. Экструзия

Очаги землетрясений, происходящих в средних частях Тихого, Атлантического и Индийского океанов, неглубоки. Линейное расположение эпицентров в этих океанах совпадает с положением подводных горных хребтов, т. е. со Срединно-Атлантическим хребтом, Восточно-Тихоокеанским поднятием и т. д.

В соответствии с современными представлениями геофизики и геологии (например, [161, 164]) эти океанические хребты представляют собой гигантские тектонические трещины, по которым из недр Земли поднимается вещество, нагретое до высокой температуры. Под земной корой, имеющей толщину соответственно 30—50 км и 5—10 км под континентами и океанами, залегает слой, называемый мантией. В противоположность коре, состоящей в основном из базальта и гранита, есть основания полагать, что мантия непосредственно под корой образована из более тяжелого вещества типа перидотита. Мантия простирается до глубин порядка 2900 км, где она соприкасается с ядром, которое, как полагают, в основном состоит из расплавленного железа.

### 8.1.2. Конвекция в мантии

Полагают, что Земля образовалась несколько миллиардов лет назад путем слипания метеоритного вещества. Тепло, выделяющееся при распаде естественных радиоактивных веществ, накапливается внутри Земли, размеры которой (радиус около

6400 км) не допускают быстрого излучения тепла с ее поверхности. Поэтому разумно предположить, что разность температур между поверхностью Земли и границей ядро—мантия достигает нескольких тысяч градусов по Цельсию.

Ситуация здесь почти такая же, как при нагревании снизу чайника с водой. Следовательно, в мантии может происходить конвекция. И это несмотря на то, что при быстро меняющемся механическом воздействии, например при распространении сейсмических волн, вещество мантии ведет себя как твердое тело. Полагают, что когда мантия подвергается действию некоторых сил в течение десятков или сотен тысячелетий, она ведет себя как упруговязкая среда.

Идея конвекции в мантии была выдвинута Холмсом [164] несмотря на то, что в то время было очень мало геофизических фактов в ее пользу. Однако в 60-х годах накопились данные наблюдений, подтверждающие гипотезу конвекции в мантии.

### *8.1.3. Образование дна океана*

Предположим, что благодаря конвекции в мантии ее вещество в местах океанических хребтов поднимается вверх. Если это так, то легко понять, почему в этих местах на дне океана образуются поднятия. Вещество, поднимающееся из недр Земли, не может беспредельно накапливаться и стремится распространиться в стороны от хребтов. Поэтому там будут преобладать растягивающие силы, иногда приводящие к образованию рифтов, таких, как рифт в Срединно-Атлантическом хребте.

Развитие геотермических исследований в последние годы показало, что тепловой поток из недр Земли в зоне океанических хребтов относительно велик и вещество с высокой температурой должно в этих местах находиться вблизи поверхности Земли.

Гипотеза о том, что молодое морское дно образуется на океанических хребтах и в стороны от них должно распространяться недавно затвердевшее вещество, становится почти достоверной благодаря геомагнитным данным, о которых будет идти речь в следующем разделе этой главы.

### *8.1.4. Вытянутые системы магнитных аномалий в океане*

Методика измерения геомагнитных полей в конце 50-х — начале 60-х годов была существенно улучшена благодаря использованию высокоточных протонных магнитометров, которые можно буксировать за кораблем. Интенсивные магнитные наблюдения на море привели к обнаружению неожиданных аномалий геомагнитного поля (например, [473]).

В настоящее время установлено, что на большей части океанов имеются магнитные аномалии с амплитудой в несколько сотен гамм и протяженностью в десятки километров. На континентах аномалии таких больших размеров обычно не наблюдаются. Действительно, эти аномалии исчезают с приближением к континентальным шельфам. По мере совершенствования морских наблюдений стало очевидным, что такие аномалии располагаются параллельно осям океанических хребтов. Если соединить максимумы или минимумы профилей аномалий, то получатся системы линий, параллельных оси хребта. Симметрия аномалий относительно оси океанического хребта настолько отчетлива, что трудно отличить профиль магнитной аномалии, секущий хребет, от его зеркального отображения относительно оси хребта.

#### *8.1.5. Обращения геомагнитного поля*

Объяснить системы морских магнитных аномалий, опираясь на существующий магнетизм горных пород, весьма трудно: необходимо было бы допустить неправдоподобно большую интенсивность и резкие контрасты намагниченности.

Чтобы правильно интерпретировать морские аномалии, необходимо знание палеомагнетизма, с помощью которого определяется направление и напряженность геомагнитного поля в доисторическую и геологические эпохи.

Мы здесь не можем подробно рассматривать наиболее важные результаты палеомагнитных исследований, достигнутые в последние годы. Однако следует упомянуть, что факт частых обращений геомагнитного поля в течение геологического времени получил подтверждение благодаря интенсивным палеомагнитным исследованиям. Палеомагнитные исследования вулканических пород в сочетании с определением возраста методом радиоактивных изотопов позволили установить, что за последние 3,6 млн. лет магнитное поле Земли изменяло свою полярность по меньшей мере девять раз [65]. Намагниченность морских и озерных осадков также убедительно свидетельствует в пользу этих обращений поля. Согласно существующим моделям происхождения магнитного поля Земли, подобные инверсии полярности, обнаруженные по палеомагнитным данным, вполне возможны (например, [333, 336]).

#### *8.1.6. Разрастание дна океана*

Вайн и Мэттьюз [474] предложили теорию, с помощью которой, возможно, удастся объяснить морские магнитные аномалии, комбинируя конвекцию в мантии и обращения геомагнитного поля. Когда вещество мантии, вытесненное из недр Земли,

затвердевает под осями океанических хребтов, то вновь образованное морское дно приобретает намагниченность в направлении существующего в это время геомагнитного поля. Если направление этого поля совпадает с направлением современного поля (т. е. имеет нормальное направление), то говорят, что намагничение нормально. Спустя некоторое время геомагнитное поле испытывает обращение, и морское дно, образованное в этот период, будет иметь обратную намагниченность. Если морское дно раздвигается в стороны от оси хребта, то оно будет представлять собой систему с чередующейся магнитной полярностью. Таким образом, введя намагниченность в прямом и обратном направлениях, мы избавились от необходимости искать объяснение невероятно больших различий намагниченности.

Периоды нормального и обратного намагничивания известны из палеомагнитных исследований вулканических пород. Благодаря этому можно оценить скорость разрастания морского дна, разделив расстояние от оси хребта до отдельной аномалии на время, необходимое для того, чтобы эта линия достигла своего современного положения. Найденная таким образом скорость роста дна океана составляет 2—5 см/год.

Представляется также возможным применение гипотезы расширения дна океана к намного более древним магнитным линейным аномалиям. В статье [160] сделан вывод, что за последние 76 млн. лет произошло 171 обращение земного поля. Таким образом, для некоторых частей Мирового океана становится возможным построить изохроны образования морского дна.

### 8.1.7. Тектоника плит

Внимательное изучение процесса разрастания океанического дна наводит на мысль о том, что движения дна можно аппроксимировать вращением жестких плит, покрывающих поверхность Земли. В настоящее время большое число сторонников приобрела модель, в соответствии с которой Земля покрыта большими плитами и каждая из этих плит вращается вокруг собственной оси. Предполагается, что имеется еще некоторое число второстепенных плит. Оказывается, что внутри плит происходят лишь очень немногие важные геофизические и геологические явления. Явления же, важные с геофизической и геологической точек зрения, такие, как горообразование, извержение вулканов, землетрясения и т. п., в основном приурочены к границам плит.

Описанная модель, названная тектоникой плит, вероятно, способна объяснить с единой точки зрения многие геофизические и геологические явления (например, [179]).

### 8.1.8. Субдукция

Рассмотрим, например, Восточно-Тихоокеанское поднятие. Излившееся вещество мантии образует две плиты толщиной примерно 100 км. Плита, движущаяся в восточном направлении, стремится погрузиться под континент Южной Америки, а плита, перемещающаяся на запад, достигает Алеутской, Камчатской, Курильской и Японской дуг, где она также стремится погрузиться под континентальную плиту.

Много землетрясений, включая сильные с магнитудой 8 и более, происходит в связи с таким поддвигом (субдукцией) океанических плит. Описанный выше процесс тектоники плит схематически изображен на рис. 8.1 [472]. Погружающиеся плиты, видимо, достигают глубины порядка 700 км, где они ассимилируются. Многие глубокофокусные землетрясения приурочены к погружающимся плитам. Трение на границе между континентальной и океанической плитами может создать избыток тепла, и в результате там может образоваться расплавленная магма. Последняя может подняться к поверхности Земли, образуя вулканы. Большие тепловые потоки, наблюдаемые на дне окраинных морей, также можно объяснить с помощью этого процесса.

Представление о разрастании океанического дна и тектонике плит было первоначально выдвинуто на основе данных, полу-

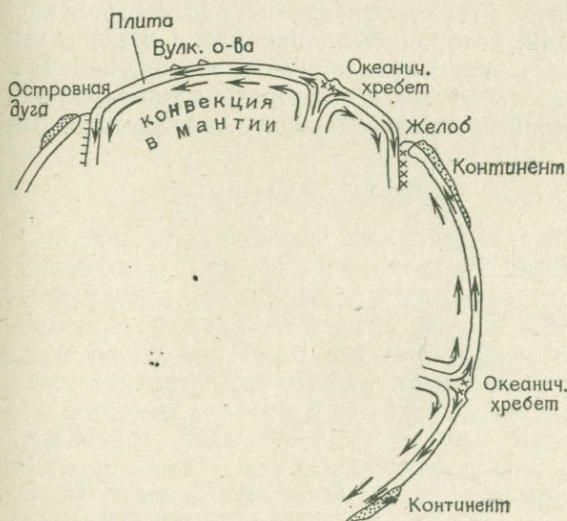


Рис. 8.1. Схема образования и ассимиляции литосферных плит [472]. X = землетрясения.

ченных в районе океанических хребтов. Поэтому интерпретация процессов, происходящих у островных дуг, пока еще ни в коем случае не завершена. Какая сила смещает плиты? Почему Тихоокеанская плита погружается под Азиатскую? Почему Атлантические плиты движутся вместе с Американским и Африканским континентами в противоположность Тихоокеанской плите? Остается еще много вопросов, требующих ответа.

### 8.1.9. Сжатие и упругая отдача

Согласно современной теории тектоники плит, островная дуга, например Японская, сжимается при раздвигании океанической плиты. В то же время эта плита тянет островную дугу вниз, как это показано на рис. 8.2, в результате чего перед дугой образуется глубоководный желоб. Высоточные съемки, проведенные поперек Японских о-вов, показали, что Японская дуга вообще находится в состоянии сжатия (см. § 5.4.3).

На рис. 8.2, *а* показано состояние сжатия дуги. Тихоокеанская сторона Японских о-вов смещается в сторону суши и в то же время испытывает тенденцию к опусканию. Однако, поскольку прочность земной коры конечна, кора должна претерпеть разрыв, который скорее всего произойдет на границе раздела между континентальной и океанической плитами (рис. 8.2, *б*). В этот момент напряженная кора испытает упругую отдачу и сдвинется в сторону океана, испытывая наряду с этим поднятие, которое также показано на рис. 8.2, *б*. Энергия упругой деформации, которая была накоплена в коре, высвободится и перейдет в энергию сейсмических волн, излучаемых из зоны разрыва. Огромная масса морской воды, которая поднимется вверх в процессе упругой отдачи, образует волны цунами.

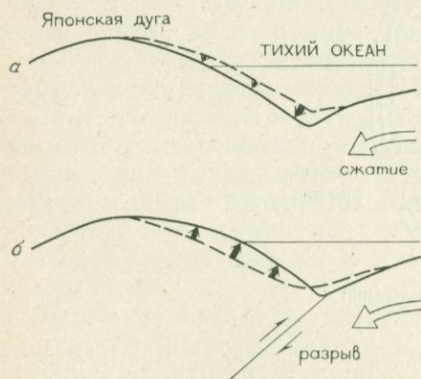


Рис. 8.2. Сжатие и упругая отдача островной дуги. *а* — состояние сжатия; *б* — упругая отдача.

Нечто похожее на описанную выше схему может явиться грубой моделью очень сильных землетрясений, происходящих в море вблизи тихоокеанского побережья Японии, Курильских о-вов, Камчатки, Алеутских о-вов и Аляски. Движение плиты будет происходить на протяжении геологического времени, и предполагаемый цикл сжатия и упругой отдачи будет длиться так же долго. Поэтому островная дуга, подобная Японии, к сожалению, видимо, никоим образом не может избавиться от сильных землетрясений.

Если описанная выше схема приемлема, то понятно, почему в программе прогноза землетрясений уделяется большое внимание контролю за процессом накопления деформаций в земной коре с помощью повторных геодезических съемок. Предельная величина деформации земной коры известна из статистических данных (см. § 15.3), и поэтому, имея данные о накоплении деформаций, можно грубо оценить вероятность возникновения землетрясения. Зная пространственную протяженность области деформации земной коры, вполне можно оценить зону, в которой следует ожидать землетрясение, и, возможно, даже его магнитуду. Андерсон [17], приняв во внимание усиление и ослабление связи между напряженной литосферной плитой и вязкой астеносферой, предложил правдоподобную модель сильных землетрясений в зоне островных дуг.

Однако рассмотрение землетрясений, которые не связаны непосредственно с движением глобальных плит, показывает, что описанная модель сжатия и упругой отдачи слишком проста и не способна объяснить все виды землетрясений. Например, в Японии землетрясения умеренной силы с магнитудой около 7 происходят и на суше, и вдоль побережья Японского моря. Физический механизм этих землетрясений пока еще не установлен.

#### *8.1.10. Трансформные разломы*

Существуют границы, на которых две плиты скользят одна относительно другой. Океанические хребты рассечены множеством зон разломов, в результате чего весь хребет оказывается состоящим из многих отдельных участков, смещенных вдоль разломов. По обе стороны той части зоны разлома, которая соединяет один отрезок хребта с другим, движения участков морского дна или плит происходят в противоположных направлениях. Вильсон [486] назвал эту часть зоны разлома трансформным разломом. Исследования Сайкса [433] по механизму очага подтвердили, что землетрясения, происходящие в этих местах, вызваны горизонтальным сдвиговым напряжением, которое может создаваться при таком относительном движении.

Разлом Сан-Андреас в Калифорнии, Альпийский разлом в Новой Зеландии и т. д. также приурочены к границам двух плит, скользящих друг относительно друга. Эти разломы характеризуются крипом и сдвиговыми движениями. Последние иногда приводят к довольно сильным землетрясениям. Полагают, что некоторые из этих разломов представляют собой трансформные разломы.

## 8.2. РЕГИОНАЛЬНАЯ СЕЙСМИЧНОСТЬ И МИКРОЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ

### 8.2.1. Формула Гутенберга—Рихтера

Известно, что, чем меньше магнитуда землетрясений, тем чаще такие землетрясения происходят [128, 182]. Число  $N$  землетрясений с магнитудой  $M$ , происшедших в некотором районе за определенный промежуток времени, связано с  $M$  следующим соотношением:

$$\lg N = a - bM, \quad (8.1)$$

где  $a$  и  $b$  — постоянные коэффициенты. Полученное эмпирически соотношение (8.1) обычно называют формулой Гутенберга—Рихтера.

Постоянная  $b$  приблизительно равна единице, так что частота землетрясений с магнитудой  $M-1$  приблизительно в 10 раз превышает частоту землетрясений с магнитудой  $M$  и т. д. Вероятно, уравнением (8.1) можно пользоваться и в случае очень слабых землетрясений, магнитуда которых меньше нуля.

Современная аппаратура позволяет записывать движения почвы, вызванные землетрясением, с увеличением приблизительно в 1 миллион раз в некотором частотном диапазоне. В настоящее время большинство сейсмографов имеют электромагнитную регистрацию и соответствующее записывающее устройство. Это позволяет изучить сейсмичность некоторого района за относительно короткий промежуток времени путем наблюдения за микроземлетрясениями ( $3 > M \geq 1$ ) и ультрамикроземлетрясениями ( $M < 1$ ).

### 8.2.2. Изучение микроземлетрясений в Японии

В § 4.2.5 дается подробное описание сетей сейсмических станций в Японии. В результате многочисленных наблюдений сетью обсерваторий, предназначенных для регистрации микроземлетрясений (см. рис. 4.6), был накоплен большой материал

по сейсмичности, что позволило установить расположение сейсмически активных и неактивных районов. На рис. 8.3а — 8.3в приведены карты распределения эпицентров микроземлетрясений соответственно для Северной, Центральной и Южной Японии по данным этой сети станций [235, 301].

Из рисунков видно, что в районах с высокой сейсмичностью эпицентры иногда располагаются вдоль прямых. По-видимому, многие из таких линейных сгущений эпицентров хорошо коррелируют с активными разломами (см. § 11.2.2 и рис. 11.1). Такая корреляция была проведена для областей Кинки — Тюгоку, т. е. части Центральной Японии вблизи Киото и Осаки. Использовались данные густой сети обсерваторий по регистрации микроземлетрясений за продолжительный промежуток времени (см., например, [170]).

Таким путем установлено, что значительное число микроземлетрясений все еще происходит вдоль тех сейсмических разломов, которые возникли при землетрясении 1927 г. в Танго (см. § 5.3.2, 5.6.5) и 1943 г. в Тоттори (см. § 5.3.4 и 5.6.9). Обычно предполагается, что в земной коре в Центральной Японии преобладают сжимающие силы, действующие почти однородно в широтном направлении [171], но распределение микроземлетрясений не совсем однородно.

Много микроземлетрясений происходит к югу от Срединной тектонической линии (см. § 11.2.2), активного сдвига, проходящего через о. Сикоку и п-ов Кии, и в другой зоне в области Тюгоку (западная часть Хонсю) на глубине 3—15 км. С другой стороны, наблюдается заметное уменьшение числа землетрясений под Внутренним морем (расположенным между двумя упомянутыми зонами). Это наводит на мысль, что различие может быть вызвано различием физических свойств земной коры в этих зонах: в зонах высокой сейсмичности преобладает метаморфизм низких температур — высоких давлений, тогда как земная кора в зоне слабой сейсмичности испытывала метаморфизм высоких температур — низких давлений. Можно предположить, что в первом случае кора хрупкая, в то время как во втором она обладает заметной вязкостью.

Рассматривая район Хоккайдо — Тохоку, самую северную часть Японии, можно отметить, что очень много микроземлетрясений происходит на тихоокеанском побережье и в море вблизи него. В этой зоне также часто происходят очень сильные землетрясения, в то время как микросейсмичность внутренних областей Хоккайдо очень низка.

В области Тохоку, северной части Хонсю, большое число микроземлетрясений происходит вдоль тектонической линии меридионального простиранья. На рис. 8.3а показаны также афтершоки, связанные с сильными землетрясениями магнитуды

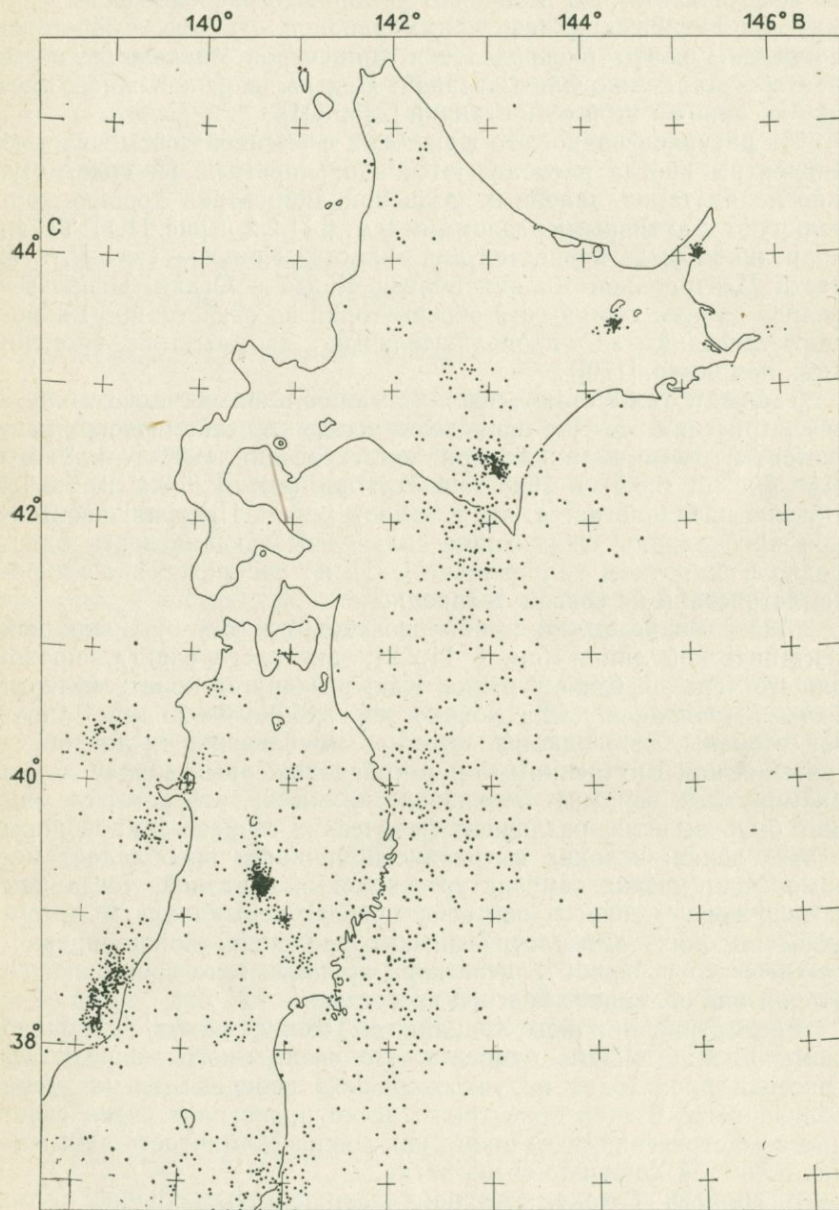
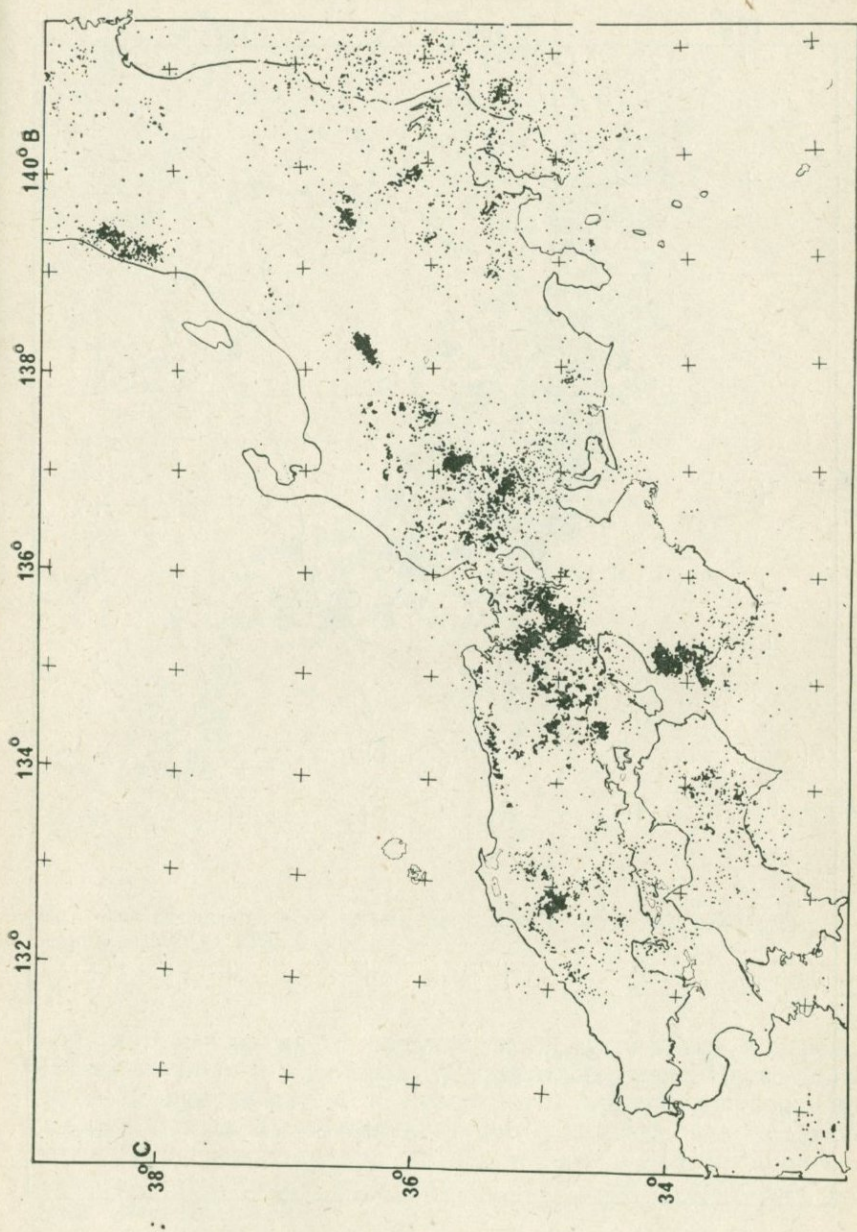


Рис. 8.3а. Карта микросейсмичности Северной Японии [235].



Р и с. 8.36. Карта микросейсмичности Центральной Японии [235].

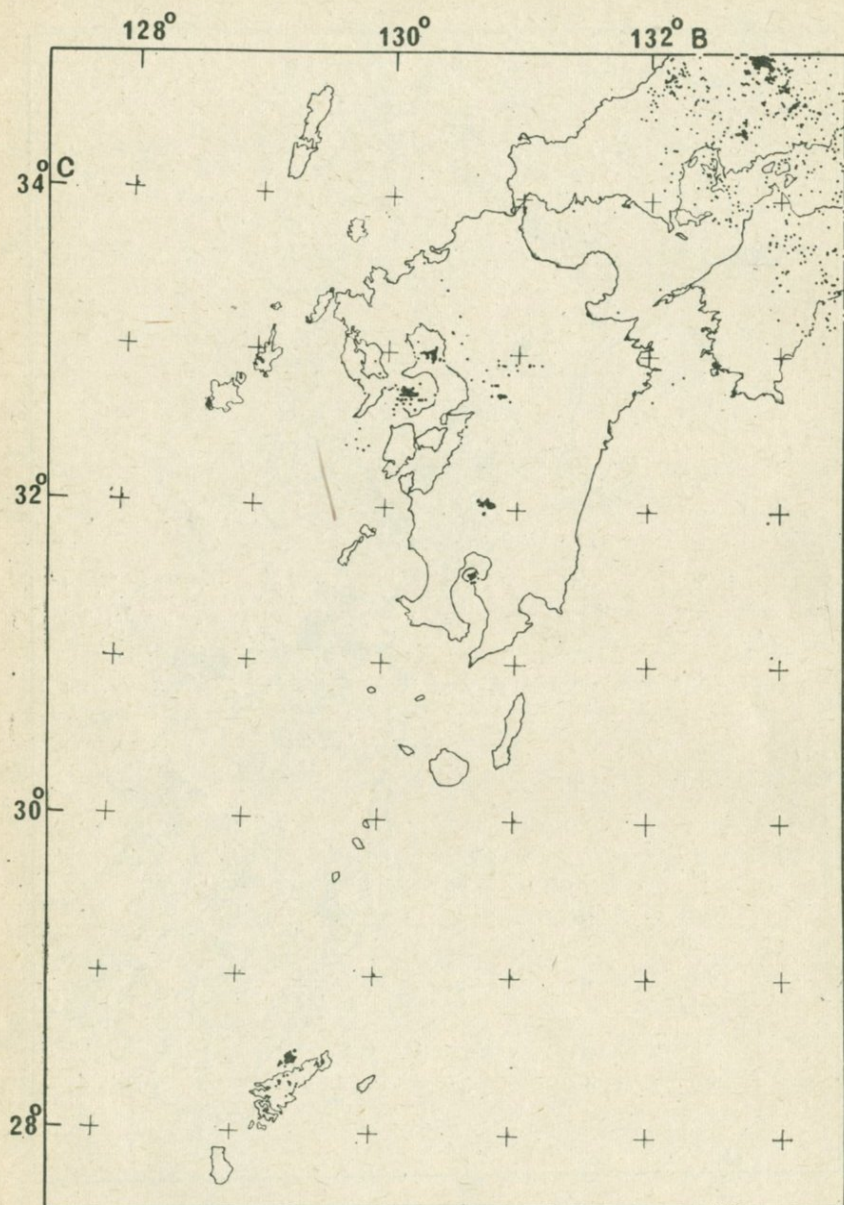


Рис. 8.3в. Карта микросейсмичности Южной Японии [235].

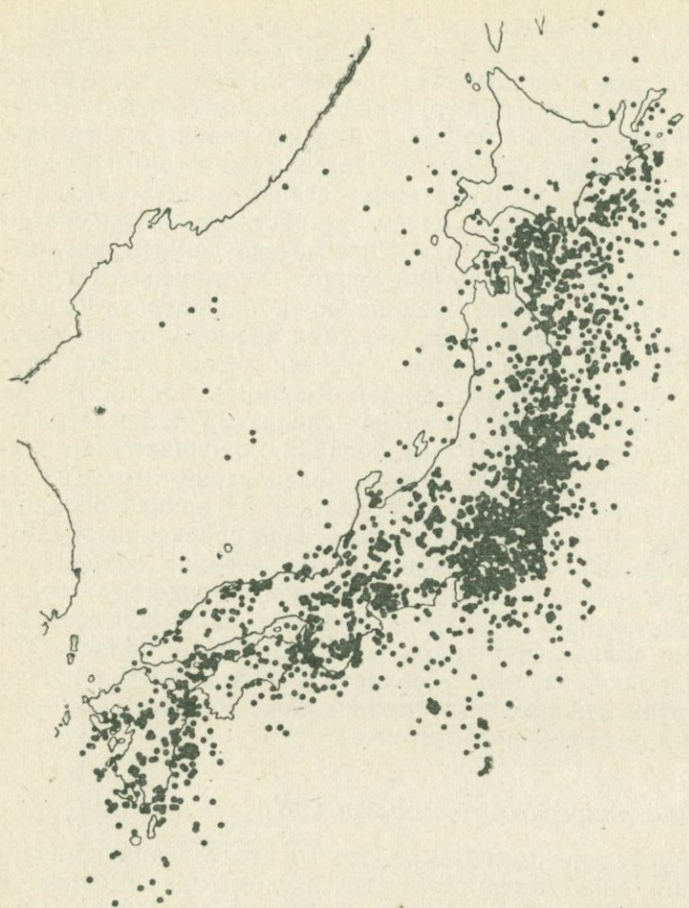


Рис. 8.4. Эпицентры 3147 весьма ощутимых и ощутимых землетрясений за период с 1900 по 1950 г. [450].

6—7, которые время от времени происходят вдоль побережья Японского моря и в районах, удаленных от моря. Много землетрясений приурочено и к поверхности погружающейся литосферной плиты. Тихоокеанская плита, которая, как полагают, начинает погружаться под Японскую дугу в районе Японского желоба, по-видимому, под этой частью Японии достигает глубины 100—150 км.

В области Канто, близ Токио, где пересекаются Японская и Идзу-Марианская дуги, распределение микроземлетрясений не

имеет определенного характера, но, хотя с первого взгляда и не видно никакой закономерности в распределении эпицентров, при внимательном рассмотрении расположений гипоцентров выясняется, что много землетрясений происходит вдоль плоскости, погружающейся в сторону суши в направлении с востока на запад [458]. Цумура отмечал сходство между вертикальным распределением очагов микроземлетрясений, полученным по наблюдениям за 10 месяцев, и тем же распределением очагов землетрясений с магнитудой  $M=4$  и выше по данным текущей обработки сети JMA за 10-летний период. Это показывает, что общий характер сейсмичности района можно определить из наблюдений микроземлетрясений за короткий промежуток времени.

На рис. 8.4 показано распределение эпицентров весьма ощутимых и ощутимых землетрясений в Японии и вблизи нее за период 1900—1950 гг. [450]. Согласно делению JMA, землетрясение называется весьма ощутимым, когда оно ощущается на эпицентральной расстоянии 300 км или больше; ощутимым называется землетрясение, если оно ощущается на эпицентральной расстоянии 200 км и несколько больше. При сравнении рис. 8.4 и 8.3а—8.3в видно, что картина распределения эпицентров микроземлетрясений похожа на распределение эпицентров более сильных землетрясений. Различия заметны лишь для района Тихого океана вблизи восточного берега Хоккайдо, области Токай в Центральной Японии и области с запада о. Сикоку по о. Кюсю. В этих районах сеть станций для наблюдений микроземлетрясений пока еще недостаточна.

### 8.2.3. Изучение микроземлетрясений в США

В США проведена большая работа по исследованию микроземлетрясений, происходящих в зоне разлома Сан-Андреас и связанных с ним разломах (см., например, [159]). Итон (см. [219]) сделал сообщение о наблюдениях за микроземлетрясениями, проведенных NCER. Сейчас в северной части разлома Сан-Андреас действует большая группа станций, включающая 102 сейсмометра, на площади  $350 \times 50$  км<sup>2</sup>. Сейсмические сигналы передаются по телеметрическим каналам связи в NCER в Менло-Парк (Калифорния), где они записываются и одновременно обрабатываются в реальном масштабе времени, включая определение координат гипоцентра.

Например, как видно из рис. 8.5, было определено очень большое число эпицентров землетрясений, происшедших в 1970 г. Одной из наиболее ярко выраженных особенностей этого распределения микроземлетрясений безусловно является его приуроченность к разлому Сан-Андреас вблизи Холлистера, южнее Сан-Франциско, и далее на юг, где разлом испытывает

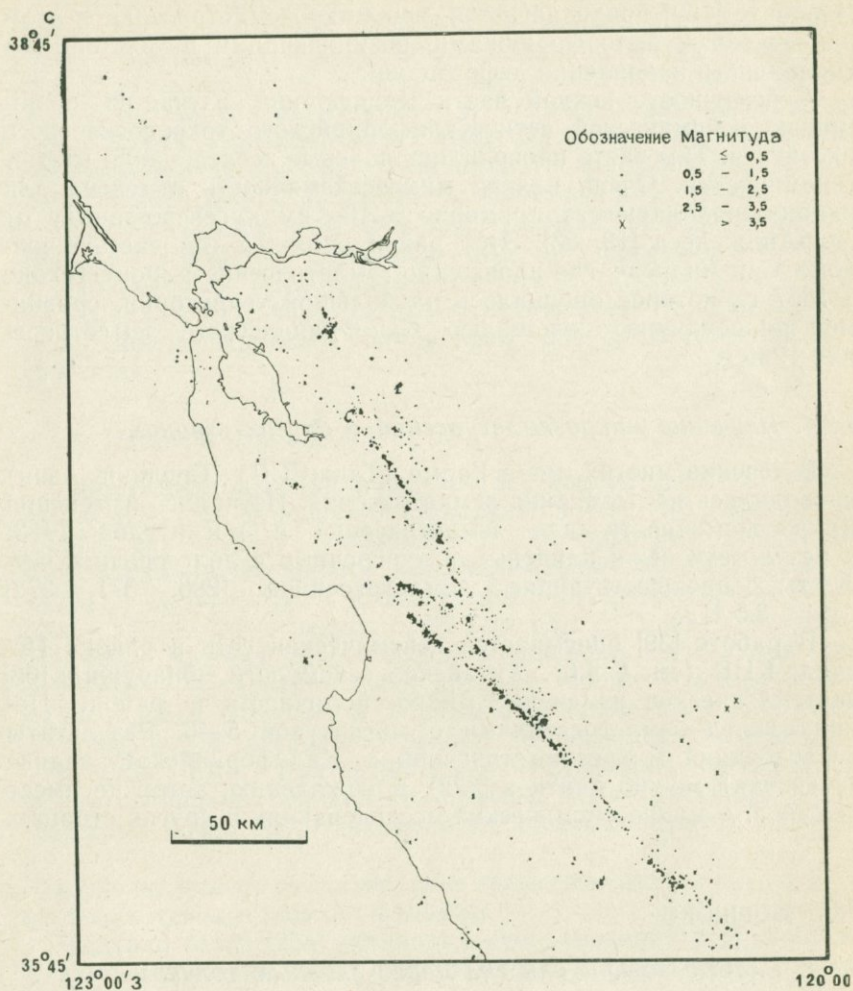


Рис. 8.5. Землетрясения в Центральной Калифорнии в 1970 г., записанные сетью сейсмографов NCER [159].

крип. Однако эта вытянутая группа эпицентров микроземлетрясений, по-видимому, не захватывает п-ов Сан-Франциско, а скорее приурочена к разломам Хейвард и Калаверас восточнее залива Сан-Франциско. На этих разломах также наблюдался крип.

На п-ове Сан-Франциско, где располагался очаг Сан-Францисского землетрясения 1906 г., микроземлетрясений происходит гораздо меньше. По-видимому, сейчас этот разлом «заперт».

В работе [159] предполагается, что микроземлетрясения в этом районе могут быть форшоками, возникающими вследствие регионального накопления деформаций.

Сейсмичность южной части Калифорнии изучается с помощью сейсмической сети Калифорнийского технологического института. Там часто проводились полевые исследования микросейсмичности. Очень низкая микросейсмичность отмечена для района, находящегося примерно в 100 км к северо-западу от Лос-Анджелеса [13, 53]. Этот район является той частью разлома Сан-Андреас, где произошло землетрясение в Форт-Техоне в 1857 г., которое ощущалось на большой территории, сравнимой по величине с площадью Сан-Францисского землетрясения 1906 г.

#### 8.2.4. Изучение микроземлетрясений в других странах

В течение многих лет в Гарме (ТаджССР, Средняя Азия) проводились исследования землетрясений. Изучались изменения микросейсмичности для землетрясений с магнитудой 1—3; в результате были найдены краткосрочные и долгосрочные эффекты, предшествующие землетрясениям [286, 371, 372] (см. § 8.3.4).

В работе [39] описывается сейсмическая сеть в районе Пекина, КНР (см. § 4.6). Китайские сейсмологи обнаружили [63] систематическое изменение микросейсмичности в районе Пекина перед землетрясениями с магнитудой 5—6. Результаты исследований микроземлетрясений в Калифорнийском заливе (Мексика) можно найти в [329]. К сожалению, автор не имеет сведений о микросейсмических исследованиях в других странах.

### 8.3. ФОРШОКИ

#### 8.3.1. Слабые толчки или гул перед главным толчком

В классической японской литературе часто можно встретить рассказы о том, что перед сильным землетрясением происходит много слабых толчков. Например, подобные форшоки ощущались местными жителями за 2 дня до землетрясения в Иге в 1854 г. ( $M=6,9$ ;  $34,8^\circ$  с. ш.,  $136,2^\circ$  в. д.), за 8 дней до землетрясения в Рикую в 1896 г. ( $M=7,5$ ;  $39,5^\circ$  с. ш.,  $140,7^\circ$  в. д.) и за 19 дней до землетрясения 1930 г. в Северном Идзу ( $M=7,0$ ;  $35,1^\circ$  с. ш.,  $139,0^\circ$  в. д.) (см. § 5.3.3, 5.6.7). Как отмечалось в § 6.1.3, имелись сообщения о том, что местные жители слышали гул, идущий из-под земли, за несколько дней до землетрясения в Хамаде в 1872 г. ( $M=7,1$ ;  $34,8^\circ$  с. ш.,  $132,0^\circ$  в. д.).

Интересное сообщение о форшоках перед землетрясением в Эдо в 1855 г. ( $M=6,9$ ) можно найти в [266]. В день землетрясения рабочий копал колодец в центре Эдо (ныне Токио). Когда он услышал звуки, подобные взрывам и исходящие из недр земли, он почувствовал тревогу и поэтому около полудня вернулся домой. Приблизительно через 10 часов в Эдо произошел основной толчок. По всей вероятности, по меньшей мере за 10 ч до основного толчка произошло много слабых форшоков.

Рихтер [331, стр. 43] приводит типичный пример последовательности форшок — основной толчок — афтершок в связи с Уиттиерским землетрясением 1929 г. ( $M=4,7$ ;  $34^\circ$  с. ш.,  $118^\circ$  з. д.) в восточной части Лос-Анджелеса, Калифорния, где за 64 дня до основного толчка произошло землетрясение средней силы.

### 8.3.2. Природа форшоков

Физическая природа форшоков все еще не ясна. По мнению Моги [254], это в основном объясняется тем, что пока наблюдалось сравнительно небольшое число форшоков землетрясений. В упомянутой работе дан анализ примерно 1500 землетрясений с магнитудой 4 и выше, которые происходили в Японии и вблизи нее в период с 1926 по 1961 г. Лишь в 60 случаях основным толчкам предшествовали форшоки. Если время предвестника  $T$  определяется как интервал времени между первым наблюдаемым толчком и основным толчком, то  $T$  колеблется в пределах от нескольких минут до нескольких сотен дней (см. табл. 15.13). Рихтер [331, стр. 70] отмечал, что «форшоки редко позволяют предсказать сильные землетрясения, так как форшоки ничем не отличаются от обычных слабых толчков».

#### *Пространственное распределение землетрясений, которым предшествовали форшоки*

Однако Моги [254] установил существование в Японии зон, где землетрясения часто сопровождаются форшоками. Это следующие зоны:

- 1) Идзу—Нагано, пересекающая центральную часть о. Хонсю;
- 2) Миёси—Хамада, префектура Северная Хиросима и префектура Симане в области Тюгоку, западная часть о. Хонсю;
- 3) Оита—Кумamoto—Нагасаки в северной части о. Кюсю;
- 4) Хиуганада — в море восточнее о. Кюсю.

Для поисков предвестников землетрясений может оказаться важным тот факт, что землетрясения, предваряемые форшоками, как правило, происходят в довольно ограниченных зонах (как упомянутые выше).

Результаты эксперимента Моги по разрушению образцов горных пород (см. § 4.2.9, 13.1.1) позволяют предположить, что в земной коре под теми зонами, где часто происходят землетрясения с форшоками, образуются средних размеров трещины, вызванные тектоническими, вулканическими и, возможно, некоторыми другими процессами. Однако на реальную земную кору результаты таких лабораторных экспериментов следует переносить с большой осторожностью.

### *Два типа форшоковой активности*

Моги [255] утверждает, что существуют два различных типа последовательностей форшоков, которые наблюдались в лабораторных экспериментах на образцах горных пород.

Тип 1: число форшоков непрерывно нарастает вплоть до момента главного толчка. Этот тип характерен для многих неоднородных хрупких горных пород.

Тип 2: форшоки происходят менее регулярно и уменьшаются перед основным толчком. Этот тип, по-видимому, встречается чаще в случае более однородных образцов горных пород.

Указанные два типа последовательностей форшоков характерны также и для естественных землетрясений.

### *Форшоки, связанные с заполнением водохранилищ*

Иногда сильное землетрясение происходит в связи с запруживанием воды и образованием искусственного озера (см. например, [367]). Такому землетрясению часто предшествуют многочисленные форшоки. Исследование землетрясения 1966 г. у оз. Кремаста ( $M=6,2$ ) в Греции показало [314], что частота форшоков возрастает вплоть до момента основного толчка, т. е. этот случай является типичным примером последовательности форшоков типа 1.

Предложена эмпирическая формула для числа форшоков ( $n$ ) на  $t$ -й день после начала их последовательности:

$$n(t) = 4736(159 - t)^{-1,99}, \quad t \leq 154 \text{ сут.} \quad (8.2)$$

Аналогичные формулы были получены для землетрясения у оз. Кариба в 1963 г. ( $M=6,1$ ) в Замбии — Родезии и землетрясений на плотине Койна в 1967 г. ( $M=5,0$ ,  $M=6,4$ ) в Индии.

Моги [258] отмечал, что характер возрастания числа форшоков для землетрясения у оз. Кремаста тот же, что и для образца гранита под напряжением, нарастающим с постоянной скоростью. В этой работе высказано предположение, что время наступления предвестника в виде форшоков зависит не только от строения коры, но и от способа приложения напряжения. Это может объяснить, почему наблюдаемые в действительности ин-

тервалы времени между предвестниками-форшоками имеют большой разброс. По одному только изменению интервалов времени между форшоками почти невозможно предсказать время основного толчка.

#### *Исследования микроземлетрясений в районе Мацусиро*

В § 4.2.1 упоминалось, что перед землетрясениями средней силы Мацусирского роя 1965—1967 гг. в эпицентральной зоне будущих землетрясений происходило много слабых толчков. Как можно видеть из рис. 5.55, землетрясения с магнитудой около 5 часто происходили по периферии этой сейсмичной области. Наблюдения за ультрамикроземлетрясениями с помощью постоянных и передвижных станций позволили установить, что почти всегда за несколько месяцев до основного толчка в эпицентральной зоне будущего землетрясения происходят очень слабые толчки.

Например, в деревне Сакай, на юго-западе сейсмичной области, многочисленные ультрамикроземлетрясения начали отмечаться примерно с августа 1966 г. Некоторое время спустя там стали происходить многочисленные ощутимые землетрясения, и в конце концов 16 января и 3 февраля 1967 г. произошли землетрясения с магнитудой соответственно 5,0 и 4,8. В табл. 15.13 приведены шесть примеров форшоковой активности этого типа.

Интересно отметить, что непосредственно перед главным толчком микросейсмичность не увеличивалась, а даже несколько уменьшалась.

#### *8.3.3. Форшоки в широком смысле*

Определение форшоков довольно произвольно как во времени, так и в пространстве. Автору представляется, что большинство сейсмологов говорят о форшоках, отбирая землетрясения, происходящие в непосредственной близости к основному толчку, или, строго говоря, в районе, где наблюдается связанная с ним афтершоковая активность.

Однако известны примеры, указывающие на предваряющую землетрясение сейсмическую активность за несколько сотен километров от места основного толчка.

#### *Активность роя и сильнейшие землетрясения*

Канамори [197] указал на отчетливую связь между возникновением сильных землетрясений в море у тихоокеанского побережья Центральной Японии и изменением во времени активности роя землетрясений в области Вакаяма на п-ове Кии. На рис. 5.31 нанесены упомянутые сильные землетрясения,

а также другие более ранние землетрясения; полуостров в левой части рисунка — п-ов Кии. Значительное увеличение числа ощутимых землетрясений от нескольких десятков до нескольких сотен или более в год было обнаружено в области Вакаяма, где с начала 1880 г. фиксировалось число ощутимых землетрясений. Аномальное увеличение активности началось соответственно за 1500 и 2200 дней до землетрясения в Канто 1923 г. ( $M=7,9$ ) и землетрясения 1953 г. в Босо-оки ( $M=7,5$ ) (см. табл. 15.13). На рис. 5.31 нанесен эпицентр землетрясения в Канто. Эпицентр землетрясения в Босо-оки, не указанный на этом рисунке, расположен в зоне сочленения рва Сагами и Японского желоба.

Современная теория тектоники плит подчеркивает, что эти землетрясения произошли вдоль северо-восточного края плиты Филиппинского моря, которая, как следует из изучения механизмов очагов Тонанкайского землетрясения 1944 г. ( $M=8,0$ ) и Нанкайского землетрясения 1946 г. ( $M=8,1$ ), перемещается в северо-западном направлении. Эти землетрясения произошли у берегов п-ва Кии, где, как полагают, плита Филиппинского моря взаимодействует с континентальной литосферой.

Канамори [197] отмечал, что движение плиты Филиппинского моря может быть обусловлено упругой отдачей на границе между этой и соседними плитами. Поэтому во время землетрясений в Канто и Босо-оки напряжения в пределах континентального блока, включающего область Вакаяма, должны нарастать, приводя к усилению активности роя. Если допустить, что на границе плиты основному процессу испарывания предшествует деформирование типа крипа на глубине, тогда легко объясняется увеличение активности роя, предвещающего сильные землетрясения.

Сразу же после Тонанкайского землетрясения произошло резкое уменьшение активности Вакаямского роя. Это соответствует падению напряжения сжатия в связи с упругой отдачей, вызвавшей землетрясение, что привело к уменьшению активности роя.

Интересным моментом в приведенных выше рассуждениях является связь между роями землетрясений и сильными землетрясениями на расстоянии 500 км. Она может получить объяснение на основе тектоники плит. Сильное извержение действующего вулкана на о. Осима, в 100 км к югу от Токио (см. рис. 5.29 и 5.31), и увеличение активности роя, по-видимому, всегда связаны друг с другом. Можно предполагать, что магма поднимается вверх из-за увеличения сжимающих напряжений внутри земной коры. Если рост активности роя всегда коррелирует с возникновением сильного землетрясения в окрестности области Канто так, как это было описано выше, то ре-

гистрация землетрясений в области Вакаяма поможет предсказать сильные землетрясения вдоль рва Сагами.

*Общее усиление сейсмичности на большой территории перед сильным землетрясением*

Старшие коллеги автора, которые пережили землетрясение 1923 г. в Канто, сообщили ему, что перед этим землетрясением сейсмическая активность в окрестностях области Канто была необычно высокой. В 1915 г. десятки умеренно сильных землетрясений происходили вблизи тихоокеанского побережья префектуры Тиба к юго-востоку от Токио. 8 декабря 1921 г. в северной части префектуры Тиба произошло землетрясение с магнитудой 7,1, а 26 апреля 1922 г. в Токийском заливе — землетрясение с магнитудой 6,9. 14 января 1923 г. в юго-западной части префектуры Ибараки к северу-востоку от Токио произошло землетрясение с магнитудой 6,3. Следует особо отметить, что в мае и июне 1923 г. множество ощутимых толчков, включая землетрясение 2 июня с магнитудой 7,5, произошло у тихоокеанского побережья в море Касиманада к северу-востоку от Токио. Эпицентры всех этих землетрясений находились в пределах 250 км от Токио.

Были сделаны оценки [396, 430] (рис. 8.6) среднегодовой величины сейсмической энергии, высвобождавшейся в период 1885—1965 гг. в области *A*, ограниченной параллелями 34—36° с.ш. и меридианами 139—141° в.д. (квадрат справа на рис. 8.6). Видно, что энергия, выделяемая в течение года в области *A* до землетрясения в Канто, в среднем на два порядка больше, чем после землетрясения. Область *B*, показанная на рис. 8.6 пунктиром, является областью значительной афтершоковой активности и деформации земной коры, связанной с основным толчком. В течение нескольких лет вплоть до 1922 г. сейсмическая энергия, выделяемая в области *B*, составляла примерно  $10^{20}$  эрг/год, но в 1922 г. она превысила  $10^{22}$  эрг. Отношение энергии, выделенной в области *B*, к энергии, выделенной в *A*, составляет 0,0016 и 0,95 соответственно для 1921 и 1922 гг.

Отсюда можно сделать вывод, что общая сейсмичность обширного района, окружающего эпицентральною зону будущего сильного землетрясения, была высокой в течение периода времени в несколько десятков лет перед землетрясением в Канто. Резкое увеличение сейсмической активности в области, в которой наблюдались значительные деформации земной коры и афтершоковая активность, связанная с землетрясением, началось лишь за 1,5 года до главного толчка. Именно с этого момента сейсмическая активность рассматриваемой области быстро нарастала и закончилась катастрофическим землетрясением.

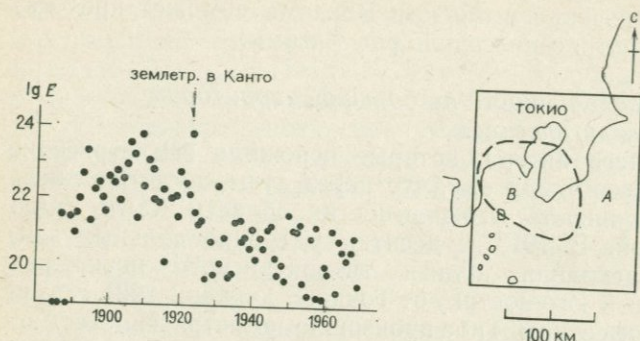


Рис. 8.6. Энергия (в эргах), высвобождавшаяся за год в зоне А до и после землетрясения 1923 г. в Канто [430].

Если аналогичное землетрясение повторится в будущем, то предшествующая ему подобная сейсмическая активность несомненно будет зарегистрирована с помощью сети станций, предусмотренной программой по предсказанию землетрясений в Японии.

В [212] рассмотрено распределение сейсмичности перед сильными землетрясениями вдоль северо-западного, северного и восточного побережий Тихого океана.

#### *Глубокофокусные землетрясения, предшествующие сильному землетрясению с небольшой глубиной очага*

Моги [259] отметил наблюдающуюся иногда тенденцию увеличения активности глубокофокусных землетрясений перед сильными неглубокими землетрясениями, происходящими в зоне дуг Камчатка — Курильские о-ва — Японские о-ва. В море вблизи северо-восточного побережья Японии произошло землетрясение с магнитудой 8,3, известное под названием Санрику. Координаты эпицентра:  $39,1^\circ$  с. ш.,  $144,7^\circ$  в. д. За два года до землетрясения Санрику под хребтом Сихотэ-Алинь в СССР произошли три глубокофокусных землетрясения с большой магнитудой. Это были землетрясения: 20 февраля 1931 г. с магнитудой  $M=7,25 \div 7,5$  и глубиной очага  $H=350$  км; 23 сентября 1932 г. с  $M=7$  и  $H=350$  км; 13 ноября 1932 г. с  $M=7 \div 7,25$  и  $H=300$  км. Эпицентры этих глубокофокусных землетрясений располагались на расстоянии 900 км к северо-западу от эпицентра землетрясения Санрику. Согласно Моги [259], это направление совпадает с направлением движения Тихоокеанской плиты.

Перед землетрясением 1952 г. в Токати-оки ( $M=8,1$ ), которое произошло в море вблизи о. Хоккайдо, наблюдалось увеличение активности глубокофокусных землетрясений под северной частью о. Хоккайдо и южной частью о. Сахалин; сюда относится сильное землетрясение с  $M=7,75$  и  $H=320$  км. Перед землетрясением в Босо-оки в 1953 г. ( $M=7,5$ ), которое, как считают, связано с рвом Сагами (см. начало этого раздела), в 1952 и 1953 гг. в Центральной Японии произошло несколько глубокофокусных землетрясений с магнитудами около 7.

Линия, соединяющая эпицентры этих глубокофокусных землетрясений-предвестников с эпицентрами соответствующего мелкофокусного сильного землетрясения, приблизительно перпендикулярна к изолиниям глубины очагов глубокофокусных землетрясений. Моги [259] высказал предположение, что «вспарывание» на глубине в погружающейся океанической плите могло ускорить ее движение, приводя к крупному разрыву в верхней части плиты. Он привел еще несколько аналогичных примеров в связи с землетрясениями 1923 г. на Камчатке ( $M=8,4$ ), 1968 г. в Токати-оки ( $M=7,9$ ) и 1969 г. в восточной части о. Хоккайдо ( $M=7,8$ ).

#### 8.3.4. Особенности форшоков, важные для прогноза землетрясений

##### *Наклон графика повторяемости*

В январе 1964 г. на расстоянии 16 км от Мацусирской сейсмологической обсерватории (Центральная Япония) произошло слабое землетрясение с магнитудой 3,3. В это время на обсерватории проводились специальные высокочувствительные сейсмические наблюдения и было записано 25 форшоков и 173 афтершока [431]. Применение к этим двум группам толчков формулы Гутенберга—Рихтера (8.1) дало значение  $b=0,35$  и  $0,76$  соответственно для форшоков и афтершоков. Такая необычно малая величина  $b$  для форшоков показывает, что число более слабых толчков в этой последовательности меньше, чем во время обычной сейсмической активности.

Суехиро [428], проанализировав 45 форшоков и 250 афтершоков Чилийского землетрясения 1960 г. ( $M=8,3$ ), получил для  $b$  значения 0,55 и 1,13 соответственно для форшоков и афтершоков. При землетрясении 1967 г. с магнитудой 5,1, происшедшем почти в том же месте, что и землетрясение 1964 г., описанное в последнем абзаце, Суехиро [429] получил значения постоянной  $b$  для форшоков и афтершоков соответственно 0,59 и 0,89.

График повторяемости можно получить и в результате экспериментов по разрушению образцов горных пород. Моги [252,

253, 256, 258, 260] и Шольц [391], которые изучали потрескивание в неоднородных образцах пород до и после образования основного разрыва, обнаружили, что для форшоков значение постоянной  $b$  меньше, чем для афтершоков. Причина, по которой значение  $b$  для афтершоков велико, вероятно, заключается в том, что после образования основного разрыва образец становится в большой степени неоднородным. Если наклон графика повторяемости для форшоков действительно меньше, чем в период обычной сейсмической активности, тогда исследование наклона графика повторяемости может иметь важное значение для прогнозирования землетрясений.

Во время Данвиллского роя землетрясений 1970 г. в Калифорнии были обнаружены [54] понижения наклона этого графика перед умеренно сильными землетрясениями, а именно значение  $b$  уменьшалось от 1,2 до 0,8 и от 1,05 до 0,6 соответственно за 1 и 1,2 сут перед землетрясениями с магнитудами 4,3 и 4,0. При анализе сейсмической активности Калифорнии Уисс и Ли [495] обнаружили уменьшение наклона графика повторяемости перед рядом землетрясений с магнитудами в диапазоне от 3,6 до 5,0 (см. табл. 15.13).

Гедни и ван Вормер сообщали об уменьшении наклона перед землетрясениями близ Фэрбенкса на Аляске [219, 394]. Фидлер [89] обнаружил уменьшение локальной величины наклона от 1,3 до 0,7 за 900 дней до Каракасского землетрясения 1967 г. ( $M=6,5$ ) в Венесуэле.

Полагают, что причина уменьшения перед землетрясением наклона графика для слабых толчков заключается в напряженном состоянии среды вокруг очаговой зоны. В § 14.1 дана интерпретация уменьшения наклона графика повторяемости перед землетрясением на основе модели дилатансии. Если описанное выше уменьшение  $b$  перед землетрясением подтвердится для большинства землетрясений, оно может оказаться одним из перспективных средств прогноза землетрясений.

### Сейсмичность

О вариациях уровня сейсмической активности перед сильными землетрясениями сообщалось в работах Садовского, Нерсесова и др. [286, 371, 372], основанных на большом материале сейсмических наблюдений в Гарме, Средняя Азия. Данные, полученные с помощью густой сети сейсмических станций (см. рис. 8.8), позволяют оценить плотность сейсмической активности, определяемую числом землетрясений, происшедших за год на площади в 1 км<sup>2</sup>. На рис. 8.7 показан вычисленный таким способом уровень сейсмической активности для северной (I), центральной (II) и южной (III) зон Гармского района.

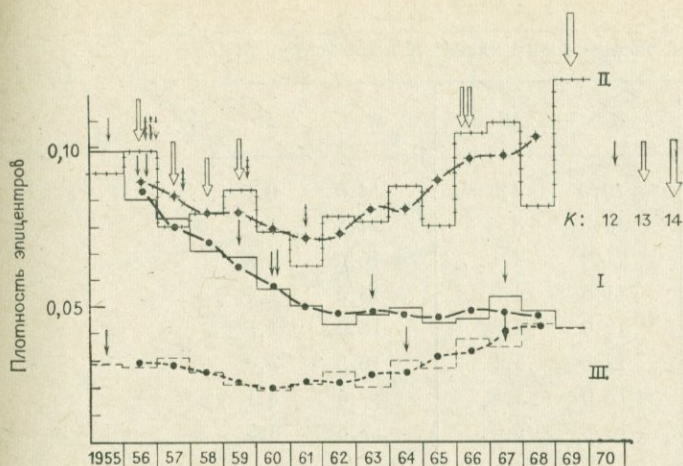


Рис. 8.7. Вековые изменения плотности эпицентров, равной числу их за год на площади  $1 \text{ км}^2$ , в трех зонах Гармского района. Жирными линиями нанесены кривые, полученные путем сглаживания методом скользящего среднего по трехлетним интервалам [372].

Жирными кривыми нанесены результаты сглаживания скользящим средним за 3 года, которые могут указывать на долговременные вариации активности. Эти оценки относятся к слабым землетрясениям с  $K=7-9$  ( $M=1,5-2,8$ ).

В советских работах часто вместо  $M$  используют величину  $K$ . Она определяется десятичным логарифмом энергии землетрясения в джоулях. Для удобства мы даем здесь таблицу перевода  $K$  в  $M$  (табл. 8.1).

В центральной зоне (II), характеризующейся повышенной сейсмической активностью, после серии сильных землетрясений 1955—1959 гг. произошел спад сейсмической активности. После этого начался подъем, продолжавшийся в течение 7—8-летнего периода и закончившийся землетрясением 1969 г. с  $K=14$  ( $M=6,1$ ).

Возможно, длительное повышение общей сейсмической активности в течение нескольких лет или более имеет какую-то связь с накоплением напряжений, которое спустя некоторое время приводит к возникновению сильного землетрясения.

Детальное рассмотрение кривых сейсмичности позволяет выделить кратковременные спады активности непосредственно перед сильными землетрясениями. Например, перед землетрясением 1969 г. наблюдалось временное снижение сейсмической активности, начавшееся примерно за полтора года перед толчком.

ТАБЛИЦА 8.1

Перевод значений энергического класса  $K$  в магнитуду  $M$  \*)

$K$	$M$	$K$	$M$	$K$	$M$
6,0	0,8	10,0	3,5	14,0	6,1
6,5	1,1	10,5	3,8	14,5	6,5
7,0	1,5	11,0	4,1	15,0	6,8
7,5	1,8	11,5	4,5	15,5	7,1
8,0	2,1	12,0	4,8	16,0	7,5
8,5	2,5	12,5	5,1	16,5	7,8
9,0	2,8	13,0	5,5	17,0	8,1
9,5	3,1	13,5	5,8	17,5	8,5

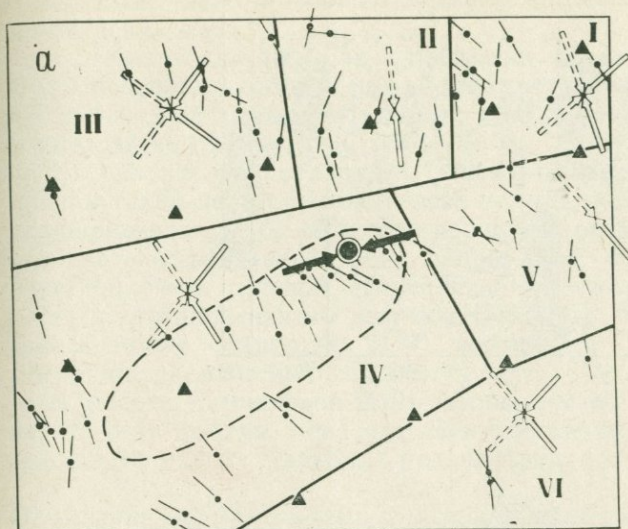
\*) Таблица приближенная.—Прим. ред.

Понижение микросейсмичности непосредственно перед главным толчком было зафиксировано также на Аляске Генди и ван Вормером (см. [219, 394]). За 7 сут до землетрясения с магнитудой 3,0, происшедшего близ Фэрбенкса, наблюдалось уменьшение суточного числа микроземлетрясений с 80 до 40. Аналогичные понижения уровня микросейсмичности отмечались в связи с землетрясениями средней силы во время Мацусирского роя 1965—1967 гг. (см. § 8.3.2).

Описанные понижения сейсмической активности можно объяснить упрочнением при дилатансии (см. § 14.1). Однако для надежного установления таких прогностических изменений сейсмичности требуется собрать гораздо больше данных.

### Механизм очага

Вероятно, одним из наиболее убедительных прогностических эффектов в Гармском районе является вращение осей сжатия, полученное из нодальных плоскостей слабых толчков [286, 371, 372]. На рис. 8.8 показаны эпицентр (двойным кружком) и ось сжатия (жирными стрелками) землетрясения 14 апреля 1966 г. ( $M=5,4$ ). До начала 1965 г. оси сжатия слабых толчков в области, оконтуренной пунктиром, не имели какого-либо преобладающего направления. Как видно из рис. 8.8, а, в период с января по декабрь 1965 г. оси сжатия приобрели ориентацию на ВЮВ или ЮВ. Однако с января следующего года, как видно из рис. 8.8, б, среднее направление осей сжатия внезапно изменилось на ВСВ. После апрельского землетрясения оси сжатия потеряли преобладающее направление.



10 км

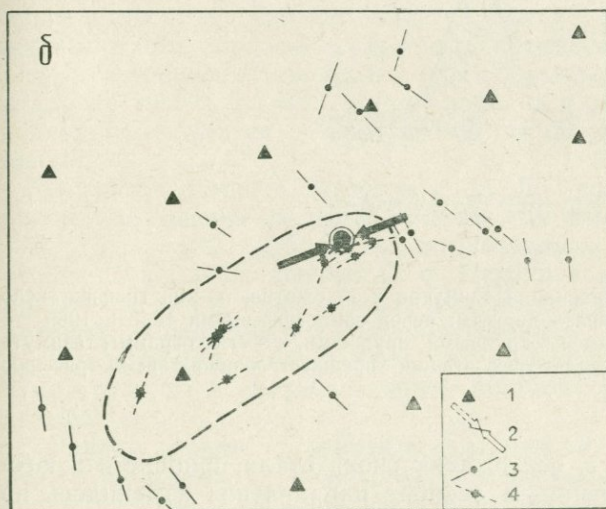


Рис. 8.8. Переориентация осей сжатия со временем для слабых землетрясений в Гармском районе. *a* — направления осей сжатия перед землетрясением 14 апреля 1966 г., т. е. в период с января по декабрь 1965 г.; *б* — направления осей сжатия непосредственно перед землетрясением, т. е. в период с января по апрель 1966 г. [372]. 1 — сейсмические станции, 2 — средняя ориентация в обычное время, 3 — долгосрочные предвестники, 4 — краткосрочные предвестники.

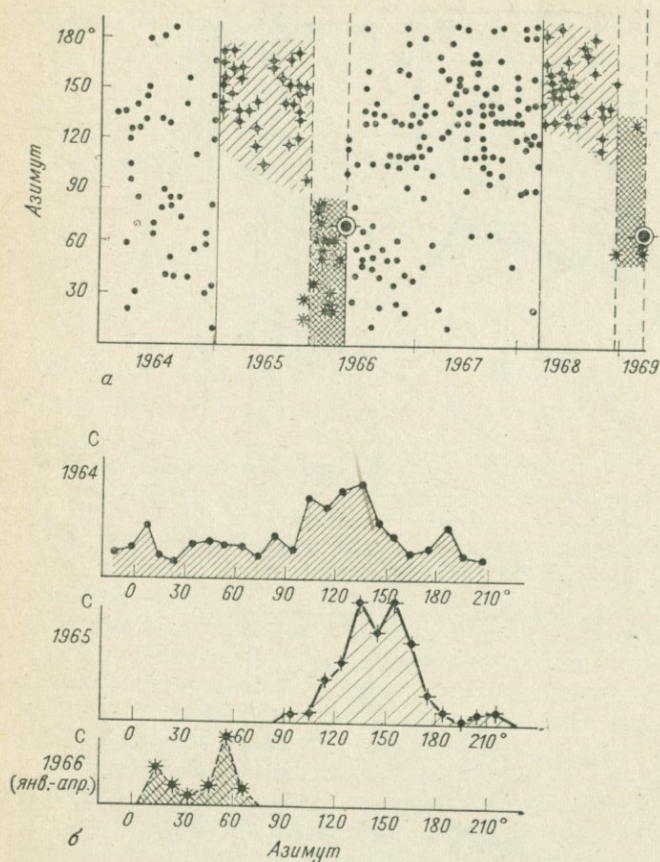


Рис. 8.9. Временные вариации азимутов осей сжатия. *а* — на графике ясно видно, что азимут менялся дважды: перед землетрясениями 1966 и 1969 гг., моменты которых отмечены крупными кружками. *б* — гистограммы азимута в условных единицах для трех этапов, предшествовавших землетрясению 1966 г. [372].

В начале 1968 г. оси сжатия снова стали приобретать юго-восточное направление. В декабре направление изменилось на восточное, и, наконец, спустя несколько месяцев произошло землетрясение с магнитудой 6,1.

На рис. 8.9, *а* показаны описанные выше временные вариации направления осей сжатия. Ясно видны внезапные изменения азимута. На рис. 8.9, *б* приведены три гистограммы (в условных единицах) азимутов осей сжатия за периоды времени соответственно 1964 г., 1965 г. и январь—апрель 1966 г.

Здесь также ясно проявляются двухэтапные изменения направлений осей сжатия.

В данном случае были определены времена долгосрочных и краткосрочных предвестников. Они составляют соответственно 470 и 130 дней для землетрясения 1966 г. и 360 и 110 дней для землетрясения 1969 г. (см. табл. 15.13).

До сих пор не предложено ясного объяснения физических причин такой переориентации осей сжатия, хотя высказывалось предположение [216, 492], что вращение осей сжатия может возникать из-за концентрации напряжений, возможно сопровождаемой очень сильной дилатансией в непосредственной близости подготавливаемого разрыва ([48, 261], см. §14.2). Выдвигалось также объяснение [127], основанное на вертикальной миграции сейсмической активности.

В работе Симбиревой [410] сообщается об аналогичном повороте осей сжатия в связи с двумя землетрясениями с магнитудой 4,8 в районе Нарына, Средняя Азия.

#### *Отношение энергий высоко- и низкочастотных волн*

Нерсесов и др. [286] и Садовский и Нерсесов [371] сообщают об увеличении энергии высокочастотных сейсмических волн перед главным толчком. Измерения амплитуд *S*-волн позволяют вычислить значения энергии высоко- и низкочастотных волн и таким образом исследовать временные вариации логарифма отношения энергий. При Хаитском землетрясении в апреле 1966 г. ( $K=12$ ) близ Гарма за 4 месяца до главного толчка наблюдалось резкое увеличение логарифма этого отношения.

С другой стороны, Федотов и др. [87] сообщают об устойчивом уменьшении частот *P*- и *S*-волн от землетрясений с  $M=3 \div 3,5$ , предшествующих землетрясениям с  $M \geq 6$ . Их выводы основаны на наблюдениях на о. Итуруп в южной группе Курильских о-вов и, по-видимому, находятся в противоречии с тенденцией, наблюдаемой в Гармском районе.

В настоящий момент изучение частотного состава слабых землетрясений в связи с задачей прогноза развито еще недостаточно.

Однако интересно отметить, что иногда перед землетрясениями наблюдаются колебания почвы очень высокой частоты. Вероятно, одной из наиболее важных работ по этому вопросу является статья Анциферова [24], который проводил наблюдения в Гарме с геофоном в частотном диапазоне от 20—30 до 400—500 Гц. Например, 5 октября 1950 г. в 22 ч 45 мин по среднему гринвичскому времени там был зарегистрирован довольно сильный толчок с эпицентральной расстоянием около 15 км и глубиной очага порядка 15 км. За два часа до главного

толчка наблюдались интенсивные акустические колебания, длившиеся несколько десятков минут. Изучение колебаний в акустическом диапазоне может оказаться полезным для предсказания землетрясений, поскольку колебания такой высокой частоты могут быть связаны с растрескиванием пород.

#### 8.4. ОБЛАСТИ СЕЙСМИЧЕСКОГО ЗАТИШЬЯ

##### 8.4.1. Сан-Франциско и Форт-Техон в Калифорнии (США)

Мы указывали (§ 8.2.3), что некоторые участки разлома Сан-Андреас, где произошли землетрясения 1857 г. (Форт-Техон) и 1906 г. (Сан-Франциско), в настоящее время характеризуются низким уровнем сейсмической активности. Область, в которой сейсмичность ниже, чем в окружающих ее частях, называют областью сейсмического затишья.

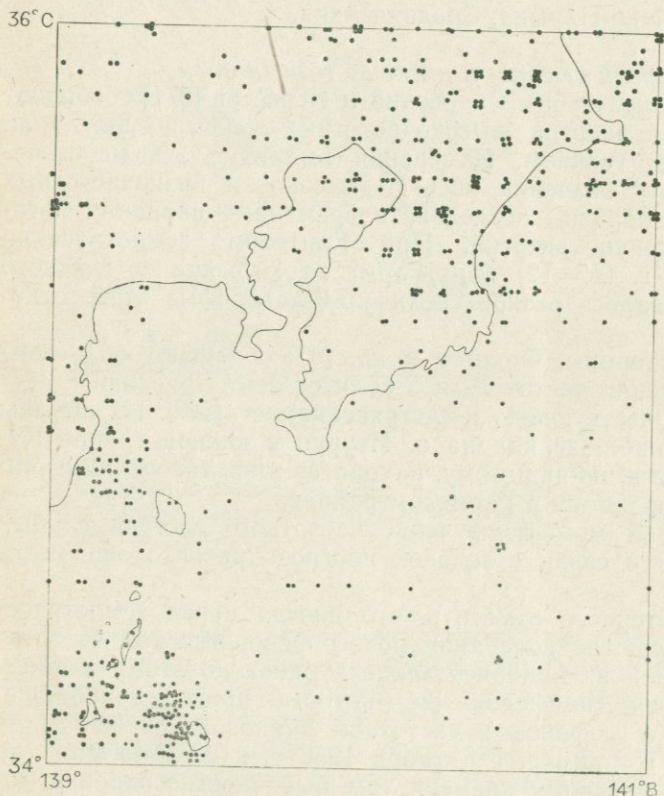


Рис. 8.10. Эпицентры землетрясений с глубиной очагов менее 60 км в Южном Канто за период времени от 1926 по 1967 г. [404].

## 8.4.2. Южный Канто (Япония)

На рис. 8.10 [404] нанесены эпицентры 678 землетрясений с глубинами очагов менее 60 км, параметры которых определены ЖМА, для Южного Канто за период 1926—1967 гг. За редкими исключениями магнитуды этих землетрясений превышают 3. Из рисунка видно, что в эллиптической области северо-западного простирания, занимающей южные части п-овов Миура и Босо и восточную часть залива Сагами, произошло очень мало землетрясений. Эта малосейсмичная область совпадает с простиранием рва Сагами (см. рис. 5.31 и 5.32). 19 августа 1930 г. примерно в середине этой эллиптической области произошло землетрясение, которое можно рассматривать как один из афтершоков землетрясения 1923 г. в Канто. Наблюдения за микроземлетрясениями в районе Южного Канто, проведенные в последние годы [180], выявили также низкую микросейсмичность этой области.

На рис. 8.11 показано расположение эпицентров сильных землетрясений, происшедших в районе Южного Канто за исторический период времени. Хотя положения эпицентров за более ранние годы могут быть определены с большими ошибками, тем не менее видно, что многие сильные землетрясения с  $M > 7$  произошли в ныне спокойной области. Следует также указать, что в ней же произошли многие сильные афтершоки землетрясения 1923 г. в Канто.

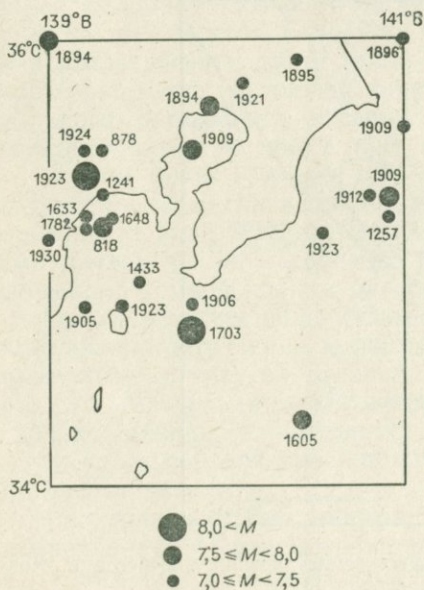


Рис. 8.11. Эпицентры сильных землетрясений ( $M \geq 7$ ) за исторический период времени [404].

С другой стороны, из рис. 5.29, 5.30 и 5.32 видно, что мало-сейсмичная область подвергалась значительному деформированию, вероятно, из-за движения плит. Тем не менее в течение полувека после землетрясения 1923 г. и сопровождавших его афтершоков там не образовалось новых разрывов. Поэтому весьма вероятно, что в области сейсмического затишья Южного Канто происходит значительное накопление деформаций, и возникновение там нового сильного землетрясения представляется весьма вероятным.

#### 8.4.3. Восточная часть о. Хоккайдо

Уцу [466, 467] обобщил закономерности возникновения сильных землетрясений вдоль глубоководного желоба у Хоккайдо-Курильской дуги. Из рис. 8.12 видна тенденция к повторению сильных землетрясений в одном и том же месте примерно через каждые 100 лет. Несмотря на то, что в 50-х и 60-х годах сильные землетрясения с магнитудой около 8 произошли в большинстве областей, помеченных на рисунке буквами А, В и т. д., в области С, где в 1894 г. произошло землетрясение с магнитудой 7,9, такого повторения сильного землетрясения не было вплоть до 1973 г. Японские сейсмологи отмечали, что этот район, вероятно, является областью затишья, хотя в подробном исследовании зон сейсмического затишья, имеющихсь вдоль

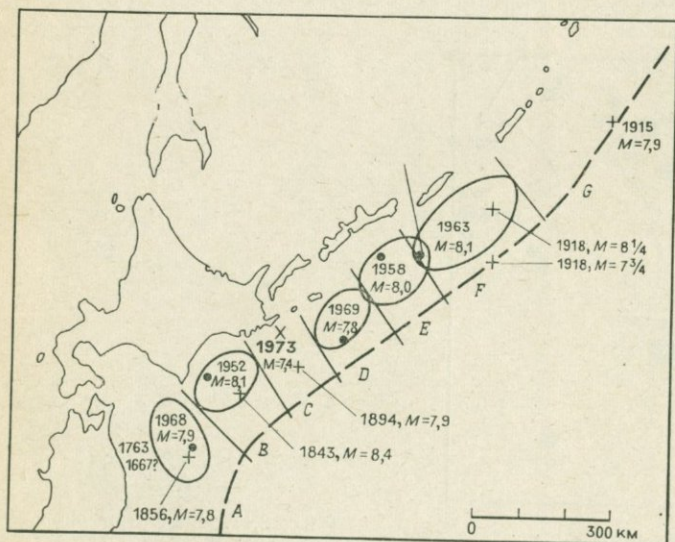


Рис. 8.12. Эпицентральные зоны сильных землетрясений у берегов о. Хоккайдо и южной группы Курильских о-вов [466, 467].

границ плит Тихого океана и Карибского моря, Келлехера и др. [213] о нем не упоминается. Уцу [469] описал пространственные и временные закономерности сильных землетрясений, происходящих у тихоокеанского побережья Японских о-вов.

Основные особенности тектоники восточной части Хоккайдо изложены в [406]. Высокоточный поперечный профиль в восточной части Хоккайдо (см. рис. 5.35) [106] и недавно проведенная триангуляционная съемка [149] помогли выявить горизонтальное сжатие земной коры в направлении, приблизительно перпендикулярном оси желоба. Данные обеих съемок сравнивались с результатами триангуляции 1903—1908 гг., хотя величины накопленных деформаций получились в этих случаях существенно различными. Тем не менее кажется вероятным, что за период в несколько десятков лет в этом районе произошло сжатие порядка  $10^{-6}$ .

Повторные нивелировки на востоке Хоккайдо вдоль линии, идущей в направлении СЗ—ЮВ [103], выявили опускание репера на тихоокеанском берегу за период 1903—1970 гг. на 64 см относительно репера около Охотского моря. Таким образом, средняя скорость наклона вдоль линии длиной 60 км доходит до  $0,016 \cdot 10^{-5}$  год<sup>-1</sup>. Симадзаки [408] исследовал связь движений земной коры на востоке Хоккайдо с их вероятной причиной — увлекающим движением погружающейся океанической плиты.

Если деформация земной коры на суше экстраполировать к оси желоба, то мы получим огромное накопление деформаций у восточных берегов Хоккайдо. Оценив вероятность возникновения землетрясения путем такой экстраполяции деформаций земной коры, автор настоящей книги на заседании комитета Национального парламента говорил о возможности возникновения сильного землетрясения в области С (см. § 4.2.1).

В этом месте 17 июня 1973 г. в самом деле произошло землетрясение с магнитудой 7,4 (по оценке ЖМА); его эпицентр отмечен на рис. 8.12 косым крестом. Таким образом, мы рассматриваем это землетрясение как предсказанное на основе деформаций земной коры и расположения областей затишья.

Однако следует обратить внимание на то, что сопровождающие это землетрясение деформации земной коры не вполне согласуются с упругой отдачей в соответствии с моделью на рис. 8.2. Магнитуда землетрясения 1973 г. также оказалась несколько меньше ожидавшейся. Возможно, отдача произошла лишь вдоль верхней половины границы, испытывающей подвиг литосферной плиты.

Ряд японских сейсмологов, в особенности Симадзаки [409] и Касахара [205], рассмотрели возможность асейсмичных разрывных движений на нижней половине границы плиты, хотя нельзя исключить и вероятность внезапного разрыва. Одним из

свидетельств в пользу таких асейсмичных разрывных движений после землетрясения является поднятие земной поверхности, зарегистрированное мареографической станцией на восточном берегу Хоккайдо после землетрясения 1894 г. Это поднятие сменилось сильным опусканием, продолжавшимся несколько десятков лет. Согласно мареографическим данным, во время землетрясения 1973 г. произошло опускание суши на несколько сантиметров. Имеются некоторые данные (правда, требующие дальнейшего подтверждения), указывающие на подъем поверхности с начала 1974 г. Как отмечалось в § 6.2.1, точность измерения движений суши относительно уровня моря настолько низка, что подъем или опускание на 10 см может остаться незамеченным на фоне помех метеорологического и океанографического происхождения. Если все же допустить наличие такой тенденции вертикальных движений, то можно предоставить себе образование асейсмичного разлома, который в конце концов достигнет глубины 50—100 км непосредственно под береговой линией.

#### 8.4.4. Область Токай (Япония)

В 1854 г. недалеко от берега области Токай (тихоокеанское побережье), включая префектуры Айти и Сидзуока в Центральной Японии, в море произошло землетрясение с магнитудой 8,4. Его эпицентр вместе с эпицентрами многих других сильных землетрясений, происшедших вблизи побережья региона Канто—Токай начиная с 1960 г., показан на рис. 5.31. Из исторических данных известно, что некоторые сильные землетрясения происходили почти в одной и той же эпицентральной области у берегов Центральной Японии (см. рис. 5.31) с интервалами времени около 100 лет. Имеются сообщения о землетрясении в 1498 г., имевшем магнитуду 8,6 и, по-видимому, тот же эпицентр, что и землетрясение 1854 г., причем оно сопровождалось столь огромным цунами, что оз. Хамана недалеко от Хамамацу на Токайском побережье соединилось с открытым морем, ибо сушу смыло высокими волнами.

Эпицентр землетрясения 1707 г. ( $M=8,4$ ) находился в море около п-ва Кии (см. рис. 5.31), и из исторических документов можно сделать вывод, что возможно было возникновение еще одного сильного землетрясения близ Токайского побережья. Сильные землетрясения у берегов Центральной Японии большей частью происходят парами. Действительно, как видно из рис. 5.31, другое сильное землетрясение (с  $M=8,4$ ) произошло недалеко от п-ва Кии через 32 ч после землетрясения 1854 г., происшедшего у берегов Токая. Предполагается, что землетрясение 1605 г. ( $M=7,9$ ) также было с двойным эпицентром. Не-

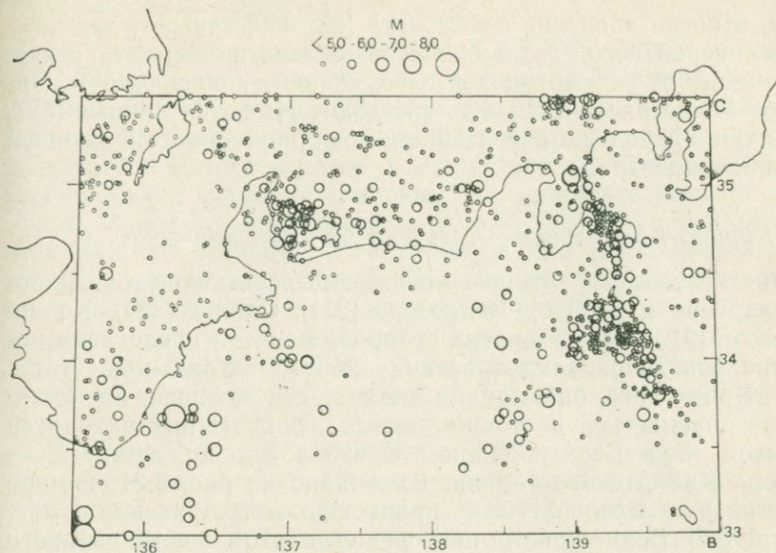


Рис. 8.13. Эпицентры землетрясений, происшедших у берегов области Токай (Центральная Япония) в период 1926—1972 гг. [397].

смотря на Тонанкайское землетрясение 1944 г. ( $M=8,0$ ) и Нанкайское 1946 г. ( $M=8,1$ ), в последнее время у берегов области Токай сильных землетрясений не происходило.

Поскольку со времени последнего сильного землетрясения 1854 г. прошло 120 лет (что равно среднему интервалу повторения сильных землетрясений у берегов Центральной Японии), японские сейсмологи опасаются приближения еще одного катастрофического землетрясения. Результаты измерений на поперечном профиле через Центральную Японию (см. рис. 5.38) отчетливо выявили огромное сжатие земной коры, вероятно вызванное движением плиты Филиппинского моря в северо-западном направлении. Земная поверхность вдоль тихоокеанского берега префектуры Сидзуока испытала существенное опускание со времени первого нивелирования, проведенного несколько десятилетий назад. Поэтому вполне вероятно, что в земной коре в районе Нанкайского рва, где, как полагают, океаническая плита поддвигается в глубь Земли, накапливались громадные деформации.

На рис. 8.13 показаны эпицентры землетрясений, происшедших в море вблизи тихоокеанского побережья Центральной Японии в период 1926—1972 гг. [397]. Из карты ясно видно наличие области затишья в эпицентральной зоне землетрясения

1854 г. Многие японские сейсмологи [23, 349] считают эту зону местом вероятного возникновения сильного землетрясения.

К западу от рассмотренной здесь области произошло Тонанкайское землетрясение 1944 г. ( $M=8,0$ ). Имеются данные [397] о наличии перед землетрясением обширной области затишья в районе эпицентра.

#### 8.4.5. Курило-Камчатская—Алеутско-Аляскинская зона

Понятие области затишья впервые было выдвинуто в работах Федотова и др. [86], Келлехера [211], Сайкса [434], Келлехера и др. [213] и ряда других авторов. Федотов предсказал положение эпицентра землетрясения 1968 г. в Токати-оки ( $M=7,9$ ). Кроме того, он выделил две области затишья, представляющие опасность в настоящее время. Одна из них находится у берегов п-ва Босо в Южном Канто в Японии, а другая — в районе Камчатского залива. Как видно из рис. 5.31, в море у берегов п-ва Босо в 1703 г. произошло землетрясение с магнитудой 8,2. Возможность повторения в этом месте сильного землетрясения серьезно обсуждалась японскими сейсмологами. Однако столь далеко от берега трудно проводить эффективные работы по прогнозу землетрясений.

Вдоль дуги Курилы — Камчатка — Алеутские о-ва — Аляска в наше время происходили такие сильные землетрясения, как на Камчатке (ноябрь 1952 г.,  $M=8,3$ ), на Андреяновских о-вах (март 1957 г.,  $M=8,3$ ), Курильских о-вах (октябрь 1963 г.,  $M=8,1$ ), на Аляске (март 1964 г.,  $M=8,4$ ) и Крысьих о-вах (февраль 1965 г.,  $M=7,8$ ). Эти землетрясения сопровождались афтершоками, зоны проявления которых были вытянуты вдоль линии простираения островных дуг иногда на несколько сотен километров. Считается, что в этих афтершоковых зонах во время главного толчка происходит основной разрыв земной коры. Примечательно, что зоны афтершоков почти не перекрываются.

При внимательном рассмотрении упомянутых афтершоковых зон области затишья выявляются на п-ове Аляска ( $155—165^\circ$  з. д.), Командорских о-вах ( $165—170^\circ$  в. д.) и в северной группе Курильских о-вов. В этих районах в будущем вероятно возникновение сильного землетрясения.

#### 8.4.6. Центральная и Южная Америка

Келлехер и др. [213] изучали области затишья вдоль тихоокеанского побережья Центральной и Южной Америки. Они указали на существование таких зон, например, вдоль берегов Эквадора и Перу ( $0—10^\circ$  ю. ш), а также вдоль северной части Чили и юго-восточной части Перу ( $18—25^\circ$  ю. ш.).

#### 8.4.7. Об одном парадоксе

Подводя итоги изложенному в § 8.3, 8.4, можно констатировать наличие двух разных точек зрения на соотношение между досейсмической активностью и возникновением главного толчка. Данные по Мацусирскому рою свидетельствуют о том, что опасность сильного землетрясения возрастает с повышением микросейсмичности. С другой стороны, сильное землетрясение иногда может произойти и в области затишья, где в настоящее время сейсмическая активность очень низка, из-за накопления напряжений в земной коре. Аки [5] отмечал, что под воздействием региональных тектонических напряжений земная кора ведет себя в различных местах по-разному, даже в пределах одной и той же тектонической области, и поэтому получаются довольно сложные закономерности в распределении мест концентрации напряжений и микросейсмичности.

В связи с результатами Моги ([252], см. § 4.2.9, 13.1.1) автор склоняется к тому мнению, что указанный парадокс можно разрешить, если учесть различия условий в земной коре. Когда воздействию напряжений подвергается неоднородная кора, большого накопления деформаций не получается, так как прочность коры в целом невелика. Вместо этого может образоваться множество мелких разрывов. Если в области с таким строением коры начинают наблюдаться микроземлетрясения, можно предположить, что там идет процесс либо увеличения напряжений в земной коре, либо уменьшения прочности коры, например в процессе дилатансии. В таком случае развитие микросейсмичности может привести к умеренно сильному толчку, но в этом случае очень сильное землетрясение с магнитудой порядка 8 невозможно.

Если имеется область затишья большой площади, то полагают, что прочность земной коры в этом месте велика и даже при больших напряжениях образуется мало микротрещин. Разлом, связанный с прошлым сильным землетрясением, обычно бывает «заперт» в результате действия какого-то пока непонятого механизма. Ситуация здесь, как показал Моги [252], во многом аналогична поведению однородного образца породы при испытании на разрушение. Если кора весьма однородна, то из лабораторных экспериментов следует, что должен происходить внезапный разрыв. Но реальная земная кора не бывает столь однородной и потому следует ожидать повышения сейсмичности в зоне сейсмического молчания (области затишья) с приближением деформации земной коры к критическому, предельному значению.

Действительно, данные, относящиеся к подготовке землетрясения 1923 г. в Канто (см. § 8.3.3), подтверждают такое

повышение общего уровня сейсмичности в обширной области, окружающей будущую эпицентральную зону. Однако, несмотря на этот убедительный пример, пока еще нельзя сказать, что соотношение между предваряющей землетрясение сейсмичностью и главным толчком достаточно хорошо установлено. В связи с широким развитием в настоящее время наблюдений за микросейсмичностью можно надеяться, что в ближайшем будущем эта сложная проблема прояснится.

#### 8.5. НАБЛЮДЕНИЯ МИКРОЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ В ГЛУБОКИХ СКВАЖИНАХ

Наблюдения микроземлетрясений в районе Токио проводятся с помощью сети сейсмографов, сигналы от которых передаются телеметрическим путем в Сейсмологический институт в центре Токио. Равнина Канто вокруг Токио покрыта слоем аллювия толщиной в несколько километров. Поэтому из-за значительного фона помех наблюдения приборами очень высокой чувствительности здесь проводить трудно. Высокочувствительные сейсмометры сети устанавливают на твердых скальных породах, на которых уровень помех низок. В связи с этим все пункты инструментальных наблюдений находятся вне равнины. Сеть настолько чувствительна, что она часто регистрирует микроземлетрясения, происходящие у берегов п-ова Босо, т. е. в области, находящейся под угрозой повторения землетрясения 1703 г. ( $M=8,2$ ) (см. § 8.4.5 и рис. 5.31). Однако маловероятно, чтобы эта сеть хорошо регистрировала микроземлетрясения, происходящие непосредственно в районе Токио, поскольку расстояние от Токио до станций сети достигает нескольких десятков километров.

Как упоминалось в § 4.2.5, Национальный центр исследований по предотвращению стихийных бедствий предпринял наблюдения микроземлетрясений, установив высокочувствительные сейсмометры в забое скважины, пробуренной в мягких осадочных отложениях. Эта скважина глубиной 3510 м и диаметром 15,9 см была пробурена в 28 км севернее Токио близ города Ивацуки ( $35^{\circ}55'$  с. ш.,  $139^{\circ}44'$  в. д.). Скважина была полностью обсажена и зацементирована. Для обеспечения работы системы наблюдений в условиях высоких температур и давлений, существующих в забое скважины, где температура равна  $86^{\circ}\text{C}$ , а давление 350 атм, были приняты специальные меры предосторожности [219]. Об этой системе наблюдений см. [438].

Трехкомпонентные сейсмометры для измерения ускорения и скорости движения почвы были помещены в контейнер из не-

ржавеющей стали длиной 9 м и диаметром 14 см вместе с наклономерами, термометрами и другим оборудованием. Сигналы с выхода приборов подаются в записывающую систему на поверхности земли посредством частотно-модулируемой мультиплексной передачи по кабелю (диаметр 2,6 см), состоящему из 19 медных жил, покрытых серебром.

Сейсмометры были установлены в дотретичном слое, состоящем из метаморфизованных пород. Оказалось, что уровень шума там настолько низок, что можно проводить наблюдения микроземлетрясений в частотном диапазоне 10—20 Гц и с увеличением  $10^5$ — $10^6$ . Чувствительность при таких измерениях примерно в  $10^3$  раз выше, чем при наземных наблюдениях.

Совместное использование скважинных наблюдений и наблюдений группы сейсмометров Сейсмологического института позволяет обнаруживать очаги многих микроземлетрясений, происходящих в районе Токио. Например, ряд толчков ( $M < 3$ ) с глубинами очагов около 30 км произошел в апреле и мае 1974 г. под северной частью Токийского залива [282]. Землетрясения, происходящие в этой области, обычно обладают более глубокими очагами, но в 1974 г. слабые толчки наблюдались почти в том же месте, где 26 апреля 1922 г. произошло разрушительное землетрясение с магнитудой 6,9.

Имеются данные о том, что перед землетрясением ( $M = 6,9$ ) 1855 г. в Эдо, происшедшем на небольшой глубине в восточной части города (см. § 8.3.1), наблюдались слабые форшоки. Если такие форшоки будут вновь происходить перед возникновением сильного землетрясения в районе Токио, то скважинные сейсмографы несомненно их зарегистрируют.

После землетрясения 1855 г. непосредственно под Токио в 1894 г. произошло землетрясение с магнитудой 7,0, но в этом случае разрушения не были столь большими, как в предыдущем, поскольку очаг второго землетрясения был глубже. С тех пор в Токио подобных землетрясений не было. Из-за очень больших разрушений при землетрясении 1923 г. в Канто большинство японцев опасаются возникновения сильных землетрясений в заливе Сагами (таких, как землетрясения 1703 и 1923 гг. — см. рис. 5.31) в связи с движениями земной коры в районе рва Сагами. Однако следует обратить внимание также на потенциальную опасность землетрясений типа 1855 и 1894 гг. Такие землетрясения, возникающие непосредственно под густонаселенными городами, могут причинить огромный ущерб, как это было при землетрясениях 1971 г. в Сан-Фернандо ( $M = 6,4$ ) и 1972 г. в Манагуа ( $M = 6,3$ ), хотя их магнитуды не так уж велики.

Ввиду успешных наблюдений микроземлетрясений в глубокой скважине в Ивацуки, в японскую национальную программу

по предсказанию землетрясений было включено обращение к правительству Японии установить еще несколько таких станций вокруг Токио, с тем чтобы с помощью группы сейсмографов в глубоких скважинах можно было определять положение очагов микроземлетрясений. Однако создание такой системы — дело нелегкое из-за высокой стоимости глубоких скважин. Говорят, что на создание наблюдательной системы в Ивацуки было израсходовано более 600 млн. иен (около 2 млн. американских долларов). После продолжительных дебатов было решено заложить в 1975 г. две дополнительные скважинные станции вокруг Токио.

## 8.6. ПОДВОДНАЯ СЕЙСМОЛОГИЯ

Большинство очень сильных землетрясений Японии происходит вдоль тихоокеанского побережья Японских о-вов или в море недалеко от берега. Поэтому нет никаких сомнений в важности наблюдений за сейсмической активностью на морском дне непосредственно над очаговыми зонами этих землетрясений.

В «Проекте исследований по предсказанию землетрясений» (см. § 4.1) о сейсмических наблюдениях на морском дне ничего не говорилось. Это было связано с тем, что в то время еще не существовало подводных сейсмографов, доведенных до уровня практического применения. В последние годы стали широко применяться донные сейсмографы с якорями [276]. Например, донный сейсмограф такого типа, установленный недалеко от северо-восточного берега о. Хонсю, зарегистрировал форшоки землетрясения 1968 г. в Токати-оки ( $M=7,9$ ).

Однако следует отметить, что применение сейсмографов с якорями не позволяет вести оперативный прогноз. Контейнер, в котором установлен сейсмограф, опускают на дно моря вместе с регистрирующей системой. Через некоторое время контейнер находят с помощью радиобуя, соединенного с записывающей системой. Такие донные сейсмографы успешно используются для регистрации сейсмической активности определенной подводной области, но они непригодны для проведения непрерывных наблюдений. Были также разработаны подводные сейсмографы с автоматическим погружением и всплытием. Однако сейсмограф, плавающий на поверхности моря, бывает трудно обнаружить. С сейсмографом этого типа также трудно проводить непрерывные наблюдения с оперативной обработкой.

В связи с интенсификацией в 1973 г. в Японии работ по программе прогноза землетрясений важно создать сейсмографы, устанавливаемые на дне моря и соединяемые посредством подводного кабеля с обсерваторией на суше. Поскольку техниче-

ские средства для такого донного сейсмографа и подводные кабели для дальней передачи уже полностью разработаны, нет оснований ожидать каких-либо существенных трудностей в создании такой системы. Запланировано установить группу приемников (не только сейсмографов, но и магнитометров, цунамиметров и пр.) в море непосредственно над очаговой зоной ожидаемого сильного землетрясения у тихоокеанского побережья Японии. Данные от этих приемников должны передаваться с помощью подводных кабелей на береговую станцию и затем в центр данных по обычным телефонным линиям.

Было бы идеально, если бы такие подводные системы регистрации были установлены в районах, находящихся на расстоянии примерно 200 км от Хоккайдо, северо-восточного берега Хонсю, п-ова Босо, области Токай и о. Сикоку. В настоящее время трудно иметь такую полную систему подводных сейсмографов, ибо расходы на ее создание столь велики, что они превысили бы бюджет всей национальной программы по прогнозу землетрясений. Однако в 1974 финансовом году были начаты предварительные работы по установке небольшой группы подводных сейсмографов на морском дне в непосредственной близости от области Токай в Центральной Японии.

## ИЗМЕНЕНИЕ СКОРОСТЕЙ СЕЙСМИЧЕСКИХ ВОЛН

Сейсмологи давно предполагали, что скорости сейсмических волн, проходящих через очаговую область подготавливаемого сильного землетрясения, могут измениться из-за накопления напряжений. Имамура в 1928 г. [176], вероятно, первым отчетливо высказал эту мысль \*) в своей речи в японской палате советников, но в то время она оставалась недоступной для экспериментальной проверки из-за малой точности сейсмометрических наблюдений.

В 1948 г. Сасса [373] вновь привлек внимание сейсмологов к этой проблеме, а затем Хаякава [155] пытался обнаружить изменения скоростей сейсмических волн в имевшихся тогда данных по землетрясениям. К сожалению, эта работа была предпринята слишком рано (судя по тогдашней точности сейсмических наблюдений), и тогда еще невозможно было прийти к каким-либо обоснованным выводам.

В § 4.2.6 сказано, что японская национальная программа по предсказанию землетрясений включает измерения времен прихода сейсмических волн от взрывов. Предполагается, что с помощью высокочувствительных методов взрывной сейсмологии удастся выявить изменения скоростей сейсмических волн, если они действительно существуют. На севере о. Осима (см. рис. 5.29) примерно с годовым интервалом, начиная с 1968 г., проводятся взрывы зарядов порядка 500 кг. Сейсмические волны записываются на станциях, расположенных в области Идзу—Канто к юго-западу от Токио. В 1968—1969 гг. как будто произошло некоторое увеличение (на 0,1%) скорости продольных волн, распространяющихся через залив Сагами. Но далее в течение нескольких лет никаких заметных изменений скорости не наблюдалось [175, 111].

Подобного рода эксперименты со взрывами проводились также на разломе Сан-Андреас в г. Салинас (хребет Габилан, Калифорния) [76, 77]. Времена вступления продольных волн измерялись в точке, расположенной на расстоянии 42 км от пункта

\*) В русской литературе первые сообщения об этом см. в книге Б. Б. Голицына «Лекции по сейсмометрии», Изд. АН, СПб, 1912.— *Прим. ред.*

взрыва. Повторные взрывы зарядов в 100 кг позволили сделать вывод, что ошибка измерения времен вступления была меньше чем 1 мс. Несмотря на это эксперименты, проводившиеся в течение года, не выявили заметных изменений скоростей. Вероятно, обрушение скважин из-за повторных взрывов накладывает определенный предел на точность измерений.

Гораздо более тонкий эксперимент по наблюдению изменения скоростей описан в работах [7, 71]. В противоположность взрывам, о которых говорилось выше, в этом случае использовались непрерывные синусоидальные волны от гидродинамического вибратора и измерялась разность фаз между источником и приемником. В серии измерений, проводившихся в 300-метровой шахте в Огденбурге (штат Нью-Джерси, США), наблюдались изменения скорости, явно коррелированные с деформациями, возникающими под действием земных приливов. Эти изменения скорости при измерениях в натуре, по-видимому, на один-два порядка больше, чем при подобных измерениях на образцах пород в лабораторных условиях.

В противоположность довольно неопределенным, как мы только что видели, или сравнительно небольшим изменениям скоростей сейсмических волн, в последние годы сначала в Гарме в СССР, а затем и в других странах были обнаружены неожиданно большие изменения величины отношения скорости продольных волн  $V_p$  к скорости поперечных волн  $V_s$ .

### 9.1. ИЗМЕНЕНИЯ ОТНОШЕНИЯ $V_p/V_s$

Из сейсмических наблюдений можно найти отношение  $V_p/V_s$ , не определяя скорости  $V_p$  и  $V_s$  по отдельности. Изменения величины этого отношения, о которых будет говориться в данном разделе, обычно находят из времен пробега продольных и поперечных волн. Обозначая времена прихода продольных и поперечных волн, отсчитанные от времени в очаге, соответственно  $t_p$  и  $t_s$ , зависимость разности времен  $S-P$  от  $t_p$  можно приблизительно представить прямой на плоскости ( $t_s - t_p$ ,  $t_p$ ). Наклон этой прямой будет равен

$$k = (t_s - t_p) / t_p. \quad (9.1)$$

Если предположить далее, что пути распространения обеих волн совпадают, то получаем

$$V_p t_p = V_s t_s, \quad (9.2)$$

откуда

$$k = V_p / V_s - 1, \quad (9.3)$$

или

$$V_p/V_s = 1 + k. \quad (9.4)$$

Отсюда видно, что отношение  $V_p/V_s$  легко получить, если известно значение  $k$ , вычисляемое из времен пробега.

### 9.1.1. Результаты, полученные в СССР

В 1967 г. на симпозиуме по предсказанию землетрясений в Цюрихе Саваренский [383] доложил\*) о результатах работ советских ученых по анализу изменений отношения  $V_p/V_s$  непосредственно перед сравнительно сильным землетрясением. Хотя несколько статей на эту тему появилось раньше, для сейсмологов западных стран это было практически первым сообщением о работах такого рода в СССР.

В работе Кондратенко и Нерсесова [220] исследовались годографы волн от слабых землетрясений, происшедших до и после сравнительно сильных землетрясений в районе между Гармом и Джиргиталем в Таджикистане на юге Средней Азии в период 1958—1961 гг. Были использованы данные более чем о 800 толчках. В статистических годографах продольных волн, прошедших через эпицентральную область, была обнаружена систематическая разность между годографами до и после основных толчков. Скорости продольных волн перед сильными землетрясениями составляли приблизительно 5,3 км/с, в то время как после землетрясений они достигали значения 6,3 км/с; таким образом, с сейсмическими событиями связано увеличение скорости на 15%.

Если такое изменение попытаться связать с соответствующим изменением упругих свойств земной коры, то окажется, что оно должно было составить около 30%. Сначала было трудно поверить в существование столь значительного изменения скоростей сейсмических волн, если не допустить для объяснения этого явления какого-то специального механизма.

На следующий год появился английский перевод статьи Семенова [398], в которой было приведено много примеров изменения  $V_p/V_s$  перед землетрясениями, и теперь геофизики уже были склонны поверить в существование таких явлений. В 1972 г. в широко распространенном журнале была опубликована статья Садовского и др. [372], в которой был дан обзор различных явлений, предшествующих сильным землетрясениям в Гармском районе. Здесь были отчетливо описаны примеры уменьшения и восстановления величины отношения  $V_p/V_s$ ,

\*) Результаты получены И. Л. Нерсесовым с сотрудниками.— *Прим. ред.*

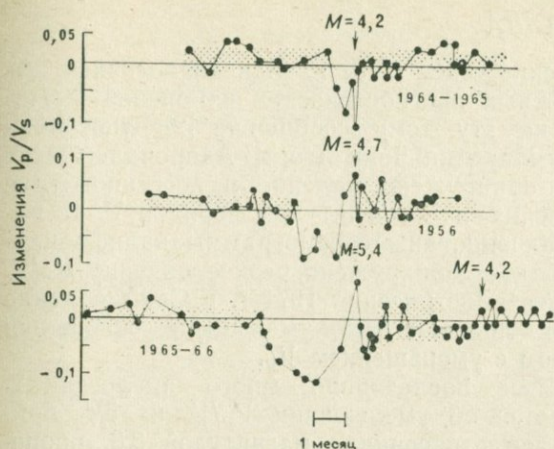


Рис. 9.1. Примеры изменений отношения  $V_p/V_s$  в Гармском районе (СССР) [216, 398]. Заштрихованы интервалы времени, в течение которых  $V_p/V_s$  не выходит за пределы статистического разброса.

и большинство геофизиков поверили результатам советских исследователей. Затем было опубликовано еще несколько работ советских авторов по этому вопросу [284, 286, 371].

На рис. 9.1 показаны примеры изменения отношения скоростей  $V_p/V_s$  при нескольких землетрясениях, воспроизведенные с иллюстраций, приведенных первоначально в [398], а затем в [216]. Из рисунка видно, что отношение  $V_p/V_s$ , которое обычно слегка колеблется около своего нормального значения 1,75, перед землетрясением начинает заметно убывать. Через некоторое время оно возвращается к своему прежнему значению, возможно даже несколько превышая его. И примерно в этот момент происходит землетрясение.

Можно сделать предварительный вывод, что, чем больше магнитуда подготавливаемого землетрясения, тем дольше продолжается спад и увеличение  $V_p/V_s$ . Амплитуда этого спада никак не связана с магнитудой. Точное время, когда произойдет землетрясение, неизвестно. Однако кажется вероятным, что главный толчок придется на отрезок времени после восстановления  $V_p/V_s$ , составляющий примерно 10% от продолжительности аномального периода.

Советские коллеги не дали физического объяснения явлению уменьшения и восстановления отношения скоростей. Тем не менее мало кто сомневался в важности их открытия для задачи прогноза землетрясений.

### 9.1.2. Исследования в США

В 1972 г. американские сейсмологи начали аналогичные работы по поиску возможных прогностических изменений  $V_p/V_s$ . Первое появившееся на эту тему сообщение [2] относилось к наблюдениям у Блу-Маунтин-Лейк (горы Адирондак, штат Нью-Йорк), где было обнаружено падение и восстановление  $V_p/V_s$  перед землетрясениями с магнитудой порядка 3. В работе [480] были проанализированы сейсмограммы калифорнийских станций. В результате обнаружено резкое падение  $V_p/V_s$  примерно за 3,5 года до землетрясения 1971 г. в Сан-Фернандо ( $M=6,4$ ). Там же было показано, что уменьшение отношения связано главным образом с уменьшением  $V_p$ .

За этими открытиями последовало много аналогичных. В статье [218] сообщается об уменьшении  $V_p/V_s$  на 5% примерно за 50 дней до землетрясения с магнитудой 3,8, происшедшего на о. Ветреный (Алеутские о-ва) в 1971 г. При анализе сейсмограмм перед двумя землетрясениями с магнитудой 5,0, происшедшими в Японии в области Тюгоку—Кинки, расположенной к западу от Киото на о. Хонсю, было обнаружено [52] уменьшение  $V_p/V_s$  за 50 и 52 дня перед этими толчками.

Имеются сообщения об отсутствии таких изменений перед достаточно сильными землетрясениями. Так, перед землетрясениями с магнитудами 4—5, происходившими в 1972 г. в Беар-Валли к югу от Холлистера на разломе Сан-Андреас, не было обнаружено никаких предшествующих вариаций  $V_p/V_s$  [26]. Согласно [239], наблюдения сейсмических волн от взрывов в карьерах Центральной Калифорнии показали, что отношение  $V_p/V_s$  в течение 10 лет сохраняет почти постоянное значение порядка 1,75.

На основе этих результатов Нур и др. [296] высказали предположение, что изменения  $V_p/V_s$  могут не наблюдаться, если движение по разрыву носит сдвиговый характер в отличие от движений типа надвига, которые наблюдаются в Гарме, у Блу-Маунтин-Лейк и в Поперечных хребтах Южной Калифорнии. Однако перед землетрясением с магнитудой 5,0, происшедшем 24 февраля 1972 г. в Беар-Валли, наблюдалось отчетливое изменение скорости продольных волн [365]. В свете этого не представляются безнадежными попытки применить описанный метод прогноза к землетрясениям на разломе Сан-Андреас, где движение по разлому преимущественно сдвиговое.

Аггарвал и др. [3] сообщили об успешном предсказании землетрясения, происшедшего в районе Блу-Маунтин-Лейк. Исходя из наблюдаемого спада  $V_p/V_s$  от значения 1,73 до примерно 1,5 в течение всего нескольких дней, 1 августа 1973 г.

был дан прогноз о возможности землетрясения с магнитудой 2,5—3. И такое землетрясение с магнитудой 2,6 действительно произошло 3 августа. Верхний предел магнитуды и время возникновения ожидаемого землетрясения были оценены исходя из длительности аномалии  $V_p/V_s$ .

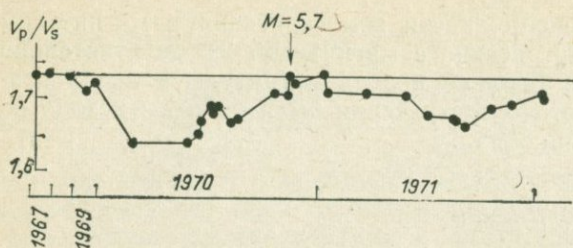
### 9.1.3. Исследования в Японии

Хотя японские сейсмологи раньше других обратили внимание на возможность изменений скоростей сейсмических волн перед землетрясением [155, 176, 373], до недавнего времени, как отмечено в обзоре по прогнозу землетрясений [414], в Японии не было обнаружено изменений  $V_p/V_s$ . Цитируем из упомянутого обзора: «Представляется иронией судьбы, что, несмотря на этот успех (успешные предупреждения во время повышения сейсмической активности в районе Мацусиро.— Авт.) и несмотря на многолетнее изучение землетрясений в Японии, современное направление в области прогноза землетрясений основывается на явлении, которому японские сейсмологи уделяли сравнительно мало внимания».

Как только в Японии стали вновь заниматься (начиная с 1973 г.) исследованием изменений скоростей сейсмических волн, прогностические изменения  $V_p/V_s$  были обнаружены для ряда происшедших ранее землетрясений (см. табл. 15.13). Например, было замечено [299] уменьшение  $V_p/V_s$  за 360 и 110 дней перед двумя землетрясениями: соответственно на севере префектур Мияги ( $M=6,5$ , 1962 г.) и Нагано ( $M=5,3$ , 1968 г.). В это же время похожие явления были обнаружены исследовательской группой по микроземлетрясениям Университета Тохоку [328] за 3450 дней до Ниигатского землетрясения 1964 г. ( $M=7,5$ ) и за 730 дней до землетрясения 1970 г. на юго-востоке префектуры Акита ( $M=6,2$ ). В работе [251] были использованы многочисленные данные по Мацусирскому рою землетрясений; примерно за 2 года до землетрясения 1969 г. с  $M=6,6$  в центральной части префектуры Гифу (Центральная Япония) обнаружено уменьшение  $V_p/V_s$  в районе сейсмической станции Гифу.

### 9.1.4. Исследования в Китае

В работе [88] сообщается об уменьшении  $V_p/V_s$  от 1,73 до 1,63 примерно за 300 дней до землетрясения 3 декабря 1970 г. в Сидзи (провинция Нинся). Кривая на рис. 9.2 получена осреднением наблюдений в Сидзи и на двух других близко расположенных станциях (не далее 60—70 км).

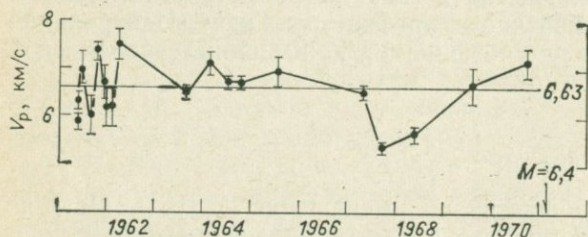


Р и с. 9.2. Изменения  $V_p/V_s$  перед землетрясением 1970 г. в Сидзи (провинция Нинся, Китай) [88].

## 9.2. ИЗМЕНЕНИЯ СКОРОСТЕЙ СЕЙСМИЧЕСКИХ ВОЛН И НЕВЯЗКИ ВРЕМЕН ПРОБЕГА

При наличии высококачественных записей можно определить  $V_p$  и  $V_s$  по отдельности обычными сейсмическими методами. Уитком отмечал [480], что изменения  $V_p/V_s$  перед землетрясением 1971 г. в Сан-Фернандо были обусловлены главным образом изменениями  $V_p$ . По-видимому,  $V_p$  уменьшилось на 20% за 1100 дней до землетрясения (рис. 9.3).

Изменения  $V_p$  обычно обнаруживают двумя методами. В одном из них вычисляют локальную кажущуюся скорость  $V_p$ , деля разность эпицентральных расстояний на разность времен прихода волн на станции, а во втором исследуют задержку во времени прихода продольной волны от удаленных землетрясений. Во втором методе задержку, или невязку  $P$ , вычисляют либо относительно времени прихода  $P$ -волны на близко расположенную реперную станцию, либо относительно времен пробега для какой-нибудь стандартной модели Земли. Первый метод можно назвать методом аномалии  $V_p$ , а второй — методом невязок времен  $P$ -волн.



Р и с. 9.3. Средние изменения  $V_p$  при землетрясении 1971 г. в Сан-Фернандо, наблюдавшиеся в Пасадене и Риверсайде в Калифорнии в пределах 120 км от эпицентра [480].

За 380 дней до землетрясения 1973 г. на мысе Мугу, Калифорния ( $M=6,0$ ), было обнаружено уменьшение  $V_p$  на 20% методом аномалии  $V_p$  [421]. В этой работе также анализировались волны от удаленных землетрясений, происшедших в Южной в Центральной Америке, на о-вах Фиджи, Кермадек—Тонга и близ Алеутских, Курильских и Японских о-вов. Обнаружено запаздывание времен пробега, составившее 1,0 с, которое, по-видимому, имело место примерно за 180 дней до землетрясения. Для исследований такого рода необходимо осреднение множества данных.

При анализе сейсмических волн от ядерных взрывов на Алеутских о-вах и от глубокофокусных землетрясений на Марианских о-вах отмечалось [198] запаздывание вступлений  $P$ -волн в Риверсайд, Южная Калифорния. Величина запаздывания достигала 0,8 с. Поскольку привлечение данных по прошлой сейсмической активности не помогло найти никакого объяснения этой аномалии, было высказано предположение, что она может иметь какое-то отношение к будущим землетрясениям.

Примерно за 300 дней до землетрясения 1970 г. с  $M=5,7$  в Сидзи (Китай) было замечено уменьшение  $V_p$  на 18% [98].

В работе [481] упоминалось уменьшение  $V_p$  с середины 1972 г. близ Риверсайда (Калифорния). Во второй половине 1973 г. это аномальное изменение, по-видимому, закончилось, в связи с чем авторы высказали предположение (в резюме статьи, доложенной на ежегодном собрании Американского геофизического союза в 1974 г.), что в ближайшем будущем здесь можно ожидать землетрясения с  $M=5,5$ . В феврале 1974 г. землетрясение действительно произошло, но его магнитуда составила лишь 4,1.

В противоположность случаям землетрясений, предваряемых аномалиями  $V_p$ , авторы работ [11, 239], анализировавшие сейсмические волны от взрывов в калифорнийских карьерах, не смогли найти каких-либо аномалий  $V_p$  перед землетрясениями, происходившими в Центральной и Южной Калифорнии, в том числе перед землетрясением 1968 г. в районе Боррего ( $M=6,4$ ). В [240] показано, что перед горным ударом с магнитудой 3,8 в Южной Африке в марте 1973 г. аномалии  $V_p$  не наблюдалось.

Мячкин и др. [271] сообщили о найденных ими изменениях  $V_p$  по наблюдениям на двух камчатских станциях. Сейсмические сигналы возбуждались взрывами в море в ряде точек, расположенных на продолжении прямой, соединяющей обе станции.

Уисс и его сотрудники широко применяли метод невязок времен продольных волн к различным данным. Ими был проведен [493] анализ времен прихода сейсмических волн от землетрясений, происходивших на Алеутских о-вах и о-вах Тонга, по

данном Мацусирской сейсмологической обсерватории (Япония). Оказалось, что за 1,5 года до начала роя 1965—1966 гг. (кумулятивная \*) магнитуда 6,3) появилось запаздывание примерно на 0,5 с. Наблюдаемую величину невязок времен  $P$ -волн можно объяснить, приняв уменьшение  $V_p$  на 20% в очаговой области радиусом 16 км под Мацусиро.

Уисс и Джонстон [494] сообщают об аналогичном увеличении невязок  $P$ -волн на 0,4 с примерно за 360 и 550 дней до землетрясений 1966 г. соответственно в Седдоне ( $M=6,1$ ) и Гисборне ( $M=6,2$ ) в Новой Зеландии. В работе [427] был дан независимый анализ данных по Гисборнскому землетрясению, и в результате найдено увеличение невязок на 0,5 с за 480 дней до него. В результате анализа невязок  $P$ -волн на станциях Центральной Калифорнии Уисс [490] пришел к выводу, что в настоящее время не обнаружено аномальных запаздываний во временах прихода  $P$ -волн, поэтому начиная с 1974 г. в течение 7—8 лет можно не опасаться возникновения землетрясения с магнитудой 7 и в течение 20 лет с магнитудой 8. Он проанализировал также невязки  $P$ -волн в Гарме [492], где ранее были обнаружены различные прогностические эффекты — вариации отношения  $V_p/V_s$ , переориентация осей сжатия, изменение электросопротивления и т. п., — и действительно нашел запаздывание времен прихода  $P$ -волн на 0,4 с за 440 дней до землетрясения 1969 г. с магнитудой 5,7.

Исследовательская группа по микроземлетрясениям Университета Тохоку [328] сообщила об увеличении невязок  $P$ -волн на 10 с на близких расстояниях примерно за 10 лет до Ниигатского землетрясения 1964 г. ( $M=7,5$ ) в Японии. Однако отсчеты времен вступления  $P$ -волн на сейсмограммах могли быть недостаточно точными (А. Хасагава, частное сообщение, 1975 г.). Уцу [468] анализировал временные вариации невязок  $P$ -волн по данным Мацусирской сейсмологической обсерватории и обсерватории по микроземлетрясениям в Камикинёсу, по вступлениям от подземных ядерных взрывов в штате Невада, США. Вторая из этих обсерваторий расположена в 20 км юго-западнее эпицентра землетрясения, происшедшего 20 января 1970 г. ( $M=6,7$ ) в районе хребта Хидака (Хоккайдо, Япония). Заметных изменений запаздывания  $P$ -волн обнаружено не было.

### 9.3. АНИЗОТРОПИЯ $V_s$

Известно, что в горных породах под влиянием негидростатических напряжений развивается анизотропия скоростей, в ре-

\*) Это магнитуда эквивалентного землетрясения, энергия которого равна суммарной энергии, выделившейся при всех толчках роя. — *Прим. ред.*

зультате чего  $S$ -волны расщепляются во времени на волны  $SV$  и  $SH$ . Колебания частиц в этих волнах происходят соответственно в вертикальной и горизонтальной плоскостях. Фаза  $SH$  обычно приходит несколько раньше, чем  $SV$ .

За 38 и 10 дней до землетрясений с магнитудами 4,0 и 3,9 и эпицентрами в районе хребта Слейт (близ Фэрвью-Пик) и Мины (штат Невада) было обнаружено [123, 124] увеличение  $V_{SH}-V_{SV}$  соответственно на 2,3 и 2,5%. По-видимому, это вызвано анизотропными свойствами дилатансии [125].

Логарифм времени предвестника для вариаций скоростей сейсмических волн, изложенных в этой главе, по-видимому, линейно связан с магнитудой подготавливаемого землетрясения. Интервал времени до главного толчка, когда отношение  $V_p/V_s$  и невязки  $P$ -волн возвращаются к своему прежнему уровню, имеет важное значение для предсказания времени возникновения землетрясения и может явиться основой детерминистского (в противоположность вероятностному) подхода к прогнозу землетрясений.

## ГЕОМАГНИТНЫЕ И ГЕОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ

### 10.1. КЛАССИЧЕСКИЕ НАБЛЮДЕНИЯ ИЗМЕНЕНИИ ГЕОМАГНИТНОГО ПОЛЯ В СВЯЗИ С ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯМИ

В § 2.4 была рассказана история об огромном подковообразном магните, который перестал притягивать перед землетрясением 1855 г. в Эдо (ныне Токио). Согласно тому, что мы в настоящее время знаем о магнитном поле Земли, напряженность геомагнитного поля имеет величину порядка 0,5 Гс. Между тем даже магнит, используемый в детской игрушке, создает магнитное поле, исчисляемое несколькими сотнями гаусс. Поэтому нечего и думать, что геомагнитное поле перед землетрясением 1855 г. изменилось в такой степени, что аннулировало силу притяжения магнита. Даже если бы геомагнитное поле полностью исчезло, это практически не оказало бы никакого влияния на гвозди и другие железные предметы, притянутые магнитом, поскольку геомагнитное поле гораздо слабее поля, создаваемого магнитом. Следовательно, падение с магнита гвоздей и других предметов нужно отнести за счет какой-то иной причины.

Часто сообщалось об исключительно больших изменениях геомагнитного поля в связи с землетрясениями, даже по результатам инструментальных измерений геомагнитного поля в давние времена. Например, А. Гумбольдт (см. [247]) сообщал о значительном изменении геомагнитного наклоения (угла между горизонтальной плоскостью и магнитной стрелкой, укрепленной таким образом, что она может свободно вращаться вокруг горизонтальной оси в плоскости магнитного меридиана), связанном с сильным землетрясением, которое произошло 4 ноября 1799 г. в Кумане, Венесуэла. Основываясь на измерениях геомагнитного наклоения 1 и 7 ноября, он нашел, что изменение этого угла составило 48'.

В Японии измерения геомагнитного поля производились перед возникновением и после Нобийского землетрясения 1891 г. ( $M=7,9$ ) вблизи эпицентра, и очевидное изменение поля в связи с землетрясением достигало 920  $\gamma$  [207, 442].  $1\gamma=10^{-5}$  Гс (гаусс), последний представляет собой единицу напряженности геомагнитного поля в системе СГСМ, и  $1\text{ Гс}=10^{-4}$  Т (тесла) в системе СИ, которая в дальнейшем будет широко использоваться.

ТАБЛИЦА 10.1

Изменения геомагнитного поля в связи с землетрясениями

Землетрясение	Год	<i>M</i>	Максимальное изменение поля, $\gamma$	Компонента 1)	Источник данных
Ноби, Япония	1891	7,9	902	<i>H</i>	[207]
Саката, Япония	1894	7,3	289	<i>H</i>	Там же
Рикую, Япония	1896	7,5	228	<i>F</i>	" "
Сусака, Япония	1897	6,3	607	<i>F</i>	" "
Хиросима, Япония	1905	7,6	118	<i>I</i>	" "
Сан-Франциско, США	1906	8,3	182	<i>I</i>	" "
Сев. Идзу, Япония	1930	7,0	114	<i>I</i>	" "
Санрику, Япония	1933	8,3	181	<i>I</i>	" "
Сидзуока, Япония	1935	6,3	315	<i>I</i>	" "
Осака, Япония	1936	6,4	75	<i>I</i>	" "
Наikai, Япония	1946	8,1	35	<i>D</i>	[208] "
Имайти, Япония	1949	6,4	182	<i>I</i>	Там же
Токати-оки, Япония	1952	8,1	159	<i>I</i>	" "
Сев. Мягги, Япония	1962	6,5	78	<i>I</i>	" "
Танабе, Япония	1962	6,1	7	<i>H</i>	[443]
		6,4			
Фэрвью-Пик, США	1962	2,1	1	<i>F</i>	[49]
Ниигата, Япония	1964	7,5	48	<i>I</i>	[208]
			20	<i>H</i>	[93]
Аляска, США	1964	8,4	100	<i>F</i>	[262]
Сидзуока, Япония	1965	6,1	5	<i>H</i>	[443]
Мацусиро, Япония	1965	5,7 <sup>2)</sup>	12	<i>Z</i>	[505]
Эфиопия	1965	4,3	1?	<i>F</i>	[117]
Мацусиро, Япония	1966	6,1 <sup>2)</sup>	7	<i>F</i>	[358—363]
Сев.-зап. Турция	1970	5,3	2	<i>F</i>	[183]
СССР <sup>3)</sup>	1970		0—8	<i>F</i>	[1]
Юго-вост. Акита, Япония	1970	6,2	0	<i>F</i>	[75]

1) *H*, *Z*, *F*, *D* и *I* обозначают соответственно горизонтальную, вертикальную и полную напряженности, магнитное склонение и наклонение.

2) Кумулятивная магнитуда.

3) Районы Гарма и Ташкента.

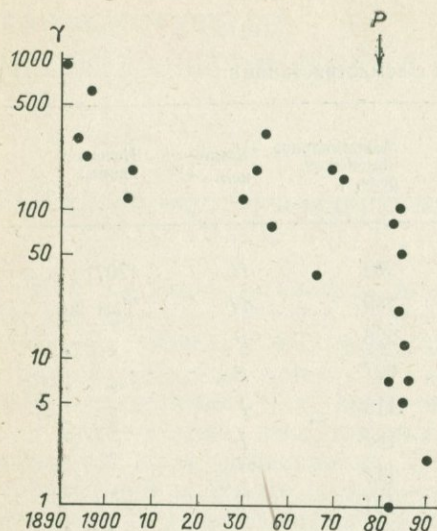


Рис. 10.1. Наблюдения изменений геомагнитного поля, ассоциируемых с происшедшими землетрясениями. Значения напряженности нанесены в зависимости от времени (в годах). *P* обозначает эпоху, когда для измерений был введен протонный прецессионный магнитометр.

Со времени землетрясения 1891 г. магнитологи Японии, в частности Като [207, 208] и другие, продолжали исследовать изменения геомагнитного поля в связи с землетрясением. В табл. 10.1 приведены сведения о сейсмомагнитных эффектах (изменениях геомагнитного поля в связи с землетрясением), взятые из различных опубликованных статей. Как продемонстрировали автор [339] и Джонстон и др. [189], интересно построить график зависимости величины сейсмомагнитного эффекта от времени (в годах) для того периода, в течение которого наблюдалось изменение поля. Наиболее отличительной чертой такого графика, как видно на рис. 10.1, является резкое уменьшение величины сейсмомагнитного эффекта со временем.

Скорее всего, такое явное ослабление сейсмомагнитного эффекта не свидетельствует о существовании реального векового уменьшения поля, но оно отражает улучшение измерительной техники со временем. Резкое спадание точек на рисунке около 1960 г. совпадает с периодом, когда стали широко применять протонный прецессионный магнитометр. Прежние магнитометры были не такими стабильными, как протонный магнитометр (что будет объяснено в следующем разделе). Поэтому на ранее полученные результаты, возможно, оказывал влияние дрейф нуля прибора.

Следует также подчеркнуть, что за последние два десятилетия была значительно усовершенствована методика проведения магнитной съемки. В первое время место проведения магнитных

измерений не отмечалось никаким знаком. Теперь многие магнитные станции снабжены знаком-ориентиром, врытым в землю, благодаря чему стало возможным повторять магнитные измерения в точности в том же месте.

Раньше очень мало внимания уделялось временным вариациям геомагнитного поля, которые, вероятно, не имеют ничего общего с сейсмомагнитным эффектом. В настоящее время разработаны методы исключения мешающих полей, источник которых находится вне Земли, и полей, создаваемых электрическими токами, которые наводятся в Земле временными вариациями ранее существовавших полей.

## 10.2. СОВРЕМЕННЫЕ МАГНИТОМЕТРЫ И МАГНИТНАЯ СЪЕМКА В НАСТОЯЩЕЕ ВРЕМЯ

Подробное описание классических магнитометров дается в любом учебнике по геомагнетизму (например, [60]). Однако долгое время было трудно измерить абсолютное значение напряженности магнитного поля с точностью  $\pm 1\gamma$ , так как не имелось стабильного эталона. Геомагнитные наблюдения такой высокой точности за большой период времени могли быть выполнены только на первоклассной магнитной обсерватории.

Пакард и Варин [309] предложили метод измерения абсолютной величины напряженности геомагнитного поля путем вычисления частоты свободной прецессии протонов в воде. Измерительное устройство было названо протонным прецессионным магнитометром и отличается от классических магнитометров тем, что основывается на атомистической постоянной — магнитном моменте протона (ядра атома водорода). Благодаря этому протонный прецессионный магнитометр свободен от инструментального дрейфа и его работа не зависит от внешних факторов, таких, как температура, влажность и т. д. Применение протонного магнитометра для измерения сейсмомагнитных эффектов в большой степени повысило надежность получаемых результатов.

В настоящее время имеются также магнитометры с оптической накачкой, в которых используется принцип квантовой электроники [9]. Такой магнитометр особенно удобен для высокочувствительных непрерывных наблюдений геомагнитного поля. Однако надежность прибора этого класса не так велика, как протонного магнитометра.

Для контроля за изменениями геомагнитного поля путем повторных магнитных съемок исключительно важно проводить наблюдения именно в той же самой точке, в которой были проведены предыдущие измерения. В вулканических областях

вследствие неравномерного распределения сильно намагниченных пород нередко приходится наблюдать, что напряженность геомагнитного поля в двух точках, отстоящих друг от друга всего лишь на 1 м, различается на 1000γ или даже больше. Поэтому Институт географических исследований (GSI), в обязанности которого входит проведение в Японии магнитных съемок на суше, содержит 97 магнитных станций первого класса и около 800 станций второго класса, расположенных по всей Японии. Так же как и в случае триангуляционного пункта, в земле укреплен каменный знак с целью указать точное местоположение магнитной станции. При измерениях необходимо с большим вниманием относиться к регулировке высоты треноги, на которой смонтирован чувствительный элемент магнитометра, добиваясь того, чтобы при каждой съемке чувствительный элемент располагался в одной и той же точке пространства.

Для обнаружения локального аномального изменения (такого, как сейсмомагнитный эффект) обычно сравнивают наблюдаемое значение с тем, которое получено на эталонной магнитной станции, находящейся на большом расстоянии от сейсмичной области (100 км или более).

### 10.3. ПРОБЛЕМЫ ПОДАВЛЕНИЯ ПОМЕХ

Геомагнитное поле испытывает флуктуации, не связанные с землетрясениями. Во-первых, оно изменяется с периодом порядка нескольких десятков и сотен лет. Такие вариации геомагнитного поля называют вековыми; полагают, что они создаются магнитогидродинамическими процессами внутри земного ядра, которое находится в Земле на глубинах 2900 км и более. Поэтому для того, чтобы выделить сейсмомагнитный эффект, необходимо исключить геомагнитные вариации такого типа. С этой целью значения, полученные в данной точке, сравниваются со значениями, найденными на опорной магнитной обсерватории, и исправляются с использованием магнитных карт изопор, на которых показано распределение вековых вариаций по данным магнитных съемок, проведенных по всей стране. Даже в такой небольшой стране, как Япония, вековые вариации геомагнитного поля не являются одинаковыми на всей ее территории. Поэтому, чтобы точно проследить вековые изменения, необходимо проводить повторные магнитные съемки приблизительно через каждые 5 лет.

Для обнаружения сейсмомагнитного эффекта нужно исключить геомагнитные изменения, источник которых находится вне Земли. К ним относятся суточные вариации геомагнитного поля и магнитные бури, вызванные электромагнитными процессами

в земной ионосфере и магнитосфере при воздействии на них солнечного ветра — потока плазмы, приходящего от Солнца. Если магнитное поле этих вариаций однородно на большой площади, то для исключения мешающего поля можно вычислять разность между одновременно измеренными значениями на магнитной станции и опорной обсерватории.

Однако практика, по крайней мере в Японии, показала, что простой разностный метод не в состоянии выявить локальные геомагнитные изменения с точностью  $\pm 1\gamma$ . Рикитакэ [335] сравнил значения полного вектора напряженности геомагнитного поля по наблюдениям в Мацусиро ( $F_M$ ), где в 1965—1967 гг. произошел рой сильных землетрясений, со значениями, измеренными одновременно в Кандзане ( $F_K$ ), бывшей обсерватории, располагавшейся в нескольких десятках километров к юго-востоку от Токио и в 200 км от Мацусиро. Если предположить, что флуктуации геомагнитного поля для обоих пунктов наблюдения одинаковы, то  $F_M - F_K$  примет постоянное значение для всего периода сравнения, который достаточно мал в сравнении с временем влияния вековых вариаций. Однако оказалось, что значения разности  $F_M - F_K$  группируются около некоторого среднего значения со среднеквадратичным отклонением, составляющим 3,7 и 2,6 $\gamma$  соответственно для дневного и ночного времени.

Детальное рассмотрение данных показывает, что изменения величины  $F_K$  всегда чуть больше, чем изменения  $F_M$ . Поэтому для исключения помех предложен метод взвешенной разности, в котором вместо  $F_M - F_K$  используется  $F_M - cF_K$ , где  $c$  — эмпирически найденная постоянная. Но даже при такой методике среднеквадратичное отклонение трудно сделать меньше 2 $\gamma$ .

Стейси и Уэсткотт [419] сравнили данные по полному вектору напряженности геомагнитного поля, измеренному протонным магнитометром, со значением, одновременно замеренным на станции в Англии, находящейся на расстоянии 25 км, и получили среднеквадратичное отклонение в 0,85 $\gamma$ , т. е. существенно меньше, чем в Японии.

Чтобы понять, почему поле короткопериодных геомагнитных вариаций заметно различается в разных местах даже в такой узкой стране, как Япония, нужно принять во внимание магнитное поле, создаваемое электрическими токами, которые возникают внутри Земли вследствие изменений первичного поля внешнего происхождения. Теперь известно [342], что в недрах Земли под территорией Японии имеется аномальное распределение электропроводности и поэтому наведенное магнитное поле, особенно его вертикальная составляющая, различно в разных местах. Такое влияние наведенного поля наиболее отчетливо демонстрируют наблюдения на острове, окруженном морем

с высокой проводимостью. Рикитакэ и др. [364] проанализировали группу из 1440 значений полного вектора напряженности, полученных в результате синхронных наблюдений с интервалом 1 мин на двух станциях на о. Осима в 100 км к югу от Токио (см. рис. 5.29). Поскольку станции располагались на западном и восточном побережьях острова с поперечником около 10 км, расстояние между станциями было всего 7 км. Разности значений полной напряженности, измеренных на этих станциях, соответствуют средним значениям со среднеквадратичными отклонениями 1,9 и 5,7γ соответственно в магнитно-спокойные и возмущенные дни. В возмущенные дни разброс значений доходил до 31γ. Вызывает удивление, что локальные геомагнитные вариации так сильно различаются на двух станциях, расстояние между которыми равно всего нескольким километрам. Подобная исключительно большая аномалия в поле геомагнитных вариаций вызвана наведенными электрическими токами, текущими вокруг острова. Из описанного выше ясно, что искать на острове локальное изменение геомагнитного поля порядка нескольких гамм почти безнадежно.

В японской национальной программе по предсказанию землетрясений (см. § 4.2.8) особое внимание уделено детальным наблюдениям геомагнитных вековых вариаций по всей Японии с помощью группы протонных магнитометров, расположение которых показано на рис. 4.7. Эту группу приборов используют также для проверки уровня естественных шумов путем сопоставления результатов синхронных наблюдений на всех станциях. Пусть  $F_i$  и  $F_j$  — значения полного вектора напряженности, измеренные одновременно на  $i$ -й и  $j$ -й станциях. Основываясь на систематических наблюдениях в июле 1968 г., Мори и Йосино определили разности полной напряженности между  $i$ -й и  $j$ -й станциями, т. е.  $F_i - F_j$  для различных комбинаций  $i$  и  $j$ ; наблюдения проводились в период с 00 ч 00 мин до 01 ч 00 мин местного времени с интервалом в 1 мин. Как можно видеть по рис. 10.2, среднеквадратичные отклонения  $F_i - F_j$  для различных комбинаций станций возрастают с увеличением расстояния между станциями. В случае наиболее удаленных друг от друга станций, расстояние между которыми достигает 1815 км, среднеквадратичное отклонение равно 3,0γ. Для станций, расположенных в нескольких сотнях километров друг от друга, среднеквадратичное отклонение приблизительно равно 2γ.

Если аналогичные оценки среднеквадратичного отклонения сделать для дневного времени, между 09 ч 00 мин и 10 ч 00 мин местного времени, то окажется, что среднеквадратичное отклонение составляет более 12γ (рис. 10.2). Поэтому необходимо подчеркнуть, что для сравнения значений параметров геомагнитного поля следует использовать данные, полученные в по-

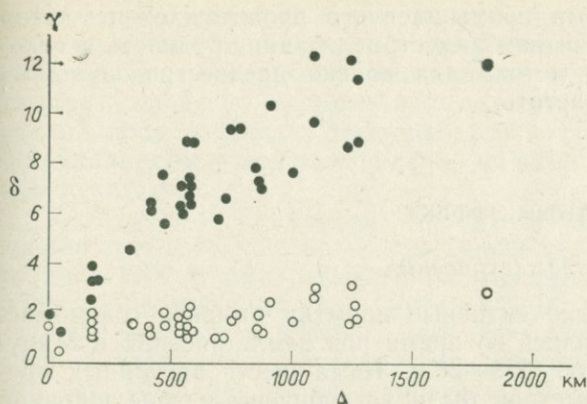


Рис. 10.2. Среднеквадратичные отклонения в статистическом распределении разностей значений полного вектора напряженности геомагнитного поля для двух станций в Японии, нанесенные в зависимости от расстояния между этими станциями. Используются часовые средние от 00 ч 00 мин до 01 ч 00 мин местного времени (светлые кружки) и от 09 ч 00 мин до 10 ч 00 мин (черные кружки) [263].

луночные часы (по крайней мере в ночные). Отсюда можно сделать вывод, что в Японии (когда используются полуночные данные) можно производить сравнение одновременно замеренных значений параметров геомагнитного поля для станций, расстояние между которыми менее 200 км, со среднеквадратичным отклонением 1—2γ. Чтобы повысить точность результатов сравнения, нужно иметь ряд опорных станций, работающих непрерывно в отдельных частях Японии. Кроме того, было бы желательно проводить наблюдения группой протонных магнитометров, размещенных вокруг точки наблюдения. Тогда уровень шумов можно было бы снизить, складывая сигналы от нескольких датчиков.

Возможно, проблема подавления помех в разных странах стоит по-разному. Если взять большие области, как, например, Сибирь, Китай, Канада, США и т. д., где строение недр менее сложно, чем в Японии, то там сравнение может быть выполнено с гораздо более высокой точностью. Поэтому в таких странах вовсе не безнадежно проводить поиски сейсмамагнитного эффекта. Но для Японии и других стран, имеющих сложное строение земных недр, эти работы требуют использования сложных методов и техники.

В такой высокоиндустриальной стране, как Япония, дело ухудшается еще и тем, что естественные геомагнитные вариации могут маскироваться магнитными полями, создаваемыми

блуждающими токами промышленного происхождения. Автор опасается, что с развитием индустриализации трудность использования магнитного метода для поиска предвестников землетрясений будет возрастать.

#### 10.4. СЕЙСМОМАГНИТНЫЙ ЭФФЕКТ

##### 10.4.1. Мацусирские землетрясения

Вероятно, наиболее активные попытки выявить сейсмомагнитный эффект делались во время роя землетрясений в Мацусиро в 1965—1967 гг. [358—363]. Тогда шесть протонных прецессионных магнитометров были установлены в зоне шириной 20 км и длиной 50 км, охватывая область землетрясений, как показано на рис. 5.55. Рис. 10.3 иллюстрирует изменения разности между 5-дневными средними полными векторами напряженности, полученными в Мацусиро ( $F_M$ ) и Канодзанае ( $F_K$ ) в период 1965—1970 гг. (в наблюдениях имелся перерыв около 3 лет). Как следует из рисунка, приблизительно в августе и сентябре 1966 г. разность  $F_M - F_K$  возросла примерно на  $10\gamma$ . Этот период совпадает с одним из наиболее активных периодов в рое землетрясений Мацусиро, связанных с крупным поднятием суши и просачиванием воды. Судя по точности наблюдений, о которой говорилось в предыдущем разделе, изменение, показанное на рис. 10.3, реалистично. Когда увеличение  $F_M$  отно-

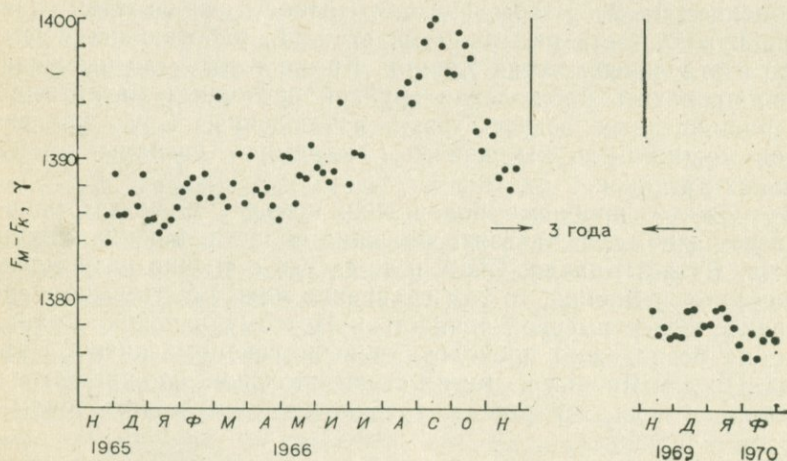


Рис. 10.3. Изменение 5-дневных средних значений разности  $F_M - F_K$  в течение 1965—1970 гг. [504].

сительно  $F_K$  достигло своего максимума, на другой станции, расположенной примерно на 6 км севернее точки наблюдения Маусиро, наблюдалось уменьшение полной напряженности приблизительно на  $5\gamma$ . Возможно, в это время намагниченность земной коры в районе Маусиро несколько увеличилась, хотя о причине геомагнитных изменений ничего определенного нельзя было сказать.

Держатель чувствительного элемента магнитометра был оставлен там примерно на 3 года, и наблюдения возобновились, когда в 1970 г. был осуществлен эксперимент по закачиванию воды в буровую скважину глубиной 1800 м [504]. Цель эксперимента состояла в проверке того, увеличится ли сейсмичность, если закачать воду в скважину, пробуренную в центре области, где несколько лет назад происходил рой землетрясений (см. § 16.2). Никаких заметных изменений геомагнитного поля в связи с экспериментом не наблюдалось, но оказалось, что за 3 года произошло аномальное уменьшение полной напряженности геомагнитного поля относительно значений Канодзанской обсерватории примерно на  $10\gamma$ .

#### *10.4.2. Землетрясение на юго-востоке префектуры Акита*

16 октября 1970 г. в юго-восточном углу префектуры Акита в северной части о. Хонсю, Япония, произошло землетрясение с магнитудой 6,2. Случилось так, что магнитная съемка с помощью портативного протонного магнитометра была выполнена в районе землетрясения 7—9 сентября [75]. Это позволило проверить возможность сейсмомагнитных эффектов, и поэтому сразу после землетрясения, 19—21 октября, была произведена повторная съемка. Результаты съемки были исправлены с учетом наблюдений на геодезической обсерватории Маусаса, находящейся примерно в 50 км к юго-востоку от эпицентра. Однако оказалось, что разности значений полной напряженности между этими двумя съемками столь малы на всех станциях, что невозможно обнаружить какого-либо заметного эффекта, превосходящего общую точность наблюдений. На ближайшей к эпицентру станции разность составила лишь  $0,2\gamma$  при эпицентральной дистанции около 10 км. В итоге был сделан вывод, что землетрясение не вызвало сколько-нибудь заметного сейсмомагнитного эффекта.

#### *10.4.3. Работы на разломах в Калифорнии*

Брейнер [50] установил группу рубидиевых магнитометров с оптической накачкой для обнаружения локальных изменений

геомагнитного поля в пункте Холлистер на разломе Сан-Андреас в Калифорнии. Выяснилось, что изменение порядка нескольких гамм или меньше может быть связано с движениями типа крипа на разломе. Джонстон и др. [189] установили 70 магнитных станций вдоль разломов Сан-Андреас и Сьерра (см. рис. 5.17) с промежутком в 10—15 км. Разности полной намагниченности на соседних станциях измерялись дифференциальным протонным магнитометром, синхронизация производилась с помощью радиосигналов. Для среднего из 75 измерений среднеквадратичное отклонение было порядка 0,5γ. При этом на любой из станций уменьшение полной напряженности геомагнитного поля за девять месяцев достигло примерно 3γ. В окрестностях станций, на которых были найдены значительные изменения напряженности геомагнитного поля, вероятно, происходило довольно много землетрясений с магнитудой 3—4.

Джонстон [187] недавно сообщил, что в июне 1974 г. вблизи разлома Гэрлок (см. рис. 5.17) было обнаружено изменение геомагнитного поля примерно на 4γ. Это было связано с землетрясениями с магнитудами 3,8 и 4,2. Съемка производилась в эпицентральной области в мае, и отмеченное изменение произошло за один месяц. В этой же работе приведено еще несколько примеров такого рода.

Из табл. 10.1 следует, что в последние годы о сейсмамагнитном эффекте сообщали также из других частей США [49, 262], из Эфиопии [117], Турции [183] и СССР [1].

### 10.5. ГЕОМАГНИТНЫЕ ЯВЛЕНИЯ, СВЯЗАННЫЕ С ЗАПОЛНЕНИЕМ ВОДОХРАНИЛИЩ И СО ВЗРЫВАМИ

Поскольку сейсмамагнитный эффект вызывается, вероятно, изменениями намагниченности горных пород, слагающих земную кору, под действием напряжений (см. § 10.6), магнитные эффекты могут быть обусловлены как заполнением водохранилищ больших размеров, так и химическими или ядерными взрывами.

Когда в горах Сноуи в Австралии было заполнено водохранилище, образованное плотиной Талбинго (35,6° ю. ш., 148,3° в. д.), вокруг водохранилища, имеющего длину и ширину соответственно 3 и 1 км и максимальную глубину 150 м [70], на 15 магнитных станциях производились систематические измерения протонным прецессионным магнитометром. В результате сравнения данных наблюдений со значениями полной напряженности геомагнитного поля на стационарной станции, находящейся в 3,5 км к северу от плотины, оказалось, что в связи

с заполнением водохранилища наблюдалось уменьшение полной напряженности на 2—8γ.

6 ноября 1971 г. на о. Амчитка (Алеутские о-ва) был произведен подземный ядерный взрыв, мощность которого была эквивалентна взрыву тротила в  $5 \cdot 10^6$  т [152]. В связи с этим взрывом, получившим название эксперимента «Канникин», было выполнено много геофизических наблюдений, и в частности было показано, что в точке, расположенной на расстоянии нескольких километров от эпицентра, магнитное поле после взрыва непрерывно изменялось. Через 30 с после взрыва протонный магнитометр на эпицентральной дистанции 3 км зарегистрировал ступенчатое увеличение поля на 9γ. Магнитная съемка, произведенная в районе взрыва, показала изменение полной напряженности примерно на 10γ.

Согласно сообщению [1], взрыв в Медео в Казахстане (СССР), по данным измерений на расстоянии около 1 км, вызвал возрастание величины полной напряженности геомагнитного поля на 9γ. Через несколько часов напряженность уменьшилась до нормального уровня, чего не наблюдалось в случае взрыва «Канникин».

При проведении эксперимента на месторождении магнетита [460] наблюдалось необратимое изменение напряженности геомагнитного поля порядка 10γ, вызванное взрывами черного пороха вблизи месторождения.

Когда подземная камера природного газа вблизи Ташкента (СССР) была заполнена газом под давлением 30 атм, изменение величины полного вектора напряженности геомагнитного поля достигло 20γ на расстояниях в несколько километров [1].

## 10.6. ИЗМЕНЕНИЕ ГЕОМАГНИТНОГО ПОЛЯ — ПРЕДВЕСТНИК ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ

### 10.6.1. Примеры из Японии

Основное внимание сейчас уделяется контролю за изменениями полного вектора напряженности геомагнитного поля при помощи протонных прецессионных магнитометров. Однако для того, чтобы судить о состоянии геомагнитного поля, необходимо следить за изменением всех трех его составляющих. Повторные магнитные съемки по трем компонентам, проводимые в Японии силами GSI, позволяют обнаруживать аномальные изменения поля.

На рис. 10.4 показана вековая вариация горизонтальной составляющей напряженности геомагнитного поля в Танабе и на

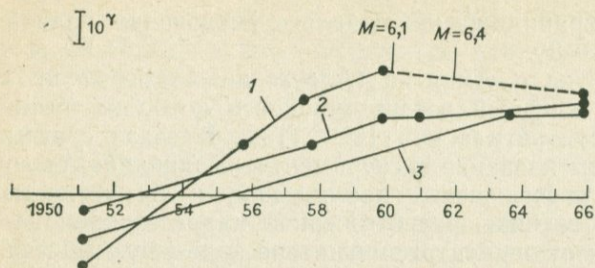


Рис. 10.4. Аномально большая вековая вариация горизонтальной составляющей напряженности геомагнитного поля в Танабе (1) на п-ове Кии, Центральная Япония. Показаны также изменения поля на соседних станциях, расположенных в нескольких десятках километров от Танабе: Такетой (2) и Годзэ (3). На рисунке отмечены два землетрясения, происшедшие в окрестности Танабе, и их магнитуды [443].

соседних с ней магнитных станциях первого класса на п-ве Кии (см. рис. 5.14) в Центральной Японии [443]. Точность измерений магнитометром типа GSI, используемым при магнитной съемке первого класса, оценивалась в  $\pm 0,1'$  для магнитного склонения (угла между направлением на истинный север и магнитным меридианом) и наклоения и  $\pm 1\gamma$  для напряженности. Однако общая точность результатов после приведения их к данной эпохе и исключения помех была  $\pm 0,3'$  для угловых измерений и  $\pm 4\gamma$  для измерений напряженности [443].

Изменение горизонтальной составляющей напряженности в Танабе с учетом погрешностей можно считать аномальным в сравнении с изменениями на соседних станциях, находящихся в нескольких десятках километров от Танабе. Интересно отметить, что это аномальное изменение исчезло после землетрясений с магнитудами 6,1 и 6,4, происшедшими вблизи Танабе в 1960 и 1961 гг. соответственно. Аномально большой ход вековой вариации горизонтальной составляющей напряженности геомагнитного поля, полученный по наблюдениям в Танабе в 50-х годах, мог быть изменением геомагнитного поля, предвещающим землетрясение.

Фудзита [93] сообщал об аномальном изменении геомагнитного поля до  $15\text{--}20\gamma$  в районе Ниигаты в течение 10 лет перед землетрясением, происшедшим там в 1964 г. ( $M=7,5$ , см. § 5.7.3). Это аномальное изменение было почти полностью компенсировано не более чем за год. Несмотря на долгую историю изучения в Японии геомагнитных эффектов как предвестников землетрясений, только два описанных примера можно считать достаточно надежными.

### 10.6.2. Примеры из США

Наиболее достоверный геомагнитный предвестник, о котором до сих пор сообщалось, наблюдался примерно за два месяца до землетрясения ( $M=5,3$ ), происшедшего 28 ноября 1974 г. вблизи Холлистера, Калифорния [187, 413]. Национальным центром сейсмологических исследований проводились наблюдения при помощи группы протонных магнитометров, установленных на семи станциях вдоль 80-км участка разлома Сан-Андреас вблизи Холлистера. В начале октября 1974 г. было отмечено увеличение поля на  $2\gamma$  на станции в нескольких километрах южнее Холлистера. В течение некоторого времени ситуация не изменялась, а к началу ноября геомагнитное поле возвратилось к своему прежнему уровню. 6 ноября на наклономере, установленном неподалеку в буровой скважине, наблюдался скачок наклона в 5 мкрад. С середины октября этот же наклономер регистрировал наклон в аномальном направлении. Перед землетрясением было замечено также аномальное изменение скорости крипа на разломе Сан-Андреас, а кроме того, запаздывание вступлений продольных волн на 0,3 с.

Поиски геомагнитного предвестника вел Уисс [491] в связи с землетрясением 1972 г. ( $M=7,1$ ) у о. Ситка, Аляска. Он нашел, что величина горизонтальной составляющей напряженности геомагнитного поля за 7,5 лет до землетрясения уменьшалась и это уменьшение достигало  $20\gamma$ , но по прошествии года после толчка поле восстановилось. Эта аномалия отмечалась и в наблюдениях в Колледже, Аляска, и Виктории, Британская Колумбия, — обе обсерватории находятся примерно на расстоянии 1200 км от о. Ситка. Эпицентр землетрясения находился в 200 км от Ситки.

### 10.6.3. Примеры из Китая

Большое внимание поискам возможных геомагнитных предвестников, по-видимому, уделяется в Китайской Народной Республике. По сообщению Ку [63; см. § 4.6], перед землетрясениями с магнитудой 3 или более вблизи Хуншаня разность значений вертикальной составляющей напряженности геомагнитного поля между Пекином и Хуншанем вблизи Синтая иногда уменьшалась на  $2\gamma$  за 4—5 дней до землетрясения, а за два дня до землетрясения восстанавливалось прежнее значение разности. Расстояние между точками наблюдения составляло около 300 км. Автору пока ничего больше не известно о работах китайских ученых по изменениям геомагнитного поля перед землетрясениями.

#### 10.6.4. Примеры из СССР

Поиски предварающих землетрясение геомагнитных изменений в СССР производились в районах Гарма и Ташкента. Сквородкин и др. [411] сообщили об уменьшении на 15 $\mu$  величины полного вектора напряженности геомагнитного поля 24 июля 1967 г., начавшемся за 4 ч до землетрясения в Гармском районе с  $K=7$  (пересчет  $K$  в  $M$  см. в табл. 8.1). Эпицентральное расстояние равнялось 24 км. Геомагнитное поле вернулось к нормальному состоянию через несколько часов после толчка. Изменение наблюдалось по отношению к двум фиксированным станциям (Гарм и Чусалы), расположенным на расстоянии нескольких десятков километров от точки наблюдения. Имеются и другие сообщения о геомагнитных предвестниках из СССР, но автору неизвестны подробности этих работ.

### 10.7. ТЕОРИЯ ТЕКТОНОМАГНЕТИЗМА

#### 10.7.1. Пьезоостаточная намагниченность

Породы, из которых сложена земная кора, в той или иной степени обладают магнитными свойствами. Намагниченность пород в общем складывается из двух частей: магнитной индукции и остаточной намагниченности. Если магнитную восприимчивость обозначить  $\chi$ , магнитная индукция образца породы в магнитном поле, имеющем напряженность  $F_0$ , будет равна  $\chi F_0$ . Естественную остаточную намагниченность (NRM) могут формировать различные процессы. Одним из самых распространенных является охлаждение вулканических пород, например излившихся на поверхность лав, от высокой температуры — нескольких сотен градусов Цельсия. В таких случаях порода приобретает высокостабильную намагниченность, называемую термоостаточной намагниченностью (TRM). У большинства вулканических пород NRM больше, чем магнитная индукция.

Согласно последним результатам, полученным при одноосном сжатии образцов пород [274, 275], магнитная восприимчивость  $\chi$  в направлении сжатия  $\sigma$  определяется формулой

$$\chi = \chi_0 / (1 + \beta \sigma), \quad (10.1)$$

где  $\chi_0$  — магнитная восприимчивость при нулевом давлении, а  $\beta$  — положительная постоянная порядка  $10^{-4}$  бар $^{-1}$ . Отсюда видно, что намагниченность в направлении сжатия уменьшается. И наоборот, намагниченность в направлении, перпендикулярном направлению сжатия, увеличивается.

Действие давления на остаточную намагниченность, например TRM, вероятно, можно описать соотношением типа (10.1) с  $\beta$  того же порядка величины (см., например, [274, 298]. Намагниченность, приобретаемая породой под влиянием давления, называется пьезоостаточной намагниченностью (PRM), но рассмотрение ее физического механизма выходит за рамки этой книги.

В работе Нагаты [273] дан обзор геомагнитных изменений, которые могут вызываться эффектами давления в земной коре, а также их физическая интерпретация, основанная на экспериментах по PRM. Можно утверждать, что ныне уже заложен фундамент новой отрасли геофизики, которую Нагата [273] назвал «тектономагнетизм».

### 10.7.2. Объяснение сейсмомагнитного эффекта

Предположим, что под влиянием давления намагниченность подземного сферического объема радиуса  $r$  испытывает изменение  $\Delta J$ . Если допустить, что этот объем намагничен в вертикальном направлении, то изменение магнитного поля в том же направлении в самой верхней части сферического объема определяется величиной

$$\Delta Z = 2\Delta M/r^3, \quad (10.2)$$

где  $\Delta M$  — изменение магнитного момента диполя, описывающего намагниченность сферы как целого:

$$\Delta M = \frac{4}{3} \pi r^3 \Delta J. \quad (10.3)$$

Таким образом, имеем

$$\Delta Z = 2 \cdot \frac{4}{3} \pi \Delta J \approx 8\Delta J. \quad (10.4)$$

Если принять, что намагниченность породы равна  $10^{-3}$  СГСМ/см<sup>3</sup> (типичное значение, например, для андезита), степень изменения намагниченности под действием давления есть  $10^{-4}$  бар<sup>-1</sup>, скажем, при давлении 100 бар, то изменение намагниченности будет равно

$$\Delta J = 10^{-3} \cdot 10^{-4} \cdot 10^2 = 10^{-5} \text{ СГСМ}. \quad (10.5)$$

Тогда из (10.4) получаем

$$\Delta Z = 8\gamma. \quad (10.6)$$

Простая оценка по порядку величины, проведенная выше, показывает, что возможное изменение магнитного поля при землетрясении должно быть порядка  $10\gamma$ . Намагниченность

породы базальтового типа может в несколько раз (до 10 раз) превышать принятое здесь значение. Однако для большинства землетрясений напряжение может быть в несколько раз меньше принятого здесь значения. Поэтому маловероятно, чтобы сейсмомагнитный эффект намного превышал  $10\gamma$ .

Можно произвести оценку магнитных изменений, приняв более реалистичную модель сейсмического источника. Стейси [417, 418] оценил магнитные изменения, связанные с разломом типа сдвига. Юкутаке и Тачинака [510] оценили аналогичные изменения, вызываемые подземным цилиндром, который испытывает гидростатическое давление изнутри. Это исследование может иметь отношение к магнитным изменениям, создаваемым местной дилатансией. Магнитные изменения, соответствующие этим моделям, имеют максимальное значение, более или менее совпадающее с тем, которое получается в результате расчета, приведенного в этом разделе. Шамси и Стейси [400] выполнили аналогичное исследование для землетрясений 1906 г. в Сан-Франциско и 1964 г. на Аляске.

Из наблюдений последнего времени, а также из модельных оценок следует, что если сейсмомагнитный эффект существует, то он должен быть порядка  $10\gamma$ , а изменение магнитного поля, предвещающее землетрясение, может быть несколько меньше. Чтобы определить реальный магнитный эффект, связанный с землетрясением, необходимо исключить помехи, как об этом говорилось в § 10.3.

## 10.8. АНОМАЛЬНЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ ЗЕМНЫХ ТОКОВ

В классической литературе можно встретить множество сообщений об аномальных изменениях земных токов перед землетрясениями или при землетрясениях (см., например, [247, 509]). Земные, или теллурические, токи всегда текут в земной коре, и большая часть их флуктуаций вызывается электромагнитной индукцией в Земле под действием временных геомагнитных вариаций главным образом внеземного происхождения. Поэтому флуктуации в земных токах трудно сопоставлять с возникновением землетрясения, поскольку невозможно полностью исключить наведенные индукцией токи.

Тем не менее наблюдатели утверждали, что во многих случаях они фиксировали сигналы земных токов, связанные с землетрясениями. Автор не раз вел наблюдения земных токов на площади, где ощущалось землетрясение, главным образом в связи с афтершоками сильного толчка, но при этом он никогда не замечал в земных токах аномальных изменений сейсмического происхождения, за исключением сопровождавшего землетрясение изменения в случае толчка магнитуды 5,0

в районе Мацусиро 23 ноября 1965 г. [358]. Нельзя сказать, чтобы автор не доверял сообщениям, содержащимся в исторических документах, но он все же настроен весьма пессимистично в отношении возможности возникновения аномалий земных токов в связи с землетрясениями.

Однако имеются и надежные сведения. Это, в частности, сообщение Хатаи и др. [154] (см. § 2.1.1) об аномальных изменениях земных токов в связи с поведением зубаток и данные Нагаты [272], относящиеся к наблюдению афтершоков землетрясения 1943 г. в Тоттори (см. § 5.3.4). Эти случаи заставляют нас поверить в существование аномалий земных токов, предвещающих землетрясения. Но все такие сообщения несистематичны, и мы не можем сказать, когда, где и при каких условиях наблюдаются подобные корреляции.

В последние годы контролю за аномальными изменениями земных токов, предвещающими землетрясения, большое внимание уделяется на Камчатке, в частности Соболевым, Федотовым и их коллегами [86, 415, 416]. Эти авторы сообщают о ряде случаев аномальных изменений земных токов, хотя и не всегда ясно, что эти изменения были предвестниками землетрясений. Как будет видно в § 15.5.1 и 15.5.2, моменты появления предвестников в виде аномалий земных токов, по-видимому, не всегда соответствуют временам появления других предвестников.

Ку [63] описывает измерения земных токов в Китае, где зарегистрированы слабые изменения электрического поля до 2 мВ/км приблизительно за 5 ч до Синтайского землетрясения с магнитудой 3. К сожалению, кроме обзора Ку, у автора не имелось никаких результатов наблюдений земных токов в Китае.

В настоящее время в такой индустриальной стране, как Япония, стало очень трудно наблюдать земные токи. Это происходит из-за блуждающих токов от железных дорог, фабрик и т. д. Поэтому прогноз землетрясений на основе наблюдения за изменениями земных токов в индустриальных районах становится все сложнее и сложнее.

## 10.9. ИЗМЕНЕНИЯ УДЕЛЬНОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ПОРОД

Изменения земных токов пока еще нельзя считать отчетливыми предвестниками землетрясений, хотя в ряде случаев в СССР, Японии, США и Китае наблюдения ведутся уже много лет. По-видимому, более определенны изменения удельного электрического сопротивления пород, предвещающие землетрясение.

Это объясняется тем, что при обработке измерений удельного сопротивления можно применить мощную технику фильтрации, с помощью которой подавляются помехи, тогда как при измерении земных токов подобную методику применить нельзя.

### 10.9.1. Наблюдения в СССР

Активные наблюдения изменений электросопротивления проводились в районе Гарма, СССР [15, 27—31]. В землю посылают электрические импульсы силой тока около 100 А, а в точке наблюдения, находящейся на расстоянии 6 км от источника, измеряется электрический потенциал, возбужденный импульсами тока. Таким образом, изменения напряженности электрического поля делаются пропорциональными общим изменениям сопротивления среды.

Как можно видеть по рис. 10.5, наблюдаемое удельное сопротивление изменяется в широких диапазонах. Перед умеренно сильными землетрясениями оно, по-видимому, уменьшается на 10—15%. Чем больше магнитуда приближающегося землетрясения, тем больше промежуток времени, в течение которого наблюдаются эти изменения.

Не совсем ясно, почему землетрясениям предшествуют столь большие изменения сопротивления среды. Может быть, эти изменения имеют что-то общее с теми, которые наблюдаются при экспериментах в образцах пород, насыщенных водой. Брейс и др. [43—46] показали, что удельное сопротивление насыщенного водой образца гранита при гидростатическом давлении 10 кбар возрастает приблизительно в 1000 раз. Они объясняют это почти коротким замыканием вследствие заполнения пор водой. Если к образцу прикладывать механическое напряжение при всестороннем давлении, то при напряжении, равном  $1/3$ —

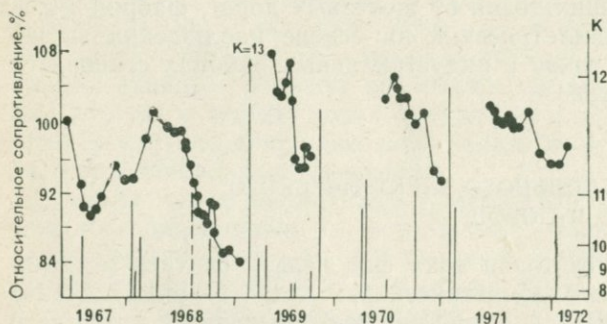


Рис. 10.5. Вековые изменения электрического сопротивления в Гармском районе и моменты возникновения местных землетрясений [29].

$\frac{2}{3}$  от разрушающего, удельное электрическое сопротивление начинает резко падать. Непосредственно перед разрушением удельное сопротивление, по-видимому, равно половине первоначальной величины. Брейс и др. считают, что такое уменьшение сопротивления вызывается образованием новых микротрещин под действием давления и, вследствие этого, переформированием путей проводимости (см. § 13.2.1 и 13.2.3). Напрашивается вывод, что изменение электрического сопротивления перед землетрясением тесно связано с дилатансией (гл. 14).

### 10.9.2. Наблюдения в США

Начиная с 1972 г. наблюдения изменений электросопротивления среды ведет ряд американских институтов вблизи Холлистера, Калифорния, на разломе Сан-Андреас. Бюфе и др. [55] сообщили о ступенчатых изменениях сопротивления, которые происходят в связи со ступенчатым изменением деформаций, создаваемым умеренно сильными землетрясениями, происходящими поблизости. Они указали, что относительное изменение удельного сопротивления в  $10^4$  раз и даже более превышает наблюдаемые изменения деформации.

Мазелла и Моррисон [238] сообщили об уменьшениях удельного электрического сопротивления среды на 10—20% за 60 и 30 дней до землетрясений с магнитудами 3,9 и 3,5 (кумулятивное значение для роя), которые произошли соответственно 22 июня и 8—13 октября 1973 г. Представляется вероятным, что изменения электрического сопротивления могут быть предвестниками землетрясений на разломе Сан-Андреас и в Гармском районе.

### 10.9.3. Наблюдения в Китае

Фантастическое сообщение об изменениях сопротивления горных пород, предвещающих землетрясения, поступило из КНР [97]. По-видимому, контроль за изменениями сопротивления как предвестниками землетрясений в Китае становится очень популярен. Например, в Тяньшуне, провинция Ганьсу, за 40 дней до землетрясения с магнитудой 5,4<sup>\*</sup>), происшедшего 3 декабря 1970 г. в Сидзи (провинция Нинся), было отмечено уменьшение сопротивления на 14%. Наблюдения велись примерно в 140 км к югу от эпицентра. Аномалия сопротивления продолжалась в течение 80 дней. В этом же случае аналогичное изменение электрического сопротивления на 16% (рис. 10.6) наблюдалось примерно за 60 дней до землетрясения в Ланьчжоу,

<sup>\*</sup>) В работе [88] для магнитуды этого землетрясения приводится значение 5,7 (см. § 9.1.4).

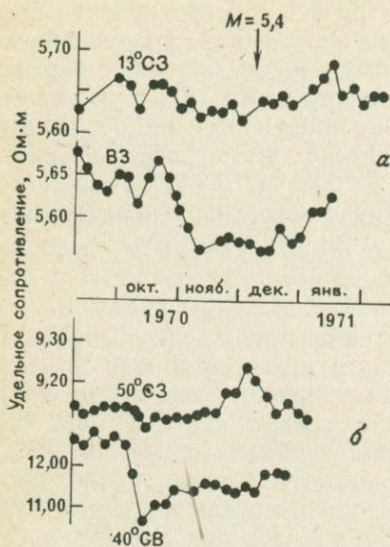


Рис. 10.6. Изменения удельного электрического сопротивления в двух направлениях, указанных на рисунке, в Тяньшуйе (а) и Ланьчжоу (б) в связи с землетрясением 1970 г. в Сидзи. (О расположении станций см. текст [97].)

провинция Ганьсу, приблизительно в 150 км к западу от эпицентра.

Имеются сообщения о более чем 30 случаях изменения сопротивления такого рода в связи с землетрясениями, магнитуда которых изменялась от 3,8 до 7,9. Маловероятно, чтобы изменение сопротивления наблюдалось в 800 км от эпицентра землетрясения с магнитудой 7,9, которое произошло 6 февраля 1973 г. в Лухо (31,4° с. ш., 100,6° в. д.), провинция Сычуань. В противоположность наблюдениям в СССР и США, в Китае прогностические изменения сопротивления проявляются иногда в сторону его увеличения. Трудно судить о достоверности китайских сообщений, но представляется вероятным, что с увеличением магнитуды приближающегося землетрясения интервал времени изменений сопротивления возрастает по закону, не противоречащему эмпирическому соотношению, предложенному для предвестников землетрясений Шольцем и другими исследователями [394].

#### 10.9.4. Наблюдения в Японии

По предложению автора И. Йокояма в 1952 г. (не опубликовано) наблюдал изменения сопротивления грунта на обсерватории Абурацубо в 60 км южнее Токио, специализирующейся на изучении движений земной коры. Он нашел, что сопротивле-

ние изменяется в соответствии с растяжением и сжатием земной коры под действием нагрузки, вызванной океаническим приливом. Указывалось, что изменение электросопротивления в 300 раз превышает изменение механической деформации, которая бывает порядка  $10^{-6}$  для случая приливного деформирования. Надежность этого исследования была недостаточна из-за слабого развития электроники в то время.

Начиная с 1965 г. интенсивное изучение данных, полученных в результате натуральных измерений и лабораторных экспериментов, в Абурацубо было возобновлено Сейсмологическим институтом [355—357, 498—502]. Ямадзаки [500, 501] для измерения изменений удельного сопротивления сконструировал высокочувствительный вариометр. В нем использован тот же принцип, что и в четырехполосном методе, применяемом в геофизической разведке при поисках погребенных структур, отличающихся по своим электрическим свойствам.

Переменный электрический ток с частотой 67 Гц вводится в землю через пару электродов, причем сила тока обычно равна 100 мА. Между этими двумя электродами в землю врыта пара внутренних электродов; расстояние между электродами, расположенными вдоль прямой линии, для данного вариометра составляет 1,6 м.

Если расстояние между приемными электродами обозначить через  $a$ , то удельное сопротивление  $\rho$  будет определяться формулой

$$\rho = 2\pi aV/I, \quad (10.7)$$

где  $V$  и  $I$  — напряжение между двумя внутренними электродами и сила тока, вводимого в землю, соответственно. Измерительная система сконструирована так, что  $V$  компенсируется напряжением, снимаемым с генератора через трансформатор. На практике реостат приводится в движение сервомотором так, что система все время находится в равновесии, т. е.  $V$  все время компенсируется напряжением от трансформатора. С этой целью малое отклонение  $\Delta V$  от равновесного состояния усиливается и подается на сервомотор, который работает по принципу фазового детектора. В системе используется фильтр с очень узкой полосой пропускания, в противном случае помехи от промышленной силовой линии с частотой 50 Гц и других искусственных источников будут слишком велики — и это несмотря на то, что для питания используется нечетная частота 67 Гц.

Угол поворота сервомотора преобразуется в приращение напряжения, регистрируемое многоканальным самописцем. Как правило, изменение удельного сопротивления регистрируется каналами с большей и меньшей чувствительностью. Оказывается, что изменение сопротивления порядка  $10^{-4}$  с амплитудой

примерно 1 см на записи может устойчиво регистрироваться на ленте самописца.

Вариометр сопротивления обычно регистрирует изменения, сопровождаемые растяжением и сжатием грунта под действием приливного давления в ближайшем море. Деформация коры этого рода, достигающая  $10^{-6}$ , наблюдается через относительное изменение сопротивления  $10^{-4}$ , умноженное на некоторый коэффициент. Из этого делается вывод, что в той среде, в которую погружены электроды, должен действовать какой-то механизм усиления относительного изменения деформаций в земле.

В месте установки вариометра грунт состоит из шлакового туфа — породы с высокой пористостью и проницаемостью. Испытания отобранных образцов на сжатие показали, что относительное изменение удельного сопротивления  $\Delta\rho/\rho$  гораздо больше, чем линейная деформация  $\Delta L/L$ . При деформации порядка  $10^{-6}$  значение отношения  $(\Delta\rho/\rho)/(\Delta L/L)$  достигает 300 (такие деформации возникают при приливах). Представляется возможным, что при меньших деформациях значение этого отношения возрастает. Однако лабораторными измерениями этого не докажешь из-за ограниченной чувствительности имеющихся тензодатчиков. Причина такого поведения пород неизвестна. Вероятно, существует особый механизм электропроводности через многочисленные поры, заполненные водой. Имеется предположение, что под действием сжатия площадь контакта между соседними порами может значительно возрастать. Подобный механизм мог бы объяснить весьма специфическую зависимость удельного электрического сопротивления от деформации.

Во время землетрясения с магнитудой  $M=7,9$ , происшедшего в Токати-оки 16 мая 1968 г., на эпицентральной дистанции свыше 700 км вариометр зарегистрировал ступенчатое изменение сопротивления. После этого, где бы в Японии и ее окрестностях ни происходило сравнительно сильное землетрясение, вариометр фиксировал аналогичные ступеньки на кривой электросопротивления.

На рис. 10.7 показано изменение сопротивления во время землетрясения в Токати-оки. Ступенька возникает не сразу. Поскольку изменения сопротивления регистрировались многоканальным самописцем, имеющим интервал регистрации 30 с, из рисунка видно, что время, которое называется временем нарастания и требуется для полного формирования ступеньки, превышает несколько минут.

В продолжение периода наблюдений, длившегося несколько лет, было зафиксировано приблизительно 30 примеров ступенек сопротивления. Такая ступенька была связана даже с землетрясением, имевшим магнитуду 7,8 и происшедшим у восточного побережья о. Хоккайдо на расстоянии свыше 1000 км.

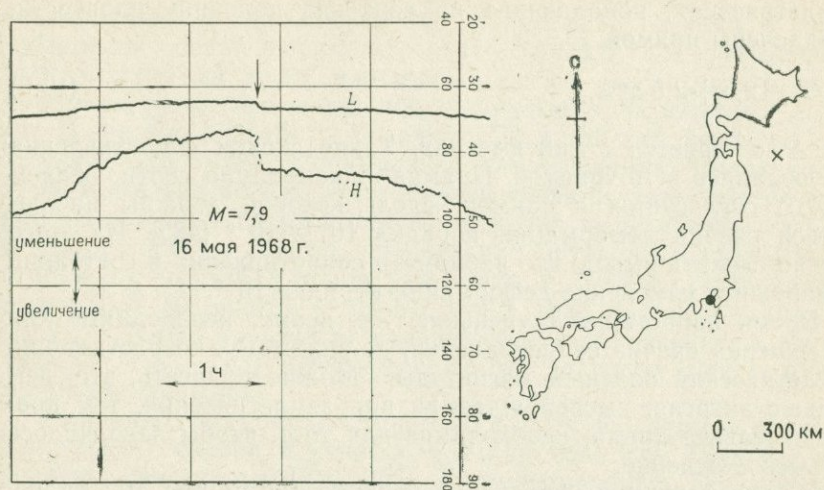


Рис. 10.7. Скачок сопротивления во время землетрясения в Токати-оки ( $M=7,9$ ) по записям каналов с большой и малой чувствительностью (соответственно  $H$  и  $L$ ). Точка наблюдения ( $A$ ) и эпицентр обозначены на карте справа кружком и крестиком соответственно [357].  $\Delta\rho/\rho=1,2 \cdot 10^{-4}$ .

Скачки сопротивления возникали и при нескольких глубокофокусных землетрясениях с глубиной очага 300—500 км. Они наблюдались также при землетрясениях с магнитудой менее 5, при условии что толчки происходили под Токио.

Величину ступеньки в изменении сопротивления в каком-либо месте можно перевести в ступеньку, или скачок, на расстоянии 100 км. Это будет гипотетический скачок на расстоянии 100 км, если величина скачка сопротивления уменьшается в соответствии с законом  $\Delta^{-3/2}$ , как предположили для скачков деформации Вайдман и Мейджер ([485]; см. § 7.5). Интересно, что найденный таким путем  $\lg$  скачка на расстоянии 100 км связан линейной зависимостью с магнитудой землетрясения.

Теперь становится ясно, что эти скачки сопротивления представляют собой не что иное, как скачки деформации, которые улавливаются прибором с необычно высокой чувствительностью. Если сравнить значения наблюдаемых скачков сопротивления с предсказаниями теории дислокаций [502], то можно сделать вывод, что при деформациях порядка  $10^{-9}$  коэффициент увеличения, т. е. значение  $(\Delta\rho/\rho)/(\Delta L/L)$ , достигает величины порядка  $10^4$ .

Интересно проанализировать, каков предел обнаружимости скачка сопротивления на плоскости  $M$ ,  $\lg \Delta$ . Оказывается, что

землетрясения, попадающие на верхнюю половину плоскости, ограничены прямой

$$M = -12,5 + 2,5 \lg \Delta, \quad (10.8)$$

где  $\Delta$  измеряется в сантиметрах. Такие скачки сопротивления наблюдались в Абурацубо. Прямая, описываемая соотношением (10.8), согласуется с прямой, вдоль которой должны наблюдаться скачки деформации порядка  $10^{-8}$ — $10^{-9}$  [485]. Из этого можно сделать вывод, что вариометр сопротивления в состоянии обнаружить изменение деформации порядка  $10^{-9}$ .

Время нарастания ступеньки, т. е. время, необходимое для завершения скачка сопротивления, по-видимому, возрастает для землетрясений большей магнитуды. Можно полагать, что, чем больше энергия, высвобождаемая при землетрясении, тем продолжительнее время, необходимое для того, чтобы закончилось ее высвобождение.

Из рассмотрения ступеньки сопротивления на рис. 10.7 видно, что изменение сопротивления началось за несколько часов до ее образования. Имеется ряд примеров изменений такого типа, предвещающих землетрясение. Ямадзаки [503] применил к полученным из наблюдений записям числовой фильтр верхних частот, и ему удалось показать, что эти предвестники начинаются за несколько часов до землетрясения (см. табл. 15.13).

Природа обнаруживаемых таким образом предвестниковых изменений электрического сопротивления на современной стадии исследований ясна не полностью. Однако представляется, что время предвестника никак не связано с магнитудой землетрясения. Вполне возможно, что эти изменения сопротивления отражают образование крипоподобного разрыва непосредственно перед основным разрывом в земной коре. Предвестники этого типа могут играть важную роль в оперативном прогнозе землетрясений.

Кавада [209] проводил измерения электросопротивления в эпицентральной зоне землетрясений 1965—1967 гг. в Мацусиро. Из-за сильного дождя не удалось обнаружить надежных изменений сопротивления, которые были бы тесно связаны с сейсмическими толчками, хотя перед толчками заметной силы отмечалось некоторое аномальное уменьшение сопротивления.

## 10.10. ИЗМЕНЕНИЯ В ГЕОМАГНИТНЫХ ВАРИАЦИЯХ

На магнитной обсерватории Какиока, постоянно действующей магнитной обсерватории в Японии, расположенной на расстоянии 60 км к северу от Токио, было замечено, что отношение

вертикальной составляющей ( $\Delta Z$ ) геомагнитного поля к горизонтальной составляющей ( $\Delta H$ ), т. е.  $\Delta Z/\Delta H$ , для бухтообразных возмущений поля, внезапного начала магнитных бурь и других геомагнитных вариаций, по-видимому, испытывает вековое изменение [506, 507]. В начале XX в.  $\Delta Z/\Delta H$ , вероятно, составляло около 0,65, а примерно к 20-м годам оно уменьшилось приблизительно до 0,50. Затем это отношение стало быстро возрастать и к 40-м годам достигло значения приблизительно 0,75. С этого времени, видимо, происходило неуклонное уменьшение отношения  $\Delta Z/\Delta H$ , которое приобрело к 1975 г. значение порядка 0,65. Интересно отметить, что в 1923 г., когда к юго-западу от Токио произошло сильнейшее землетрясение в Канто ( $M=7,9$ ; см. § 3.3), отношение  $\Delta Z/\Delta H$  достигло своего минимального значения.

Причина, по которой отношение  $\Delta Z/\Delta H$  в Какиоке испытывает такое вековое изменение, нам не известна. Однако, как полагает Янагихара [506, 507], рассматриваемую вековую вариацию отношения  $\Delta Z/\Delta H$  можно объяснить некоторым изменением наклона поверхности подземного проводника, имеющегося в модели Рикитакэ ([342]; см. § 10.3), которая объясняет аномалию в геомагнитных вариациях, наблюдаемую не только в Какиоке, но и в Центральной Японии. Согласно этой модели, аномалия может вызываться опусканием поверхности слоя высокой проводимости в мантию. Пока мы еще не знаем причин такого крупномасштабного изменения в конфигурации подземного проводника.

Верно это предположение или нет, но интересно исследовать, в какой степени короткопериодные геомагнитные вариации будут видоизменены, если произойдет изменение проводимости в подземном объеме. Современная теория дилатансии (см., например, [394]; гл. 14) утверждает, что в очаговой зоне приближающегося землетрясения происходит изменение электропроводности. Как говорилось в предыдущем разделе, изменения в электросопротивлении пород до нескольких десятых долей процента действительно наблюдались в СССР, США и Китае.

Опираясь на свое исследование электромагнитной индукции, которая создается внешним полем, вносимым плоской волной, Хьюз [167—169] показал, что микропульсации геомагнитного поля могут испытывать сильные видоизменения под действием локальной аномалии проводимости. Хотя до сих пор, кроме как из Какиоки, ни о каких реальных наблюдениях видоизменений в геомагнитных вариациях не сообщалось, стоит проверить подобный эффект в связи с возникновением землетрясения. Данная ситуация во многом сходна с видоизменением под действием локальной дилатансии наклонов и деформаций, создавае-

мых земными приливами ([33]; см. § 7.8). Рикитаке [354] исследовал электромагнитную индукцию в проводящем объеме, погруженном в менее проводящую среду. Поскольку во всех возможных случаях может происходить увеличение примерно в три раза горизонтальной компоненты короткопериодных геомагнитных вариаций, представляется вполне возможным определять положение подземной дилатантной зоны путем наблюдения короткопериодных геомагнитных вариаций.

Миякоси [249] также показал, что Ташкентская аномалия геомагнитных вариаций испытывает вековое изменение, которое, вероятно, как-то связано с происшедшим там землетрясением 1966 г.

## АКТИВНЫЕ РАЗЛОМЫ И СКЛАДЧАТОСТЬ

## 11.1. МЕДЛЕННЫЕ ПОДВИЖКИ ПО РАЗЛОМАМ

## 11.1.1. Разлом Сан-Андреас

Известно, что некоторые участки разлома Сан-Андреас и его ответвлений, таких, как разломы Хейвард и Калаверас, испытывают непрерывные медленные движения, не сопровождаемые сильными землетрясениями ([420], см. § 5.4.4, 8.2.3 и рис. 5.17, 5.39). Через несколько лет после постройки в начале 50-х годов здания винного завода близ Холлистера, примерно в 150 км южнее Сан-Франциско, в его стенах и перекрытиях появились трещины. После ремонта образование трещин продолжалось. Было обнаружено, что это здание сооружено прямо на разломе Сан-Андреас, который испытывает медленное правостороннее движение со скоростью нескольких сантиметров в год.

На рис. 11.1 видна трещина в канаве вблизи здания завода, образовавшаяся в течение нескольких лет. В самом городе Холлистере вдоль разлома Сан-Андреас, пересекающего его, в последние годы наблюдаются смещения мостовых и оград, трещины в стенах домов и подобные явления. Из-за этих движений по разлому Холлистер приобрел большую известность.

В последнее время проводятся интенсивные работы по измерениям таких медленных движений (крипа) с помощью крипометров [277, 447] и повторных геодиметрических съемок [162]. Скорости движения, найденные из этих измерений, достигают нескольких сантиметров в год. Можно сказать, что разлом Сан-Андреас является активным, поскольку на нем в настоящее время происходит крип. Отдельные участки разлома Сан-Андреас проявляют микросейсмическую активность в противоположность очень низкому уровню активности на тех участках разлома (например, районы Сан-Франциско и Форт-Техона), где в настоящее время разлом, по-видимому, заперт.

Нейсон [277] описывает аномальное увеличение скорости крипа от 12 до 20 мм/год, наблюдавшееся в Холлистере за 800 дней до двух землетрясений 9 апреля 1961 г. с магнитудами 5,6 и 5,5. По-видимому, период активного крипа закончился, когда произошли землетрясения, после чего в течение полутора лет крип вообще не отмечался, а затем он возобновился, но с малой скоростью.

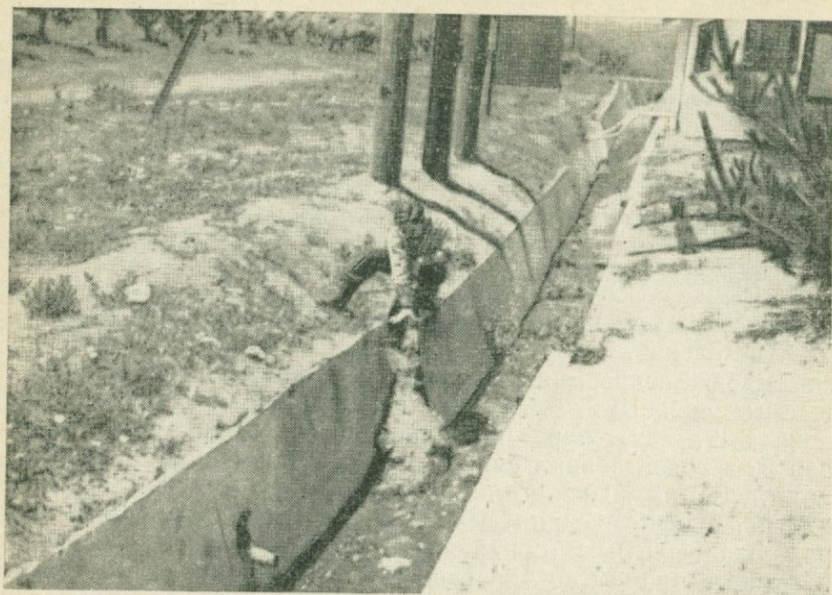


Рис. 11.1. Трещина, проходящая через канаву около здания винного завода близ Холлистера, появившаяся вследствие крипа на разломе Сан-Андреас (фото автора в 1966 г.).

За две недели до Паркфилдского землетрясения 1966 г. ( $M = 5,3$ , см. § 4.3) на почве в 1,5 км к юго-востоку от Паркфилда были обнаружены свежие трещины. В работе Аллена и Смита [12] выдвигается предположение, что в это время происходил активный крип.

Начиная с 1968 г. на разломах Сан-Андреас, Хейвард и Калаверас работало более 40 крипометров. Измерения близко расположенными приборами показали, что явления крипа распространяются вдоль разломов со скоростью 1—10 км/сут.

### 11.1.2. Анатолийский разлом

В Анатолии (Малой Азии) происходит много землетрясений. Вероятно, самое разрушительное из них — Эрзинджанское землетрясение 1939 г. ( $M = 8,0$ ; координаты эпицентра:  $39,5^\circ$  с. ш.,  $39,5^\circ$  в. д.; см. [331, стр. 570]), при котором погибло 30 000 человек и было разрушено свыше 30 000 домов. На поверхности почвы появился правосторонний разлом длиной 350 км с максимальным смещением 4,2 м.

Большинство сильных землетрясений в Турции происходило на геологическом разломе, проходящем в широтном направлении по северным отрогам Северо-Анатолийского горного хребта параллельно его простиранию. Примечательно, что после 1939 г. сейсмическая активность, характеризуемая магнитудой 7 и более, переместилась к западу (см., например, [257]).

Амбрасейс [16], специально занимавшийся турецкими землетрясениями, обнаружил, что железнодорожные рельсы за 6 лет сместились на 30 см в месте пересечения путей с разломом, появившимся в результате Хамамлийского землетрясения 1944 г. ( $M=7,6$ ). Эпицентр этого землетрясения находился на расстоянии около 100 км к северу от Анкары, а в течение последующих 6 лет землетрясений в этих местах не было. Когда в 1951 г. произошло землетрясение с магнитудой 6,5, рельсы опять испытали относительное смещение. В 1957 г. около того места, где в 1951 г. произошло смещение, была построена каменная стена. В 1969 г. Амбрасейс обнаружил, что с восточной стороны в стене образовался разрыв с правосторонним смещением амплитудой 24 см. Неизвестно, появилось ли это смещение в результате медленного движения или нет, но представляется весьма вероятным, что данный участок Анатолийского разлома испытывает такой же крип, как на разломе Сан-Андреас.

## 11.2. РАЗЛОМЫ, ИСПЫТЫВАВШИЕ ЧАСТЫЕ ПОДВИЖКИ В ПРОШЛОМ

### 11.2.1. Движения по разлому Танна

В § 5.3.3 был описан разлом Танна, появившийся во время землетрясения 1930 г. в Северном Идзу ( $M=7,0$ ) с почти левосторонним сдвиговым смещением до 2—3 м (см. рис. 5.8). В этом же районе в 841 г. произошло землетрясение, магнитуда которого по приблизительным оценкам составляла 7,0. Куно [222], изучавший геологию вулканов в районе Идзу, примерно в 100 км юго-западнее Токио, обнаружил, что глубокие овраги на склонах вулканов не пересекают разлом Танна, но зато имеют продолжение в виде оврагов по другую сторону разлома, если предположить левостороннее смещение с амплитудой около 1 км. Оказалось, что в том же районе аналогичные смещения испытали различные структуры, геологический возраст которых известен. Куно пришел к выводу, что такой рельеф в районе разлома Танна должен был возникнуть в результате непрерывных движений по нему, причем величина смещения за период времени  $5 \cdot 10^5$  лет составила 1 км. Отсюда получается оценка скорости движения по разлому, равная 2 м за 1000 лет.

Японские геологи и географы называют разлом активным также и в том случае, когда движения по нему происходили с перерывами в течение нескольких сотен или тысяч лет.

### 11.2.2. Активные разломы Японии

Интенсивные полевые исследования, дополненные использованием аэрофотосъемки, привели японских геологов и географов к открытию многих активных разломов [112, 280, 281]. Вероятно, наиболее широко поставлено изучение активных разломов в области Кинки—Тюбу в Центральной Японии. Как видно из рис. 11.2, где показаны основные активные разломы этой области, все разломы делятся на два класса, а именно: правосторонние разломы простирания СВ—ЮЗ и левосторонние разломы простирания СЗ—ЮВ. Характер движения по этим

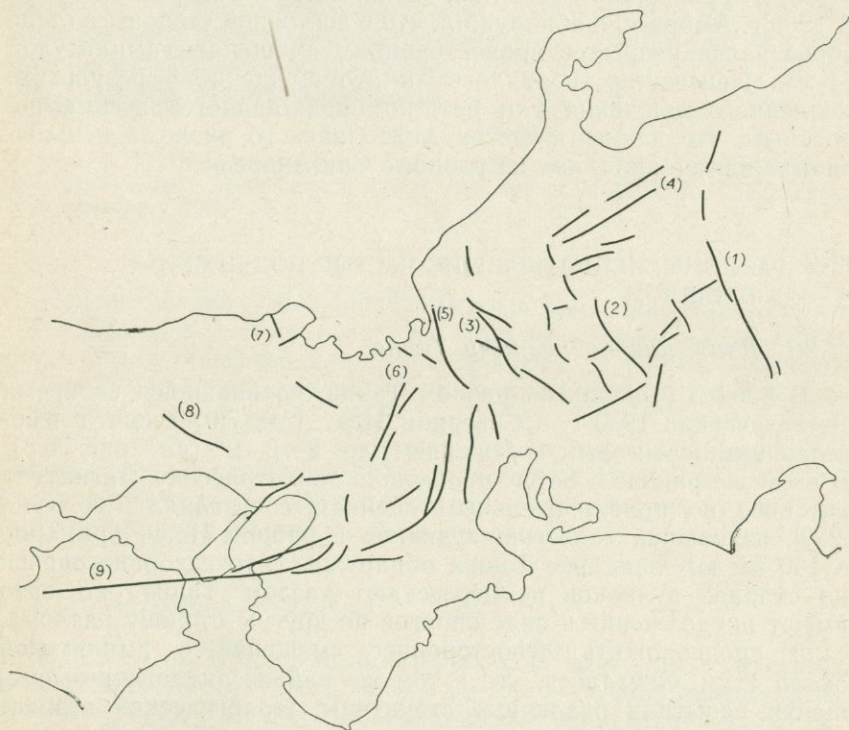


Рис. 11.2. Основные активные разломы Центральной Японии [234]. (1) — тектоническая линия Итоигава—Сидзуока, (2) — разлом Атера, (3) — разлом Неодани, (4) — разлом Атоцугава, (5) — разлом Янагасе, (6) — разлом Ханаоре, (7) — разлом Гомура, (8) — разлом Ямасаки, (9) — Срединная тектоническая линия.

## Основные активные разломы на территории Японии [234]

Местонахождение	Название	Тип	Длина, км	Класс
Преф. Акита	Рикую	Взброс	60	В
Преф. Ивате	Мориока	„	40	В
Преф. Фукусима	Бассейн р. Фукусима	„	50	В
	Бассейн р. Айдзу	„	40	В
Преф. Ниигата	Равнина Нагаока	„	30	В
Преф. Нагано	Бассейн р. Дзенкондзи	„	70	В
	Итоигава—Сидзуока	Левосторонний сдвиг	80	А
Преф. Сидзуока	Сев. Идзу	То же	30	А
Преф. Тояма и Гифу	Атоцугава	Правосторонний сдвиг	60	А
Преф. Гифу	Атера	Левосторонний сдвиг	70	А
	Долина р. Нео	То же	70	А
Преф. Айти	Фукодзу	Взброс	10	С
Преф. Киото	Танго	Левосторонний сдвиг	20	С
Преф. Хиого	Рокко	Взброс	50	В
	Ямасаки	Левосторонний сдвиг	50	А
Преф. Тоттори	Тоттори	Правосторонний сдвиг	15	С
Юго-зап. Япония	Срединная тектоническая линия	То же	800	А

разломам находится в согласии с широтным сжатием, преобладающим в земной коре этого района Японии ([171], см. § 8.2.2).

Данные по разломам Атера [423] и Атоцугава [232] указывают на то, что полная величина смещения достигает нескольких километров, а средние скорости движения оцениваются в несколько метров за 1000 лет. Имеется предположение, что землетрясения 1586 г. ( $M=7,9$ ) и 1858 г. ( $M=6,9$ ) в Центральной Японии могли быть вызваны движениями на разломе Атоцугава. Разлом Атера параллелен разлому Неодани, появившемуся при Нобийском землетрясении 1891 г. (см. § 3.2, 5.6.2), и проходит в 60 км к востоку от Неодани. Хотя не имеется никаких исторических свидетельств о движениях по разлому Атера, высказываются опасения, что движения на этом разломе могут привести к новому сильному землетрясению.

В настоящее время Срединная тектоническая линия и линия Итогава — Сидзуока, являющиеся наиболее примечательными тектоническими зонами Японии, по-видимому, считаются активными разломами [200]. Исторических данных о движениях центральной части Срединной тектонической линии, простирающейся более чем на 800 км и проходящей через район Сикоку и Кии, не имеется. Если бы этот участок разлома начал двигаться, могло бы произойти землетрясение с магнитудой порядка 8. В работе [170] рассматривается неотектоника Срединной тектонической линии в связи с микросейсмичностью юго-западной части Японии (см. § 8.2.2).

Мацуда [234] произвел классификацию основных активных разломов Японии согласно скорости движения по разлому. При скорости 1—10 м за 1000 лет разлом относится к классу А. Для классов В и С скорости равны соответственно 0,1—1 м и <0,1 м за 1000 лет. Строго говоря, скорость движений, полученная из геоморфологических данных, ничего не говорит о величине смещения при следующей подвижке по разлому, если она вообще произойдет. Однако кажется вполне вероятным, что на разломах с высокими скоростями движения могут возникать смещения с большой амплитудой. В табл. 11.1 представлена классификация основных активных разломов Японии согласно работе Мацуды [234].

Интересно отметить, что разлом на оконечности п-ова Идзу, отмеченный как активный (см. рис. 5.4), при землетрясении 9 мая 1974 г. на п-ове Идзу ( $M=6,9$ ;  $34,6^\circ$  с. ш.,  $138,8^\circ$  в. д.) испытал смещение величиной 45 см.

### 11.3. СОВРЕМЕННОЕ СКЛАДКООБРАЗОВАНИЕ

Имеются места, где все еще продолжается складкообразование в масштабах геологического времени, например на

северо-востоке о. Хонсю (Япония). С помощью повторного нивелирования по линии, перпендикулярной к оси складки, обнаружено [250], что за 1958—1967 гг. ряд реперов испытал поднятие примерно на 1 см.

В Японии в областях современной складчатости иногда происходят умеренно сильные землетрясения (магнитуда 5—6).

#### 11.4. БЕРЕГОВЫЕ ТЕРРАСЫ

Во время землетрясения в Канто 1923 г. ( $M=7,9$ ) оконечности п-овов Босо и Миура поднялись на 1—2 м (см. § 3.3 и рис. 5.45). Имеются также исторические документы, свидетельствующие о поднятии п-ова Босо при землетрясении 1703 г. ( $M=8,2$ ), происшедшем под дном недалеко от тихоокеанского побережья Японии. Положение эпицентра показано на рис. 5.31.

По-видимому, поднятие величиной около метра на мысе Омаэ (см. рис. 5.63) было вызвано землетрясениями 1707 и 1854 гг. (оба с магнитудой 8,4), происшедшими в море у тихоокеанского берега Центральной Японии (см. рис. 5.31). Там же наблюдалось поднятие порядка 10 см в результате Тонанкайского землетрясения 1944 г. ( $M=8,0$ ; см. рис. 5.31 и § 5.7.2). Хорошо известно, что оконечность п-ова Кий и мыс Мурото на о. Сикоку испытывали резкие поднятия при сильных землетрясениях, происходивших в море недалеко от их берегов, например при Нанкайском землетрясении 1946 г. ( $M=8,1$ ; см. § 5.6.11, рис. 5.31 и 5.33). Такие сопровождающие землетрясения поднятия поверхности в районе мысов можно в первом приближении объяснить упругой отдачей, как это изображено на рис. 8.2. В истории Японии мы часто встречаем сообщения о поднятиях земной поверхности в области упомянутых мысов при сильных землетрясениях.

Такие поднятия земной поверхности известны с доисторических времен, так как они оставляли следы в виде береговых террас. Геоморфологические исследования (например, [424, 425, 508]) позволяют сделать следующие выводы:

1) п-ов Босо за последние 6000 лет испытал 55 сильных землетрясений, и 80% общей величины поднятия было снято несейсмическим опусканием;

2) у берегов о. Сикоку за последние  $10^5$  лет сильные землетрясения должны были происходить через каждые 100 лет.

Эти исследования не имеют непосредственного отношения к проблеме предсказания землетрясений, но они важны для изучения механизма землетрясений вблизи тихоокеанского побережья Японии.

## ДРУГИЕ ДАННЫЕ, ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ДЛЯ ПРОГНОЗА ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

### 12.1. СИЛА ТЯЖЕСТИ

Сила тяжести на Земле складывается из притяжения ее массы и центробежной силы, обусловленной вращением Земли. Трудно ожидать каких-либо значительных вариаций силы тяжести, поскольку крупномасштабные увеличения или уменьшения плотности внутри Земли маловероятны, если не считать таких перемещений масс, как движения магмы в вулканах. Поэтому до последнего времени пренебрегали измерениями вариаций силы тяжести для целей прогноза землетрясений.

Значение силы тяжести в пункте наблюдений меняется с изменением высоты пункта. Поэтому движения земной коры могут вызвать изменения силы тяжести, в которые легко ввести поправку, учитывая измеренное изменение высоты. Такая процедура введения поправки называется редукцией в свободном воздухе.

Ускорение силы тяжести на поверхности земли равно 980 гал ( $\text{см}/\text{с}^2$ ). Современным гравиметром можно измерить изменение в 0,01 мгал, составляющее  $10^{-8}$  от абсолютного значения силы тяжести. Однако на практике из-за влияния различных факторов точность гравиметрической съемки снижается до  $\pm 0,02$  мгал.

Институт географических исследований (GSI) и Сейсмологический институт (ERI) проводили гравиметрические съемки в районе Южного Канто, включая п-ова Босо и Миура (см. рис. 5.29). В работе [146] приводятся данные о вековом увеличении силы тяжести примерно до 0,02 мгал/год у оконечностей этих полуостровов. На линейное изменение, по-видимому, наложено периодическое изменение с периодом около 3 лет. Амплитуда последнего на западном берегу п-ова Миура достигает 0,04 мгал.

Причина столь больших изменений силы тяжести не ясна. Сравнение значений на станции Токио, являющейся опорной при съемках, производимых ERI, со значениями в Какиоке (гравиметрический пункт в 60 км севернее Токио) позволило прийти к выводу о существовании некоторой корреляции между флуктуациями силы тяжести и уровнем подземных вод, измеряемым в Токио в глубокой скважине, хотя для более уверен-

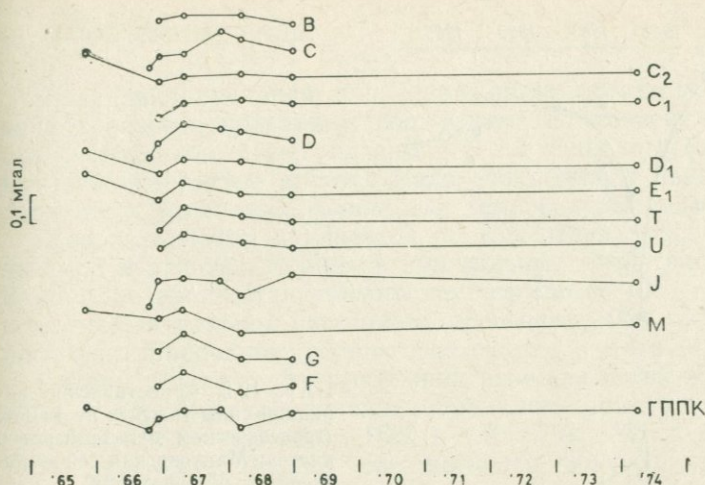


Рис. 12.1. Вариации силы тяжести в пунктах наблюдения в окрестностях горы Минаками (район Мацусиро). Местоположение пунктов показано на рис. 5.56 (И. Цубокава и И. Хагивара, частное сообщение, 1974).

ного установления такой корреляции, безусловно, требуются дополнительные наблюдения.

Современные гравиметры являются пружинными приборами. Поэтому при гравиметрических съемках все время нужно проводить очень тщательную калибровку постоянной пружины. Это затруднение устранится, как только завершатся работы по созданию приборов для абсолютных измерений силы тяжести, которые ведутся во Франции, США, Японии и других странах.

Одним из наиболее ярких примеров вариаций силы тяжести, обусловленных сейсмической активностью, являются наблюдения во время Мацусирского роя землетрясений 1965—1967 гг. (И. Цубокава и И. Хагивара, частное сообщение, 1974, см. § 5.6.14). Вариации силы тяжести, измеренные ERI на ряде гравиметрических пунктов, установленных вокруг горы Минаками, центра сейсмической активности (см. рис. 5.55 и 5.56), показаны на рис. 12.1, а расположение этих пунктов — на рис. 5.56. На типичном гравиметрическом пункте первого класса Мацусирской сейсмологической обсерватории значение силы тяжести с ноября 1965 г. по декабрь 1966 г. уменьшилось почти на 0,1 мгал.

Кроме работ ERI, гравиметрические съемки в районе Мацусиро проводил также GSI, но эти съемки покрывали гораздо большую территорию с меньшей плотностью гравиметрических пунктов. В работе Кисслингера [217] дается совместный анализ

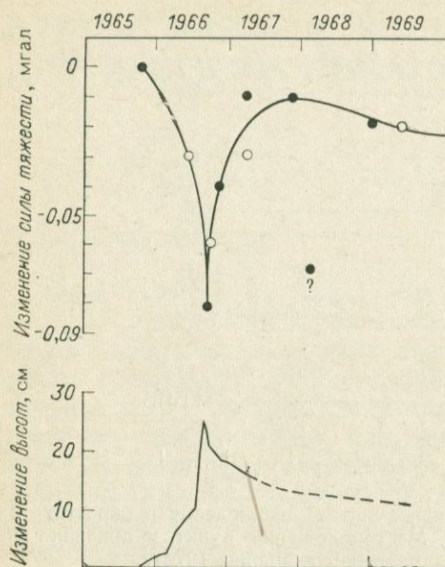


Рис. 12.2. Сопоставление вариаций силы тяжести на ГПК (геодезическом пункте первого класса; Мацусирская сейсмологическая обсерватория) с поднятиями земной поверхности. Черными и светлыми кружками обозначены измерения соответственно ERI и GSI [217].

этих двух серий гравиметрических измерений и представлена обширная картина вариаций силы тяжести в районе Мацусиро. Выявлено, что после упомянутого уменьшения значение силы тяжести в течение определенного отрезка времени, по-видимому, быстро росло, а затем наступил период плавного возвращения к уровню, существовавшему до вспышки сейсмической активности (рис. 12.2).

Кисслингер [217] высказал предположение, что первое уменьшение силы тяжести в период подъема земной поверхности, скорость которого не очень сильно отличалась от скорости изменения силы тяжести, редуцированной в свободном воздухе (с учетом только изменения высоты точки наблюдения), можно объяснить уменьшением плотности в земной коре непосредственно под гравиметрическим пунктом, что в свою очередь может объясняться возникновением дилатансии.

Необычайно резкое увеличение силы тяжести после первоначального уменьшения нельзя объяснить одним лишь увеличением плотности из-за закрытия трещин.

Интерпретация Мацусирской вспышки активности дана также в работе Нура [293] на основе теории дилатансии. Независимо от него Фудзита и Фудзий [95], которые анализировали гравиметрические данные GSI, выдвинули в качестве возможного объяснения возникновение дилатансии.

## 12.2. ПОДЗЕМНЫЕ ВОДЫ

Несколько преданий о предвещающих землетрясение изменениях режима подземных вод, взятых из японских исторических источников, были описаны в § 2.3. Однако в современной научной литературе имеется мало сообщений о надежно установленных вариациях уровня или температуры подземных вод.

Довольно часто сообщается об изменениях уровня подземных вод и дебита источников при сильных землетрясениях. Например, во время Нанкайского землетрясения 1946 г. ( $M=8,1$ ), хотя эпицентрального расстояние превышало 250 км, прекратилось фонтанирование горячего источника в Дого (г. Мацуяма, о. Сикоку, Япония). Этот источник известен своей долгой историей, и подобные же явления отмечались при сильных землетрясениях 684 г. ( $M=8,4$ ), 1605 г. ( $M=7,9$ ), 1707 г. ( $M=8,4$ ) и 1854 г. ( $M=8,4$ ). Однако через несколько месяцев деятельность источника всегда восстанавливалась. Автор настоящей книги [332] изучал изменения уровня воды и температуры этого горячего источника и пришел к выводу, что происходило внезапное закрытие приповерхностных путей подземных вод, причиной которого, вероятно, было сильное движение почвы при землетрясении. Однако глубокие горизонты, откуда поступает вода горячего источника, остались незатронутыми. Большинство вариаций режима подземных вод и источников при землетрясениях относится к этому типу, и поэтому никаких прогностических эффектов обычно не наблюдается.

В одной из недавних работ [475] исследовались изменения уровня воды в 95 колодцах и скважинах в областях Токай и Канто (Япония) во время землетрясения с магнитудой 6,9, происшедшего 9 мая 1974 г. в море недалеко от берега п-ова Идзу. Результаты позволяют предполагать, что повышение и понижение уровня подземных вод тесно связано с тектоническими деформациями, возникшими при землетрясении.

В статье Садовского и др. [372] приводятся данные об изменениях уровня и температуры воды перед Пржевальским землетрясением в июне 1970 г. ( $42,5^\circ$  с. ш.,  $78,4^\circ$  в. д.) (рис. 12.3). Эпицентрального расстояние равно 30 км.

Гордон [113] сообщает об аномальных изменениях уровня воды в колодце на расстоянии 110 км от эпицентра, наблюдавшихся за полтора часа до Мекерингского землетрясения 1968 г. ( $M=6,9$ ; см. § 5.6.20). Уровень воды тогда повысился на 2,9 см.

Джонсон и Ковач [185] регистрировали положение уровня воды в нескольких скважинах, пробуренных вдоль разлома Сан-Андреас в районе Холлистера. Глубина самой глубокой скважины равна 152 м. Они наблюдали сильную аномалию уровня

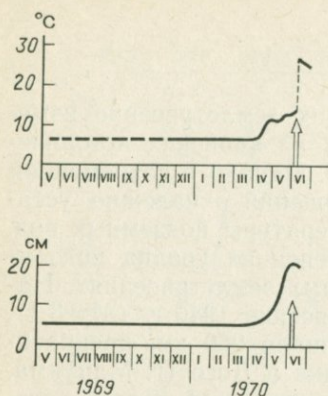


Рис. 12.3. Изменения температуры и уровня подземных вод перед Пржевальским землетрясением, происшедшим в июне 1970 г. [372].

воды, начавшуюся 7 сентября 1972 г. Поскольку по прошествии 296 дней уровень восстановился, то, основываясь на предположении, что аномалия появилась из-за возникновения дилатации (см. гл. 14), на июль 1974 г. было предсказано землетрясение с магнитудой 5,8, но оно не произошло. Однако из данных об уровне воды были обнаружены изменения порового давления, связанные с процессом крипа на разломе [186]. Ковач и др. [221] сообщали о кратковременных вариациях уровня воды перед землетрясением с магнитудой около 5.

Ку [63] пишет, что наблюдения за уровнем подземных вод являются одним из важных средств предсказания землетрясений в Китае. В районе Хуншаня, близ Синтая (провинция Хэбэй), имеется 175 колодцев и скважин глубиной от 50 до 150 м. Изменения уровня воды автоматически регистрируются в восьми глубоких скважинах (порядка 150 м). Добровольцы из крестьян измеряют уровень воды в неглубоких колодцах. По этим данным китайские сейсмологи пытаются вывести критерии для предсказания магнитуды и времени возникновения землетрясения. Предварительные результаты таковы: чем длиннее период аномального изменения уровня воды, тем сильнее подготавливаемое землетрясение. Кажется также вероятным, что, чем больше площадь аномальных вариаций, тем сильнее будет землетрясение.

Перед Синтайским землетрясением 1966 г. ( $M=6,8$ ) повысился уровень воды на территории в форме эллипса, большая ось которого совпадает с тектонической линией простираения ССВ, приблизительно параллельной линии, соединяющей Ханьдань с Шицзячжун через Синтай [223]. Длины большой и малой осей равны соответственно 150 и 50 км. Вне этого эллипса наблюдалось понижение уровня воды.

ТАБЛИЦА 12.1

Времена предвестников для вариаций уровня подземных вод по наблюдениям  
в Китае [223]

Землетрясение	Год	M	Координаты		Время предвестника
			с. ш.	в. д.	
Граница между уездом Хань-фын провинции Хубэй и уездом Цзиньцзян провинции Сычуань	1856	6,0			Несколько дней
Хайюань, провинция Нинся	1920	8,5	36,5°	105,7°	3 дня
Тайчжун, Синьчжу, провинция Тайвань	1935	7,0	24,5°	120,8°	14 ч
Ханьлунцзи, провинция Тайвань	1935	6,0	24,3°	121,3°	14 ч
Луаньюань, провинция Хубэй	1945	6,3	39,7°	118,7°	1 день
Хандин, провинция Сычуань	1955	7,5	30,0°	101,8°	2 дня
Динчжун, провинция Юньнань	1961	5,8			1 день
Синтай, провинция Хэбэй	1966	6,8	37,2°	114,8°	1—2 и 5—10 дней
Цзунхай, провинция Юньнань	1970	7,7	24,2°	102,7°	От нескольких до более 10 дней
Сидзи, провинция Нинся	1970	5,5 <sup>а)</sup>	36,0°	105,8°	1—5 дней
Донань, провинция Цзинхай	1971	6,3	35,5°	98,1°	Более 10 дней

а) В работе [88] сообщается, что магнитуда этого землетрясения 5,7 (см. § 9.1.4).

Куо и др. составили таблицу времен предвестников перед 11 землетрясениями [223] (табл. 12.1). Автор полагает, что определенной корреляции между временем предвестников и магнитудой землетрясений не наблюдается.

Как отмечал Ку [63], на уровень воды оказывают влияние погода и искусственное орошение, так что вариации уровня воды не всегда можно интерпретировать однозначно. Тем не менее в будущем стоит проводить измерения уровня воды для прогноза землетрясений, особенно в глубоких скважинах.

### 12.3. ДЕБИТ НЕФТЯНЫХ СКВАЖИН

Известны аномальные флуктуации дебита нефти из скважин в Суэцком заливе, имевшие место на эпицентральной расстоянии 100 км [25]. Времена предвестников равнялись 330, 120 и 150 дней для землетрясений с магнитудами соответственно 6,1; 4,8 и 5,1. Предполагается, что эти флуктуации потока нефти могут иметь отношение к деформациям земной коры перед землетрясениями.

### 12.4. СОДЕРЖАНИЕ РАДОНА

Сообщалось, что в период 1961—1965 гг. содержание радона, радиоактивного газа с периодом полураспада 3,5 сут, в мине-

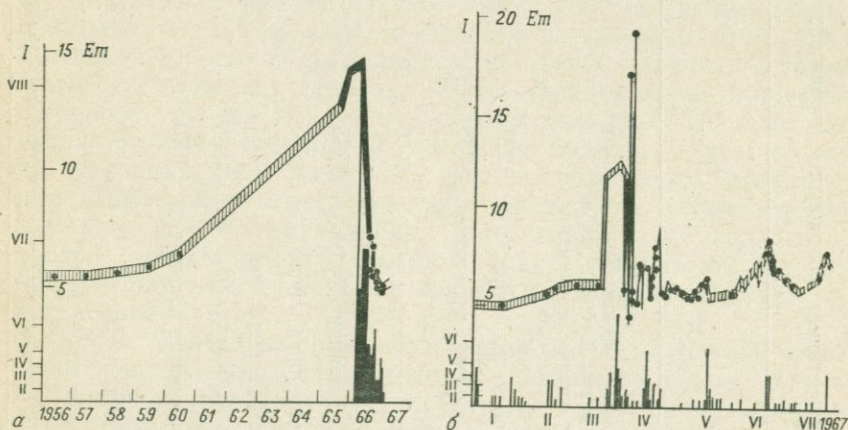


Рис. 12.4. Изменения эмиссии радона (Em) в минеральной воде из глубокой скважины в Ташкенте при главном толчке (а) и афтершоках (б) землетрясения 1966 г. Содержание радона измеряется в эманах (кюри/литр), а балльность толчков  $I$  — по модифицированной шкале Меркалли [372].

ральных водах Ташкентского бассейна повысилось от 5 до 15 эман (Ки/л) [372, 459]. Повышенная концентрация сохранялась примерно 6 месяцев — вплоть до момента главного толчка Ташкентских землетрясений в апреле 1966 г. После толчка содержание радона сильно уменьшилось.

Наблюдается сходство между характером временного хода содержания радона (рис. 12.4, а) и подъема земной поверхности при Ниигатском землетрясении 1964 г. (см. рис. 5.64). Если перед землетрясением возникает дилатансия и вода просачивается сквозь вновь образовавшиеся трещины, то она будет вымывать различные вещества из свежих стенок трещин. Из-за короткого периода полураспада радона его очень удобно использовать для прослеживания подземных вод, поступающих через новые трещины (в Ташкенте минеральная вода поступает из горизонтов, залегающих на глубине более нескольких сотен метров).

Наблюдения афтершоков в Ташкенте выявили ряд прогнозистических повышений содержания радона, показанных на графике рис. 12.4, б; некоторые из них были использованы Шольцем и др. [394] при построении их теории прогноза землетрясений. Наблюдения за содержанием радона проводились также в Фергане (40,4° с. ш., 71,3° в. д.), где при местном землетрясении 1969 г. был также обнаружен аналогичный предвестник (Т. Хагивара, частное сообщение, 1974).

## ЛАБОРАТОРНЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ

Исследования по прогнозу землетрясений большей частью развивались на основе анализа многолетних наблюдений. Такой чисто эмпирический подход был единственным, ибо до недавнего времени не существовало правдоподобной модели механизма землетрясений. Поэтому почти не делалось попыток найти теоретическое обоснование физических основ эффектов-предвестников, описанных в предыдущих главах.

С начала 60-х годов некоторые исследователи начали проводить лабораторные эксперименты по моделированию землетрясений. Результатом явилось множество открытий, способных дать физическую основу для прогноза землетрясений. В лаборатории имеют дело с образцами пород ограниченных размеров, и поэтому следует помнить, что к природным явлениям в масштабе земной коры лабораторные результаты можно применять лишь с известными ограничениями. Тем не менее можно с уверенностью сказать, что лабораторные опыты помогают развитию исследований по предсказанию землетрясений и многое из того, что составляет физическую основу теории прогноза, можно получить из изучения «лабораторных землетрясений».

В статье Нура [294] дан подробный обзор применения лабораторных экспериментов к изучению реальной Земли.

### 13.1. ОПЫТЫ ПО РАЗРУШЕНИЮ ПОРОД

#### 13.1.1. Микротрещины и основной разрыв

Моги [252], вероятно, первым обратил внимание на важность образования микротрещин в хрупком веществе под напряжением. Он производил опыты на отполированных образцах пород прямоугольной формы. К образцу прикладывается одноосное сжатие, пока не произойдет разрушение. Слабые толчки при образовании микротрещин регистрируются с помощью небольшого микрофона, прикрепляемого к образцу. Известно, что микротрещины начинают возникать тогда, когда величина деформации превысит предел упругой деформации и наступает

состояние так называемого пластического деформирования. При аналогичных исследованиях металлов «толчки» такого рода часто называют акустической эмиссией.

Из опытов Моги следует один очень важный вывод. При постоянной скорости нарастания напряжения обнаружено, что в неоднородном образце перед основным разрывом происходит много микротолчков. Однако, если образец весьма однороден, перед разрушением микротолчки совсем не наблюдаются. В очень неоднородном образце происходит много микротолчков без образования заметного разрыва.

Результаты Моги послужили основой для интерпретации соотношения между форшоками и основным толчком в случае реальных землетрясений (см. § 8.3.2). Как указано в § 8.4.7, для понимания характера сейсмической активности определенного района совершенно необходимо учитывать свойства земной коры в этом районе.

### *13.1.2. Опыты со всесторонним давлением*

Опыты Моги были продолжены Брейсом [42] и его сотрудниками (например, [389, 390]) при таких давлениях, которые должны существовать в земной коре. В образце гранита при напряжениях свыше 95% от критического наблюдается резкое увеличение числа микротрещин (рис. 13.1).

Было также найдено [56], что растрескавшаяся порода в условиях высокого всестороннего давления способна выдерживать большие напряжения. В противоположность хрупкому разрушению скольжение с трением, по-видимому, обеспечивает еще один механизм землетрясений, характеризующийся скольжением с останковками. То обстоятельство, что многие сейсмические разрывы, возникающие во время землетрясений, через короткое время, по-видимому, оказываются запертыми, может иметь отношение к подобному скольжению с трением.

В глубоких частях земной коры хрупкое разрушение, видимо, не происходит, так как породы, слагающие земную кору, под действием высоких давлений и температур теряют хрупкость и становятся пластичными. Несмотря на это, землетрясения, как известно, происходят даже в мантии, на глубине в несколько сотен километров. Причина, по которой землетрясения могут происходить на таких больших глубинах, пока неясны, хотя иногда в качестве ее выдвигают механизм внезапного фазового перехода от твердого состояния к жидкому или от одного кристаллического состояния к другому (например, [85]). Кроме того, замечено [325], что при высоких температурах и давлениях хрупкость, например, серпентина в результате обезвоживания восстанавливается.

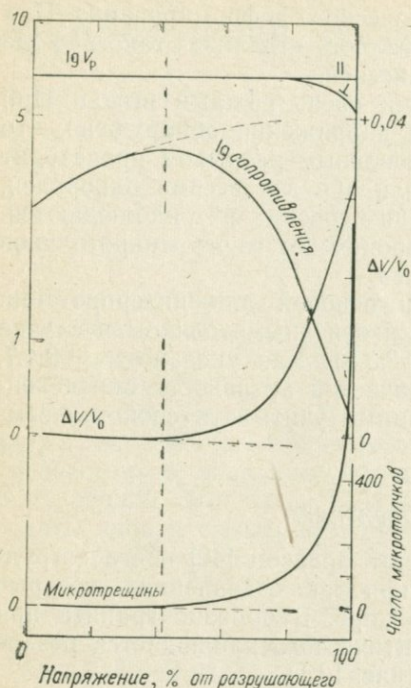


Рис. 13.1. Изменения физических свойств гранита в зависимости от величины сжимающего напряжения. Образец вестерлейского гранита подвергался всестороннему сжатию в несколько килобар [42]. Данные по микрострессированию взяты из [389].

Как известно, породы, слагающие земную кору, чрезвычайно пористы. Поры часто бывают заполнены водой. Разрушающее срезающее напряжение при высоком давлении равно

$$\tau = \tau_0 + \mu\sigma, \quad (13.1)$$

где  $\sigma$  — нормальное напряжение в плоскости разрыва,  $\mu$  — коэффициент трения и  $\tau_0$  — разрушающее срезающее напряжение при нулевом давлении. Из (13.1) видно, что сила трения  $\mu\sigma$  увеличивает напряжение, при котором происходит разрыв. Хуберт и Руби показали [166], что уравнение (13.1) можно записать в виде

$$\tau = \tau_0 + \mu(\sigma - P), \quad (13.2)$$

где  $P$  — давление в порах, действующее в плоскости разрыва. Если  $\sigma = P$ , то предел прочности на сдвиг будет таким же, как при нулевом давлении.

Таким образом, показано, что хрупкое разрушение может происходить даже в глубоких частях земной коры, если только поровое давление будет там достаточно большим. Непредвиденная вспышка сейсмической активности в Денвере (штат Ко-

лорадо, США) начиная с 1962 г. была связана с закачиванием жидких отходов в глубокую скважину, и описанный выше механизм вполне может объяснить это явление ([83, 312], см. § 16.1).

### 13.1.3. Дальнейшие опыты по разрушению образцов пород

Могги [258] произвел эксперимент по разрушению образца гранита при изгибе. С помощью приемников, прикрепляемых к образцу, места образования микротрещин определялись способом, аналогичным определению гипоцентров естественных землетрясений. Было обнаружено, что при увеличении напряжения микротрещины образуются почти равномерно по всему образцу. При дальнейшем увеличении напряжения образование микротрещин сосредоточивается в определенной части образца, в то время как в других его частях число образующихся микротрещин уменьшается. Наконец в той части, где происходило усиленное образование микротрещин, происходит главный разрыв. В эксперименте, произведенном на образце гранита при одноосном сжатии, Шольц [390] также обнаружил аналогичную тенденцию в образовании микротрещин.

Итак, микротрещины, которые образуются довольно равномерно на каком-то участке под действием напряжения, перед главным разрывом начинают концентрироваться в том месте, где он произойдет. Это имеет важное значение для понимания закономерностей возникновения форшоков и главного толчка (при условии что опыты хорошо имитируют естественные землетрясения).

Когда в опытах по разрушению пород исследовали значение  $b$  наклона графика повторяемости для микротолчков, обнаружилось заметное сходство между экспериментальными результатами и землетрясениями (см. § 8.3.4).

## 13.2. ФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПОРОД ПРИ БОЛЬШИХ НАПРЯЖЕНИЯХ

Физические свойства пород в состоянии, непосредственно предшествующем разрыву, представляют особый интерес в связи с предвестниками землетрясений, которые можно обнаружить различными геофизическими методами.

### 13.2.1. Дилатансия

Описанное выше образование микротрещин непременно влечет за собой увеличение объема, как видно из кривой  $\Delta V/V_0$ , приведенной на рис. 13.1. Такое увеличение объема было

названо дилатансией [330]. Особенно большое внимание уделяли этому явлению Брейс и др. [47]. Выяснено, что увеличение объема вызывается образованием микротрещин, ориентированных параллельно оси наибольшего сжатия и раскрывающихся в направлении наименьшего сжатия. Как видно из рис. 13.1, возникновение дилатансии, по-видимому, начинается при напряжении, равном примерно половине величины разрушающего напряжения.

По всей вероятности, дилатансия играет решающую роль в возникновении эффектов-предвестников различной природы (см. следующую главу).

### 13.2.2. Вариации скоростей упругих волн

В связи с изменениями скоростей сейсмических волн, играющими важную роль в прогнозе землетрясений (см. гл. 9), важно исследовать, как меняются скорости упругих волн в материале под напряжением [236]. Типичным примером такого рода экспериментов является измерение скоростей  $P$ -волн параллельно и перпендикулярно направлению сжимающей силы, приложенной к образцу породы.

При небольших сжатиях наблюдается увеличение скорости волн в обоих направлениях, объясняемое закрытием пор и трещин в образце. При всестороннем давлении 1 кбар и выше скорость в направлении сжатия с увеличением сжимающей силы не изменяется или уменьшается на несколько процентов перед разрывом. С другой стороны, в направлении, перпендикулярном сжатию, наблюдается резкое уменьшение скорости при нагрузке, равной примерно половине или несколько более от разрушающей. Согласно [236], уменьшение скорости в образце гранита при разрушении доходит до 38 и 20% при всестороннем сжатии 400 бар и 3,5 кбар (такие давления существуют в земной коре на глубинах соответственно 1 и 10 км).

Гупта [125, 126] проводил такие же эксперименты при трехосном сжатии. Он нашел, что с приближением образца к разрушению изменение величины  $V_s$  существенно меньше, чем  $V_p$ . Он также обнаружил значительное уменьшение  $V_p/V_s$  в направлении наименьшего сжимающего напряжения, достигающее 10—20%. Уменьшение в направлении промежуточного напряжения составляет всего несколько процентов, а в направлении наибольшего напряжения едва ли можно вообще заметить какие-либо изменения.

Результаты Гупты могут способствовать выяснению вопроса о том, почему не всегда наблюдается уменьшение  $V_p$  и  $V_p/V_s$ . В работе [477] утверждается, что изменения  $V_p$  и  $V_p/V_s$  наблюдаются при распространении сейсмических волн в направлении,

перпендикулярном направлению трещин. В большинстве случаев предполагается, что трещины ориентированы параллельно земной поверхности. Поэтому волны, проходящие из глубокого источника, будут чувствительнее к наличию трещин, чем если они поступают из источника, находящегося вблизи поверхности. Теоретическое изучение влияния ориентации трещин [19] выявило аналогичную анизотропию отношения  $V_p/V_s$ .

### 13.2.3. Вариации электросопротивления

Брейс и Орендж [43—45] измеряли электросопротивление пород, пропитанных водой. При небольших давлениях наблюдается увеличение сопротивления с ростом давления, и это можно объяснить закрытием пор. Когда сжимающее напряжение превосходит определенное значение, сопротивление начинает очень быстро уменьшаться, как видно из рис. 13.1. Это явление, вероятно, связано с формированием новых проводящих путей, возникающих вместе с вновь образовавшимися микротрещинами.

Исследования, кратко описанные в настоящей главе, по-видимому, составят физическую основу для применения к прогнозированию различных эффектов, наблюдающихся перед землетрясениями. Дальнейшие экспериментальные работы в этом направлении представляются безусловно нужными и интересными, особенно при тех давлениях и температурах, которые существуют в земной коре.

## МОДЕЛИ ДИЛАТАНСИИ

Сейчас многие сейсмологи признают реальность уменьшения отношения  $V_p/V_s$  перед землетрясениями (см. гл. 9). В то же время с помощью лабораторных экспериментов достигнуты определенные успехи в понимании причин изменения  $V_p/V_s$  перед моментом разрыва (см. § 13.2) — его объясняют образованием трещин или развитием дилатансии под действием сжимающих напряжений.

Опираясь на эти исследования, Нур [292] и Аггарвал и др. [2] выдвинули теорию, которая, по их мнению, может объяснить изменения скоростей сейсмических волн перед землетрясениями. Она основана на возникновении дилатансии в горных породах, насыщенных водой.

## 14.1. ВЛАЖНАЯ МОДЕЛЬ

Шольц и др. [394] предложили более разработанную теорию, основанную на дилатансии в водонасыщенных породах, и попытались объяснить не только вариации  $V_p/V_s$  или  $V_p$ , но и другие предвестники — такие, как поднятие земной поверхности, уменьшение электросопротивления, увеличение эмиссии радона и т. п. Основные черты теории дилатансии в водонасыщенных породах можно резюмировать следующим образом.

Если в земной коре действуют тектонические напряжения, создаваемые движением плит или какими-либо другими причинами, то в горных породах, слагающих земную кору, когда напряжения превысят определенный предел, может возникать дилатансия. В таком случае образуется множество микротрещин, вероятно ориентированных параллельно оси наибольшего сжатия.

Известно, что скорость распространения продольных волн в такой высокопористой среде меньше, чем в среде, не содержащей пор [297]. С другой стороны, влияние пор на распространение поперечных волн оказывается ничтожно малым. Таким образом, становится понятно, почему уменьшение отношения  $V_p/V_s$  происходит при напряжениях в земной коре, меньших, чем

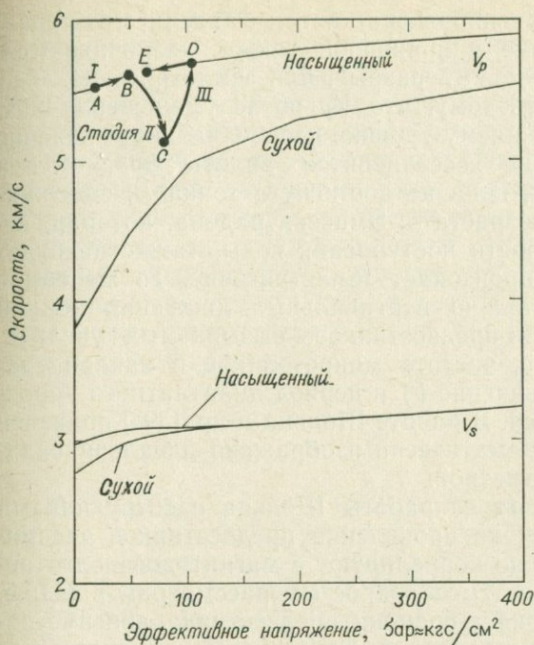


Рис. 14.1. Зависимость скоростей сейсмических волн  $V_p$  и  $V_s$  от эффективного всестороннего давления для влажного и сухого вестерлейского гранита (остальные обозначения см. в тексте) [394, рис. 1].

те, при которых образуется главный разрыв, но достаточно больших для возникновения дилатансии.

Шольц и др. [394] показали, как изменяются  $V_p$  и  $V_s$  во влажных и сухих породах с увеличением эффективного напряжения, т. е. напряжения, равного разности между полным напряжением и поровым давлением (рис. 14.1). На I стадии вдоль участка  $AB$  кривой  $V_p$  для насыщенных пород значение  $V_p$  слегка увеличивается из-за накопления тектонических напряжений. При образовании микротрещин на II стадии ( $BC$ )  $V_p$  уменьшается, так как порода уже не насыщена водой.

В то же время вода, проникающая во вновь образующиеся поры из уже существующих, вызывает уменьшение порового давления — и отсюда так называемое упрочнение при дилатансии, которое препятствует дальнейшему образованию микротрещин. По мере поступления воды, которая не дает образоваться новым трещинам,  $V_p$  увеличивается вдоль участка  $CD$ , обозначенного как стадия III.

По достижении точки  $D$  порода снова насыщена и  $V_p$  достигает своего прежнего нормального уровня. При изменении

$V_p$  вдоль  $DE$  соответственно возрастает и давление в порах. Поскольку тектонические напряжения также увеличиваются, в точке  $E$  происходит главный разрыв, или землетрясение.

В противоположность тому, что  $V_p$  после уменьшения возвращается к своему прежнему уровню, первоначальное значение электросопротивления не восстановится вплоть до момента землетрясения, так как, пока не достигнута точка  $E$ , содержание воды будет даже возрастать. Эмиссия радона, которая, вероятно, зависит от скорости поступления воды, также не будет уменьшаться, пока не произойдет землетрясение. То же самое можно сказать относительно вертикальных движений земной поверхности и наклонов-предвестников, вызываемых увеличением объема. Напротив, частота микротолчков и наклон графика повторяемости (значение  $b$ ) в период дилатантного упрочнения будут уменьшаться. В работе Шольца и др. [394] приведен рисунок, на котором схематически изображено идеализированное поведение этих параметров.

Другой важный вывод из работы Шольца с сотрудниками состоит в том, что времена проявления предвестников рассматриваемых параметров тесно коррелируют с магнитудой подготавливаемого землетрясения. Этот вопрос мы рассмотрим в § 15.5. Оказывается, что логарифм времени предвестника линейно зависит от магнитуды землетрясения. Такая же связь отмечается для предвестника  $V_p/V_s$  [398, 480], для наклона  $b$  графика повторяемости [495], наклонов почвы [188] и деформаций земной коры [453, 454]. Все эти предвестники будут рассмотрены в § 15.5.4.

Логарифм линейного размера области, охваченной движениями земной коры в период подготовки землетрясения, линейно зависит от магнитуды, как это видно из уравнения (5.11) [66]. То же самое относится и к площади афтершоков [464, 471]. Анализируя эти эмпирические факты совместно с приведенной выше зависимостью времени предвестника от магнитуды, мы приходим к выводу, что характерная длина  $L$  очаговой области, например длина разрыва, связана с временем предвестника  $\tau$  следующим образом:

$$\tau \sim L^2. \quad (14.1)$$

Соотношение (14.1) указывает на то, что рассматриваемый процесс является диффузионным и подчиняется дифференциальному уравнению

$$\partial P / \partial t = c \nabla^2 P, \quad (14.2)$$

где  $P$ ,  $t$ ,  $c$  — соответственно давление в порах, время и коэффициент диффузии.

Модель дилатансии многие авторы успешно рассматривали с привлечением диффузии воды во вновь образовавшиеся поры [18, 352, 394, 480]. Рикитаке [352] утверждал, что формулу Дамбары—Уцу, связывающую размеры очаговой области и магнитуду землетрясения, можно вывести из свойств дилатансии, рассмотренной выше. Однако в работах [18, 394, 480] сделан вывод, что зона, охваченная дилатансией, должна быть намного больше очаговой зоны, в противоположность точке зрения автора, что обе они имеют примерно одинаковые размеры. В этой связи интересно отметить, что, как установили Григгс и др. [119], величина изменения  $V_p/V_s$  может быть наблюдаемой, даже если аномальная область мала по сравнению с размерами группы сейсмографов.

## 14.2. СУХАЯ МОДЕЛЬ

Моги [261], Стьюарт [422] и Брэди [48] показали, что различные предвестники можно так же хорошо объяснить с помощью дилатансии без диффузии воды, как и с помощью влажной модели, рассмотренной выше.

Согласно Моги [261], первый и второй этапы, т. е. накопление деформаций при тектоническом процессе (этап I) и возникновение дилатансии (этап II) могут быть теми же, что и во влажной модели. Однако во время следующего этапа (этап III) дилатансия и связанное с нею напряжение концентрируются в очень ограниченной зоне — таким образом, уменьшение напряжений будет наблюдаться всюду, кроме этой ограниченной зоны, где в конце концов произойдет разрыв.

Эта модель на своем третьем этапе характеризуется очень сильно развитой дилатансией в непосредственной окрестности подготавливаемого разрыва [48, 261]. Дилатансия, возникающая в большой области вокруг очаговой зоны, из-за уменьшения напряжения на третьем этапе должна исчезнуть, и поэтому должно начаться закрытие трещин.

Весьма локализованной дилатансией, требуемой этой моделью, вероятно, можно объяснить изменение ориентации осей сжатия перед слабыми землетрясениями (см. 8.3.4). В этой модели временной ход отношения  $V_p/V_s$  и вертикальных движений в очаговой зоне и вне ее может быть несколько различным. Вне очаговой зоны электросопротивление будет увеличиваться на втором этапе, хотя на третьем из-за закрытия трещин оно будет уменьшаться.

Сухая модель, по-видимому, может объяснить то обстоятельство, что зона, охваченная дилатансией, шире очаговой зоны, как предполагается в работах [18, 394, 480]. Автору не совсем

ясно, каким образом с помощью сухой модели можно объяснить зависимость времени предвестника от магнитуды землетрясения, поскольку такой фактор, как диффузия воды, не выступает в сухой модели в явном виде.

В заключение можно сказать, что обе модели дилатансии представляют увлекательный предмет исследования, поскольку они дают физическую основу для интерпретации возможных предвестников землетрясений. Однако выдвинутые до сих пор объяснения не носят строго количественного характера (в особенности это касается сухой модели). Желательно развить теорию дилатансии до такой степени, чтобы стало возможным количественное рассмотрение.

## ТЕОРИЯ ПРЕДСКАЗАНИЯ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

Теперь мы можем систематизировать все рассмотренное в предыдущих главах и на основе результатов работ, правда еще далеко не завершенных, попытаться разработать теорию прогноза землетрясений.

Можно подумать, что преждевременно разрабатывать теорию прогноза землетрясений, не зная, предсказуемы ли они вообще, да еще не располагая достаточными для этого данными. Автор не оспаривает подобную точку зрения. Однако он полагает, что необходимо пытаться создать теорию прогноза землетрясений, насколько это возможно на современном этапе. Подобная теория, хотя и несовершенная, будет, без сомнения, стимулировать дальнейшие исследования в этом направлении и поможет наметить пути будущих работ по предсказанию землетрясений.

Автор полагает, что теория предсказания землетрясений должна быть построена на физической основе или на наблюдавшихся в действительности явлениях, имеющих физическую природу. Статистика, без сомнения, исключительно важна для развития сейсмологии. Типичными достижениями статистики землетрясений являются установление связи между частотой землетрясений и их магнитудой (см. § 8.2.1), выявление закона уменьшения числа афтершоков и т. п. Эти зависимости, несомненно, важны для понимания сущности землетрясений. Однако прогноз, основанный лишь на статистике, без учета современных физических условий в земной коре, иногда может приводить к ошибкам.

Среди неспециалистов все еще распространено убеждение в надежности статистического предсказания. В связи с этим рассмотрим кратко возможности и ограничения этого способа прогноза, прежде чем обратиться к методам, основанным на физических предвестниках.

### 15.1. СТАТИСТИЧЕСКИЙ ПРОГНОЗ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

Хороший обзор статистического метода прогноза землетрясений можно найти у Аки [4], Ломница [230, 231] и др. Особый

интерес представляет вопрос о периодичности землетрясений. Аки [4] отмечает следующие периодичности, предложенные различными исследователями: 42 мин, 1 сут, 14,8 сут, 29,6 сут, 6 мес, 1 год, 11 лет, 100 лет, 200 лет, 240 лет, 284 года и т. д. Если бы все эти периодичности действительно существовали, в результате получился бы почти белый шум. Шустер [395] предложил метод проверки значимости периодичности. Применение критерия Шустера к полученным периодичностям показало, что многие из них незначимы, хотя в ряде случаев отмечаются периоды, характеризующиеся стабильными амплитудой и фазой. Несмотря на это, использование периодичностей для прогноза землетрясений во многих отношениях представляется сомнительным.

Возможно, статистическое изучение сильных землетрясений позволяет с известной степенью приближения установить вероятный период повторяемости сильных землетрясений в определенном регионе. Такие работы по оценке сейсмической опасности несомненно полезны при планировании гражданского и промышленного строительства, сооружения плотин, определении расходов по страхованию при землетрясениях и т. п. Но они совершенно бесполезны для предсказания конкретного землетрясения, которое произойдет следующий раз в определенном районе, так как статистический анализ дает только среднее значение для рассмотренного ряда землетрясений.

#### *15.1.1. 69-летний период повторяемости сильных землетрясений в районе Токио*

Кавасуми [210] утверждал, что ему удалось установить 69-летнюю периодичность сильных землетрясений в районе Токио. Для этого он использовал статистику сильных землетрясений, ощущавшихся в г. Камакура, расположенном в 50 км к югу от Токио. Некогда Камакура был столицей Японии (около 1200 г.), так что сведения о прошлых землетрясениях там должны быть достаточно достоверными.

Кавасуми применил метод периодограмм к данным о землетрясениях, полученным в Камакуре. Он рассматривал землетрясения V и более баллов по шкале JMA (что соответствует VIII и более баллам по модифицированной шкале Меркалли). После проведения анализа Фурье он обнаружил довольно большую амплитуду для периода 69 лет. Используя критерий Шустера для оценки значимости результата, Кавасуми нашел, что вероятность 69-летнего периода составляет 99,94%. Он также вычислил стандартное отклонение периода и получил величину 13,2 года. Автор опасается, что Кавасуми использовал довольно сбивчивую терминологию: период в  $\pm 13,2$  года, середина ко-

того приходится на год с максимальной амплитудой 69-летней гармонической составляющей, называется «опасным периодом». Поскольку Кавасуми был председателем комитета по предотвращению сейсмической опасности в районе Токио, его идея о 69-летней повторяемости сильных землетрясений привлекла внимание как журналистов, так и местных властей, которые, будучи дилетантами в области сейсмологии, не сумели понять истинное значение статистических исследований Кавасуми. Прошло 50 лет после страшного землетрясения 1923 г. в Канто (см. § 3.3), и поэтому предостережение Кавасуми о возможности сильного землетрясения в ближайшем будущем стимулировало разработку местными властями некоторых мероприятий по защите от сейсмической опасности района Токио—Йокогама.

Независимо от того, корректны ли с научной точки зрения статистические исследования Кавасуми или нет, следует отдать ему должное в том, что его труд стимулировал разработку мероприятий по ослаблению последствий землетрясений в одном из самых густонаселенных районов земного шара.

Смысл предостережения Кавасуми для среднего жителя Токио состоит в следующем: «Раз после землетрясения 1923 г. в Канто прошло уже 50 лет, то сильное землетрясение должно произойти не позднее чем через 19 лет. «Опасный период», как это указывалось властями, начинается через 5 лет». Имеется категория людей, которые думают, что если в 1992 г. (=1923+69) не произойдет сильного землетрясения, то вообще больше не будет опасности его возникновения. Автор полагает, что подобное неверное толкование должно быть исправлено. Термин «опасный период», принятый Кавасуми, является неподходящим для широкого применения.

Аргументация Кавасуми вызывает ряд возражений. Прежде всего, Симадзаки [403, 407] указал на то, что выполненная Кавасуми проверка значимости недостаточно корректна. Критерий Шустера можно применить к произвольно выбранной гармонической компоненте, но не к определенной компоненте с максимумом энергии. В данном конкретном случае должен быть использован, например, критерий значимости, разработанный Фишером [90]. Симадзаки показал, что периодичность в 69 лет статистически незначима (на уровне 0,1).

Кавасуми также указывает, что есть случаи, когда землетрясения не имели места в пределах времени стандартного отклонения. По его мнению, это можно объяснить тем обстоятельством, что для этих периодов просто отсутствуют записи землетрясений из-за гражданских войн или иных социальных потрясений в ходе истории. Автор чувствует, что Кавасуми делал слишком много допущений.

Автор здесь считает уместным повторить, что даже если и получена некоторая периодичность по ряду прошлых землетрясений, то она действительна только в среднем для всего ряда. Совершенно иное дело — предсказать конкретное очередное землетрясение, которое произойдет в данном районе.

Усами и Хисамото [462, 463] методом, подобным методу Кавасуми, исследовали записи землетрясений в Токио и Киото.

Они обнаружили периодичность в 36 и 38 лет соответственно для Токио и Киото, но указали, что такая периодичность может быть получена даже в том случае, если землетрясения происходят случайно и стационарно.

Как и многие сейсмологи, автор полностью разделяет ту точку зрения, что сильные землетрясения имеют тенденцию к повторяемости, но он сильно сомневается, что при этом существует периодичность. Возможно, что период повторения сильных землетрясений, происходящих в районе тихоокеанского побережья Японии, может колебаться в широких пределах, хотя, по-видимому, было бы возможно установить этот период с точностью до десятилетий. Поэтому важно с приближением года среднего периода повторения землетрясений очень внимательно наблюдать за различными возможными предвестниками. Именно с таких позиций и разработана действующая в настоящее время в Японии программа прогноза землетрясений.

### 15.1.2. Статистические исследования землетрясений и ограничения этого метода

Что можно сказать о магнитуде и времени возникновения будущего землетрясения на основании длительных наблюдений за землетрясениями в определенном районе? В § 8.2.1 рассматривается формула Гутенберга—Рихтера, представленная уравнением (8.1). С другой стороны, известно, что между энергией  $E$ , высвобождаемой при землетрясении, и его магнитудой  $M$  существует следующее приближенное соотношение [130]:

$$\lg E = \alpha + \beta M, \quad (15.1)$$

где константы  $\alpha$  и  $\beta$  равны соответственно 11,8 и 1,5, если  $E$  измеряется в эргах.

Из (8.1) и (15.1) получается число землетрясений в зависимости от их энергии  $E$  [465, 470]:

$$N(E) = cE^{-b/\beta-1}, \quad (15.2)$$

где

$$c = 10^{a+ab/\beta} / (\beta \ln 10). \quad (15.3)$$

Отсюда можно получить выражение для числа землетрясений, энергия которых находится в пределах между  $E_S$  и  $E_T$  ( $E_T > E_S$ ):

$$N_0 = \int_{E_S}^{E_T} N(E) dE = \frac{c_0^2}{b} (E_S^{-b/\beta} - E_T^{-b/\beta}). \quad (15.4)$$

Если предположить, что  $E$  находится в пределах  $E_S \leq E \leq E_T$ , то вероятность  $p(E)$  того, что энергия землетрясения будет иметь значение между  $E$  и  $E + dE$ , равна

$$p(E) = \begin{cases} 0 & \text{при } E < E_S, \\ N(E)/N_0 & \text{при } E_S \leq E \leq E_T, \\ 0 & \text{при } E_T < E. \end{cases} \quad (15.5)$$

Таким образом, вероятность соотношения  $E_S \leq E \leq E_T$  равна

$$p(E) = \frac{b}{\beta} \frac{E^{-b/\beta-1}}{E_S^{-b/\beta} - E_T^{-b/\beta}}. \quad (15.6)$$

Отсюда мы получаем вероятность того, что магнитуда землетрясения будет находиться между  $M_1$  и  $M_2$ :

$$P(M_1, M_2) = \int_{E_1}^{E_2} p(E) dE, \quad (15.7)$$

где  $E_1$  и  $E_2$  — значения энергии, соответствующие  $M_1$  и  $M_2$ .

Выполнив интегрирование, получаем

$$P(M_1, M_2) = [(E_1/E_S)^{-\gamma} - (E_2/E_S)^{-\gamma}] / [1 - (E_T/E_S)^{-\gamma}], \quad (15.8)$$

где

$$\gamma = b/\beta. \quad (15.9)$$

Поскольку энергия деформации, которая может накопиться в определенном объеме земной коры, конечна, то  $E_T$  также не может быть бесконечным. Цубои [451] оценил значение  $E_T$  для земной коры в районе Японских о-вов, используя разность между накопленной и высвобожденной энергией. Значение накопленной энергии Цубои оценил в  $2,24 \cdot 10^{23}$  эрг/год. Определение  $P(M_1, M_2)$  согласно (15.8) выполнил Рикитаке [340, 341] для района Канто вблизи Токио в пределах  $34,5^\circ \leq \varphi \leq 36,5^\circ$  с. ш. и  $139^\circ \leq \lambda \leq 141^\circ$  в. д., где  $\varphi$  и  $\lambda$  — соответственно широта и долгота. Частота землетрясений, распределенных по их магнитудам, для района Канто за период 1926—1960 гг. приведена в табл. 15.1, а константы  $a$  и  $b$  в уравнении (8.1) определены методом наименьших квадратов и равны

$$a = 5,48; \quad b = 0,803. \quad (15.10)$$

Значение  $E_T$  для 1968 г. можно определить по методу Цубои [451]:

$$E_T = 9,2 \cdot 10^{23} \text{ эрг.} \quad (15.11)$$

ТАБЛИЦА 15.1

Частота землетрясений в районе Канто за период 1926—1960 гг., классифицированных по магнитуде [340]

$M$	Частота	$M$	Частота	$M$	Частота
5,0	37	5,7	3	6,4	0
5,1	21	5,8	5	6,5	2
5,2	25	5,9	5	6,6	1
5,3	20	6,0	5	6,7	0
5,4	9	6,1	6	6,8	0
5,5	13	6,2	3	6,9	0
5,6	16	6,3	3	7,0	2

С другой стороны,  $E_S$  определяется энергией, соответствующей магнитуде 5, так что имеем

$$E_S = 2,0 \cdot 10^{19} \text{ эрг.} \quad (15.12)$$

Теперь можно, используя (15.8) совместно с (15.9) — (15.12), определить вероятности возникновения землетрясений с магнитудой в интервале величиной, например, 0,5, как это показано в табл. 15.2.

ТАБЛИЦА 15.2

Вероятности возникновения землетрясения в районе Канто с магнитудой в пределах между  $M_1$  и  $M_2$  [340]

$M_1$	$M_2$	$P(M_1, M_2)$
5,0	5,5	0,599
5,5	6,0	0,245
6,0	6,5	0,097
6,5	7,0	0,038
7,0	7,5	0,015
7,5	8,0	0,006

Таким образом, на основе рассмотренного здесь статистического анализа имеется возможность оценить вероятность попадания магнитуды будущего землетрясения в определенный диапазон значений. Ничего иного подобный анализ дать не может, если не использовать для прогноза землетрясений другие данные — такие, как геодезические, геомагнитные, геоэлектрические и иные предвестники. Определенная выше вероятность дает только то, что автор в своей теории прогноза землетрясений назвал «предварительной вероятностью» ([340, 341], см. § 15.2.1).

### *Элементарная статистика времени возникновения землетрясения*

Если землетрясения происходят стационарно и случайно во времени, то частота землетрясений соответствует распределению Пуассона (например, [4, 230]). Обозначая среднее число землетрясений в единицу времени через  $k$ , получаем выражение для определения вероятности возникновения  $n$  землетрясений в интервале времени  $T$  в виде  $(kT)^n e^{-kT}/n!$  Если  $n \rightarrow 0$ , вероятность отсутствия землетрясений в течение периода времени  $T$  определяется величиной  $e^{-kT}$ . Соответственно и вероятность возникновения хотя бы одного землетрясения между  $t_1$  и  $t_2$  ( $t_2 > t_1$ ) будет равна

$$P(t_1, t_2) = 1 - e^{-k(t_2 - t_1)}. \quad (15.13)$$

Число землетрясений в год в районе Канто с магнитудой больше 5 для периода 1926—1960 гг. приведено в табл. 15.3. Всего имеется 159 землетрясений с  $5,0 \leq M \leq 6,0$  и 17 с  $M > 6,0$ .

Вероятно, исследуемый ряд достаточен для получения среднего значения  $k$  при  $5,0 \leq M \leq 6,0$ . Вероятности того, что в течение периода  $t$  произойдет хотя бы одно землетрясение в таком интервале магнитуд, вычисленные по (15.13) при  $t_1 = 0$  и  $t_2 = t$ , приведены в табл. 15.4.

Для землетрясений с магнитудой больше 6 имеется слишком мало данных. Вернемся к 1600 г. и выберем землетрясения с магнитудой  $M > 6$ . Их оказывается 35 за 360-летний период. Полагаем, что исторические записи о таких сильных землетрясениях хорошо сохранились. Тогда для возникновения землетрясений с такими магнитудами получаем  $k = 0,10$  год<sup>-1</sup>. Принимая это значение  $k$ , мы вычислили вероятности по крайней мере одного землетрясения с  $M > 6$  между 0 и  $t$ . Они приведены также в табл. 15.4 (правый столбец).

Если распределения магнитуд и времен возникновения землетрясений независимы друг от друга, то вероятность возникновения хотя бы одного землетрясения с магнитудой в интервале

ТАБЛИЦА 15.3

Число землетрясений в год в районе Канто ( $M \geq 5$ ) [340]

Год	Число зем- летрясений	Год	Число зем- летрясений	Год	Число зем- летрясений
1926	4	1938	4	1950	6
1927	4	1939	6	1951	5
1928	8	1940	5	1952	7
1929	4	1941	6	1953	7
1930	8	1942	2	1954	3
1931	8	1943	8	1955	2
1932	2	1944	7	1956	3
1933	4	1945	4	1957	1
1934	5	1946	8	1958	2
1935	13	1947	6	1959	1
1936	3	1948	7	1960	2
1937	7	1949	4		
				Всего	176

ТАБЛИЦА 15.4

Вероятности хотя бы одного землетрясения в районе Канто за период  $0 - t$  [340]

$t$	$P_s(0, t)$	$P_l(0, t)$
10 дней	0,128	0,003
30 дней	0,337	0,008
90 дней	0,709	0,025
0,5 года	0,915	0,048
1 год	0,994	0,095
2 года	1,000	0,181
5 лет	1,000	0,423
10 лет	1,000	0,632
20 лет	1,000	0,865
30 лет	1,000	0,950
40 лет	1,000	0,982
50 лет	1,000	0,993
60 лет	1,000	0,998

 $P_s$  и  $P_l$  определены в тексте.

от  $M_1$  до  $M_2$  в период времени от 0 до  $t$  определится из соотношения

$$P(0, t; M_1, M_2) = P_i(0, t) P(M_1, M_2), \quad (15.14)$$

где

$$\begin{aligned} i=s & \text{ при } 5,0 \leq M \leq 6,0, \\ i=l & \text{ при } 6,0 < M. \end{aligned} \quad (15.15)$$

$P(0, t; M_1, M_2)$  для района Канто вычислены по данным табл. 15.2 и 15.4 для различных комбинаций магнитуд и времен и приведены в табл. 15.5.

ТАБЛИЦА 15.5

Вероятности возникновения хотя бы одного землетрясения с магнитудой в интервале между  $M_1$  и  $M_2$  в районе Канто в течение периода 0— $t$  [340]

$M_1$	$M_2$	$t=10$ дней	$t=30$ дней	$t=90$ дней	$t=0,5$ года	$t=1$ год	$t=2$ года	$t=5$ лет	$t=10$ лет	$t=20$ лет
5,0	5,5	0,077	0,201	0,424	0,548	0,595	0,599	0,599	0,599	0,599
5,5	6,0	0,031	0,083	0,174	0,224	0,243	0,245	0,245	0,245	0,245
6,0	6,5	0,000	0,001	0,002	0,005	0,009	0,018	0,041	0,061	0,084
6,5	7,0	0,000	0,000	0,001	0,002	0,004	0,007	0,016	0,024	0,033
7,0	7,5	0,000	0,000	0,000	0,001	0,001	0,003	0,006	0,010	0,013
7,5	8,0	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001	0,001	0,003	0,004	0,005

Таким образом, мы видим, что можно сделать определенные заключения о вероятности возникновения землетрясения, даже если отсутствуют какие-либо специальные данные, кроме чисто сейсмологических, приведенных в табл. 15.1 и 15.3. Вероятности, подобные приведенным в табл. 15.2, 15.4 и 15.5, помогают получить представление об общей тенденции проявления землетрясений в определенном районе. Однако автор полагает, что вероятности, полученные из простой статистики землетрясений, не могут принести практической пользы для оценки реального риска возникновения сильного землетрясения в рассматриваемом районе. Как видно из приведенных выше таблиц, вероятность возникновения сильного землетрясения в ограниченный период времени определенной эпохи всегда мала, и сегодня мы нашли бы малую вероятность землетрясения с магнитудой 8, даже если бы оно произошло завтра. Если бы еще имелись данные наблюдений некоторых предвестников, связанных с возникновением землетрясений, то полученные выше вероятности следовало бы сильно изменить.

### 15.1.3. Статистика, основанная на теории экстремальных значений

Мы не будем подробно описывать статистические исследования землетрясений, но полезно изложить кратко один статистический подход, удобный для изучения основных закономерностей возникновения землетрясений. Производя статистику максимальных магнитуд землетрясений, происшедших в определенном районе за определенный период времени, возможно вывести эмпирический закон, которому подчиняются флуктуации максимальной магнитуды. Установив подобный закон, можно получить средний период повторяемости землетрясений и связанные с ним вероятности их возникновения.

Такая теория, названная статистикой экстремальных значений, развита Гумбелем [120]. Попытки использовать эту теорию для изучения землетрясений были предприняты в работах [61, 82, 291, 399] и др.

В [399] был сделан вывод, что для района Алеутско-Аляскаинской дуги между  $155$  и  $167^\circ$  з. д. вероятность землетрясения с  $M \geq 8$  к 1980 г. будет равна 0,8. Эта часть дуги известна как одна из областей сейсмического затишья (см. § 8.4.5). При этом для анализа использовались наблюдения за 1930—1971 гг.

Чен и Лин [61] выполнили анализ экстремальных значений для 13 сейсмических зон в Китае. Исследованные периоды менялись от зоны к зоне. Максимальный период составлял 270 лет. Сначала они определили статистический период повторяемости землетрясений с различными магнитудами. Затем вычислили вероятную частоту ( $N_p$ ) повторения землетрясений заданной магнитуды для заданного периода времени в будущем. Они предположили, что вероятность возникновения землетрясения определенной магнитуды велика, если  $N_p$  больше действительно наблюдаемой величины. Однако автор не уверен, справедливо ли подобное предположение.

Чен и Лин [61] установили ряд зон, в которых вероятность возникновения сильного землетрясения велика. Эти зоны представлены в табл. 15.6, где приведены также ожидаемые магнитуды землетрясений и вероятности их возникновения.

Аналогичный статистический анализ был выполнен для Калифорнийских землетрясений [82, 231]. По данным статистического анализа сделаны следующие выводы [231, стр. 106]:

- 1) вероятность возникновения землетрясения с магнитудой 8 или более в течение любого года составляет около 1%;
- 2) вероятность по крайней мере одного такого события в столетие равна 63,3%;
- 3) вероятность по меньшей мере двух таких событий в столетие составляет 26,6%. Они должны иметь место раз в 400 лет;

ТАБЛИЦА 15.6

Вероятности возникновения землетрясений в основных сейсмических зонах Китая в течение пятилетнего периода начиная с 1971 г. [61]

Сейсмическая зона	Ожидаемая магнитуда	Вероятность
Сев. Тянь-Шань	6	0,8
Южн. Тянь-Шань	6—6,5	0,7
Плато Цинхай	6—6,5	0,75
Ланьчжоу	7	0,6
Зап. Юньнань	6,5	0,75
Чэнду	6	0,6

4) вероятность интервала между землетрясениями менее 50 лет составляет 39%, а вероятность интервала более 50 лет — 61%;

5) медианный период повторяемости составляет 70 лет (половина всех интервалов — более 70 лет, а вторая половина — менее 70 лет);

6) вероятность землетрясений с магнитудой 8 или более в Калифорнии составляет около 9% за 10 лет и около 39% за 50 лет.

В этом разделе показано, что статистика экстремальных значений полезна для определения среднего периода повторения землетрясений. Определенный таким образом период повторения сильных землетрясений иногда превышает длительность периода наблюдений. По-видимому, не следует придавать слишком большое значение периоду повторяемости. Он указывает только интервал времени между землетрясениями, осредненный по всему ряду наблюдений. Действительное время возникновения следующего землетрясения может сильно отличаться от найденного таким образом среднего значения.

#### *15.1.4. Корреляция между возникновением землетрясений и другими явлениями*

Связь между возникновением землетрясений и другими явлениями — такими, как атмосферное давление и его градиент, температура, расположение небесных тел, число солнечных пятен, вариации широты, ураганы, периоды засух, поведение рыб и животных и др., — давно является предметом изучения статистиков. В статье Аки [4] приводится обширная библиография таких работ.

Иногда такие исследования давали большие значения коэффициентов корреляции. Например, в 1930 г. неожиданно высоким оказался коэффициент корреляции между уловом ставриды и суточным числом землетрясений в районе Идзу ([445], см. § 2.1.1, рис. 2.1).

В ряде случаев действительно может иметься сильная корреляция между землетрясениями и другими явлениями. По опыту самого автора, в течение некоторого периода во время Мацусирского роя землетрясений 1965—1977 гг. невероятно сильной была корреляция между геомагнитными бурями и землетрясениями. Однако она длилась недолго (см. § 2.5).

Поскольку частота землетрясений все время изменяется, не удивительно, что можно получить по виду сильную корреляцию между возникновением землетрясений и другими явлениями, также изменяющимися во времени. Иногда сильная корреляция может быть получена чисто случайно. Автор полагает, что в ряде случаев можно иметь сильную корреляцию между возникновением землетрясения и другими явлениями, хотя между ними и нет никакой физической связи. Поэтому опасно делать выводы о какой-либо причинной связи между ними.

Во всяком случае, корреляционный анализ в таком виде, как он описан в этом разделе, было бы трудно использовать для реального прогноза землетрясений.

## 15.2. ЭМПИРИЧЕСКИЙ ПОДХОД К ПРОГНОЗУ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИИ, ОСНОВАННЫЙ НА ДОСТОВЕРНЫХ НАБЛЮДЕНИЯХ ПРЕДВЕСТНИКОВ

В предыдущем разделе автор подчеркивал, что с помощью статистического анализа землетрясений можно составить общее представление о среднем периоде повторения сильных землетрясений и об их ожидаемых магнитудах, хотя подобный статистический анализ и не может указать точное время и магнитуду конкретного будущего землетрясения в заданном районе. Поэтому необходимо разработать эмпирическую теорию прогноза землетрясений на основе фактически наблюдаемых предвестников — таких, как геодезические, геомагнитные, геоэлектрические и другие явления, которые, как полагают, предшествуют землетрясению.

### 15.2.1. Прогноз магнитуды

Рикитакэ [340, 341] предложил метод, который может быть использован для переопределения вероятности того, что землетрясение попадет в определенный диапазон магнитуд или слу-

чится в течение определенного интервала времени, исходя из предварительной вероятности, полученной статистическим путем, описанным в § 15.1.2.

Выделим область, для которой имеются статистические данные о сейсмичности. Разделив весь диапазон магнитуд на  $n$  интервалов, обозначим вероятности попадания землетрясений в соответствующий интервал через  $W_0(1)$ ,  $W_0(2)$ , ...,  $W_0(n)$ . Эти вероятности, названные автором предварительными, в ряде случаев можно получить другими способами (см. § 15.3.2).

Предположим, что мы наблюдаем геофизический параметр  $A_1$ , который, как мы полагаем, является предвестником землетрясения. В результате наблюдения  $A_1$  иногда можно оценить вероятность попадания магнитуды подготавливаемого землетрясения в соответствующий интервал, как это будет показано далее в этом разделе. Обозначим такие вероятности  $W_1(1)$ ,  $W_1(2)$ , ...,  $W_1(n)$ .

С помощью хорошо известной в теории вероятности теоремы Байеса (см., например, [92, стр. 70]) можно получить общую вероятность в виде

$$W(s) = \frac{W_0(s) W_1(s)}{W_0(1) W_1(1) + W_0(2) W_1(2) + \dots + W_0(n) W_1(n)}, \quad (15.16)$$

где  $W(s)$  есть «апостериорная» вероятность попадания прошедшего землетрясения в интервал магнитуд  $s$ . «Априорная» вероятность  $W_0(s)$  переводится в вероятность  $W(s)$  в силу того факта, что был зарегистрирован предвестник  $A_1$ .

Легко показать, что общая вероятность при последовательном введении предвестников  $A_1, A_2, \dots, A_k$  выражается следующим образом:

$$W(s) = \frac{W_0(s) W_1(s) W_2(s) \dots W_k(s)}{\sum_{s=1}^n W_0(s) W_1(s) W_2(s) \dots W_k(s)}; \quad (15.17)$$

она не зависит от порядка введения этих предвестников.

Эти рассуждения напоминают процесс изменения предварительной вероятности в связи со свидетельскими показаниями. Чтобы получить большое значение общей вероятности, показания свидетелей должны быть в высокой степени достоверными.

### *Деформации земной поверхности как предвестники землетрясений*

В § 5.7 рассматриваются все известные на сегодняшний день данные о поднятиях земной поверхности перед землетрясениями. В нем предполагалось, что соотношения (5.7) и (5.11) между магнитудой землетрясения  $M$  и средним радиусом области

земной коры, подвергающейся деформированию при этом землетрясении, можно считать приближенно справедливыми и в отношении деформаций земной поверхности, предвещающих землетрясение.

Предположим, что в некоторой области наблюдается аномальная деформация земной коры и средний радиус этой области определен. В этом случае вероятную магнитуду  $M_0$  будущего землетрясения можно определить из уравнения (5.11). Вследствие разброса на графике зависимости между  $\lg r^3$  и  $M$  (см. рис. 5.68) значение  $M_0$  нельзя определить точно. Предположив, что разность между действительной магнитудой  $M$  и  $M_0$  следует гауссову распределению, получим вероятность того, что магнитуда будет заключена между значениями  $M$  и  $M + dM$ :

$$W_{GM}(M) dM = \frac{h_M}{\sqrt{\pi}} \exp[-h_M^2(M - M_0)^2] dM, \quad (15.18)$$

где  $h_M$  определяется среднеквадратичным отклонением  $\sigma_M$  величины  $M_0$ :

$$h_M = 1/(\sqrt{2}\sigma_M). \quad (15.19)$$

Строго говоря, предположение о том, что гауссово распределение в этом случае справедливо, неверно, так как не существует значений  $M$ , превышающих приблизительно 8,8. Тем не менее приведенные выше рассуждения можно в первом приближении использовать для оценки вероятности.

Вероятность попадания магнитуды землетрясения в интервал между  $M_1$  и  $M_2$  можно записать в виде

$$W_{GM}(M_1, M_2) = \frac{h_M}{\sqrt{2}} \int_{M_1}^{M_2} \exp[-h_M^2(M - M_0)^2] dM. \quad (15.20)$$

Определим функцию ошибок  $\Phi$ :

$$\Phi(\tau) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^\tau \exp(-u^2) du, \quad (15.21)$$

и тогда вероятность примет вид

$$W_{GM}(M_1, M_2) = \frac{1}{2} \{ \Phi[h_M(M_2 - M_0)] - \Phi[h_M(M_1 - M_0)] \}. \quad (15.22)$$

Дамбара [66] по 19 землетрясениям получил  $\sigma_M = 0,8$ . Разброс для землетрясений с большой магнитудой велик (см. рис. 5.68), но можно ожидать достаточно малого среднеквадратичного отклонения для землетрясений с магнитудой 6,6 и меньше. В табл. 15.7 приведены значения  $W_{GM}$  для  $r = 10$  и  $r = 50$  км в предположении  $\sigma_M = 0,2$ .

ТАБЛИЦА 15.7

 $W_{GM}(M_1, M_2)$  для  $r=10$  и 50 км [340]

$M_1$	$M_2$	$r=10$ км	$r=50$ км
5,0	5,5	0,000	0,000
5,5	6,0	0,023	0,000
6,0	6,5	0,668	0,000
6,5	7,0	0,308	0,000
7,0	7,5	0,002	0,067
7,5	8,0	0,000	0,775
8,0	8,5	0,000	0,158

В табл. 15.2 приведены предварительные вероятности для соответствующих интервалов магнитуд в области Канто. В том случае, когда на площади со средним радиусом 10 и 50 км наблюдаются прогностические деформации земной поверхности, формула (15.16) позволяет непосредственно определить общие вероятности. Их значения приведены в табл. 15.8. Найденные таким образом вероятности играют большую роль в определении магнитуды будущего землетрясения.

ТАБЛИЦА 15.8

Общая вероятность в предположении аномальной деформации земной коры в районе Канто [340]

$M_1$	$M_2$	$r=10$ км	$r=50$ км
5,0	5,5	0,000	0,000
5,5	6,0	0,069	0,000
6,0	6,5	0,789	0,000
6,5	7,0	0,142	0,000
7,0	7,5	0,000	0,178
7,5	8,0	0,000	0,822

### Другие предвестники

Для прогнозирования магнитуды ожидаемого землетрясения можно, по-видимому, использовать и другие предвестники, для которых можно наблюдать пространственную протяженность. Рикитаке [340, 341] пытался использовать для этой цели

(правда, без особого успеха из-за недостатка данных) средние значения радиусов области геомагнитной аномалии и района форшоков. Тем не менее ему удалось показать, что в случае достаточного количества данных такого рода можно довольно точно оценить магнитуду предстоящего землетрясения, используя общие вероятности.

В ряде случаев для решения рассматриваемой задачи прогноза можно использовать пространственную протяженность аномалии  $V_p/V_s$  (см., например, [88] и § 9.1.4.), аномалии механизма очага ([372] и § 8.3.4), области сейсмического затишья (см. § 8.4), аномалии грунтовых вод ([223] и §12.2) и других подобных эффектов, хотя для этого требуется достаточно полный набор данных.

### 15.2.2. Прогноз времени возникновения землетрясения

При наличии надежных предвестников для прогноза времени возникновения землетрясения можно также применить метод определения общих вероятностей по вероятностям предварительным. В качестве последних можно использовать вероятности из (15.13). Что касается возможного предвестника, то Рикитаке [340, 341] предложил использовать аномальные деформации земной поверхности.

Цубокава [453, 454] первым указал на существование линейной зависимости между логарифмом времени  $T$  этого предвестника и магнитудой землетрясения  $M$ . Типичное соотношение между ними можно записать в виде

$$\lg T = 0,79M - 1,88, \quad (15.23)$$

где  $T$  измеряется в сутках. Входящие в это выражение коэффициенты неоднократно изменялись. Справедливость соотношения (15.23) будет рассмотрена в § 15.5.4.

Аналогично рассуждениям, приведенным в предыдущем разделе, можно получить вероятность возникновения землетрясения в течение интервала времени  $t_1 - t_2$ :

$$W_{Gt}(t_1, t_2) = \frac{h\xi}{V\pi} \int_{\xi_1}^{\xi_2} \exp[-h\xi^2(\xi - \xi_0)^2] d\xi, \quad (15.24)$$

где

$$\xi = \lg T, \quad (15.25)$$

а  $\xi_0$  — логарифм времени предвестника, определенный по (15.23). Значение величины  $M$ , входящей в выражение (15.23), находится из (5.11).

$h_{\xi}$  определяется выражением

$$h_{\xi} = 1/(\sqrt{2}\sigma_{\xi}), \quad (15.26)$$

где в качестве оценочного значения в последующих расчетах примем  $\sigma_{\xi} = 0,2$ .

Вероятность возникновения землетрясения в течение интервала  $0 - t$  (по  $\xi$  от  $-\infty$  до  $\xi$ ) получается равной

$$W_{Gt}(0, t) = \frac{1}{2} \{1 + \Phi [h_{\xi}(\xi - \xi_0)]\}. \quad (15.27)$$

При этом предполагается, что  $\xi - \xi_0$  следует гауссову распределению.

В табл. 15.9 приведены значения  $W_{Gt}(0, t)$  для различных  $t$ , вычисленных при заданных в качестве параметра значениях  $r$ .

ТАБЛИЦА 15.9

$W_{Gt}(0, t)$  для  $r=10$  и 50 км [340]

$r=10$ км		$r=50$ км	
$t$	$W_{Gt}(0, t)$	$t$	$W_{Gt}(0, t)$
10 дней	0,000	1 год	0,000
30 дней	0,000	2 года	0,000
90 дней	0,000	5 лет	0,000
0,5 года	0,000	10 лет	0,002
1 год	0,004	20 лет	0,088
2 года	0,114	30 лет	0,321
5 лет	0,784	40 лет	0,568
10 лет	0,989	50 лет	0,739
20 лет	1,000	60 лет	0,850

Предварительная вероятность хотя бы одного землетрясения за период  $0 - t$  определяется по (15.13) при  $t_1=0$  и  $t_2=t$ . С помощью уравнения типа (15.16) можно вычислить общие вероятности времени возникновения землетрясения. В таком случае весь диапазон времени разделяется на два интервала:  $0 - t$  и  $t - \infty$ . Вычисленные общие вероятности для района Канто, найденные на основе данных табл. 15.4 и 15.9, приведены в табл. 15.10. Они могут помочь определить время возникновения землетрясения.

ТАБЛИЦА 15.10

Общая вероятность времени возникновения землетрясения в случае наблюдения аномальной деформации земной коры в районе Канто [340]

$r = 10$ км		$r = 50$ км	
$t$	$W(0, t)$	$t$	$W(0, t)$
10 дней	0,000	1 год	0,000
30 дней	0,000	2 года	0,000
90 дней	0,000	5 лет	0,000
0,5 года	0,000	10 лет	0,003
1 год	0,000	20 лет	0,382
2 года	0,028	30 лет	0,900
5 лет	0,727	40 лет	0,986
10 лет	0,994	50 лет	0,998
20 лет	1,000	60 лет	1,000

Объединив далее табл. 15.8 и 15.10 и предположив, что справедливо уравнение (15.14), мы вычислили вероятности возникновения по крайней мере одного землетрясения с магнитудой между  $M_1$  и  $M_2$  в районе Канто в период времени от 0 до  $t$  (эпоха, когда наблюдаются аномальные движения земной коры). Полученные значения приведены в табл. 15.11 для  $r = 10$  км и  $r = 50$  км.

Делалась попытка учесть другие предвестники, например форшоки [340, 341], но улучшить найденные здесь вероятности не удалось, ибо природа этих предвестников недостаточно ясна. Учитывая разрабатываемую в настоящее время методику статистического анализа времени предвестников (см. § 15.5), в ближайшем будущем мы сумеем более точно оценивать вероятности времени возникновения землетрясения.

### 15.2.3. Оценка сейсмической опасности на вероятностной основе

В § 4.2.1 кратко рассмотрена стратегия прогноза землетрясений, предложенная ССЕР. Когда ССЕР считает, что в определенном районе имеет место какая-либо аномалия, этот район объявляется областью усиленных наблюдений. Затем этот район подвергается различным специальным наблюдениям. Если подобные усиленные наблюдения приведут к выводу о вероятной

ТАБЛИЦА 15.11

Вероятность того, что в период  $0-t$  произойдет по крайней мере одно землетрясение с магнитудой в интервале  $M_1-M_2$ . Оценка сделана в предположении, что в районе Канто наблюдается аномальная деформация земной коры [340]

$M_1$	$M_2$	$t=10$ дней	$t=30$ дней	$t=90$ дней	$t=0,5$ года	$t=1$ год	$t=2$ года	$t=5$ лет	$t=10$ лет	$t=20$ лет	$t=30$ лет	$t=40$ лет	$t=50$ лет	$t=60$ лет
$r = 10$ км														
5,0	5,5	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
5,5	6,0	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,002	0,050	0,069	0,069				
6,0	6,5	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,022	0,574	0,784	0,789				
6,5	7,0	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,004	0,103	0,141	0,142				
7,0	7,5	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000				
7,5	8,0	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000				
$r = 50$ км														
5,0	5,5					0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
5,5	6,0					0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
6,0	6,5					0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
6,5	7,0					0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
7,0	7,5					0,000	0,000	0,000	0,000	0,068	0,160	0,175	0,178	0,178
7,5	8,0					0,000	0,000	0,000	0,002	0,314	0,740	0,810	0,820	0,822

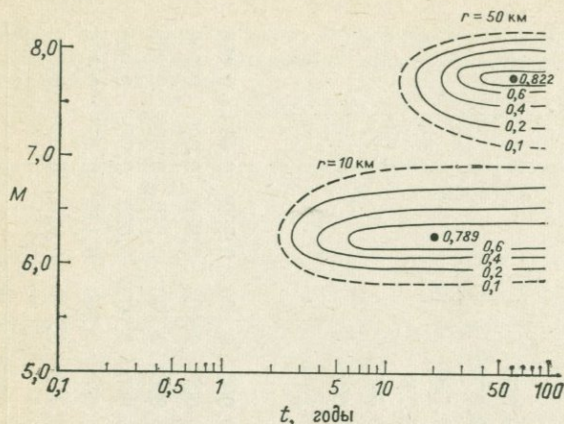


Рис. 15.1. Распределение общей вероятности при аномальной деформации земной коры со средним радиусом  $r$  по наблюдениям в районе Канто [340, 341].

связи аномалии с подготовкой землетрясения, район объявляется областью концентрированных наблюдений. В этом случае будут использованы все средства для того, чтобы предсказать возможное землетрясение с помощью концентрации в этом районе всех видов наблюдений.

Однако следует иметь в виду, что выражения «имеет место какая-либо аномалия» и «вывод о вероятной связи аномалии с подготовкой землетрясения» не носят строго количественного характера. Можем ли мы дать строгое определение выражению «какая-либо аномалия»? Что является количественной мерой для вывода «о вероятной связи аномалии с подготовкой землетрясения»?

Рикитакэ [340, 341] предложил использовать рассмотренные в этом разделе вероятности для отнесения района к зоне усиленных или концентрированных наблюдений, имея при этом цель избежать субъективного подхода, хотя методика оценки вероятностей должна быть во многом усовершенствована.

Общие вероятности для района Канто, приведенные в табл. 15.11, могут быть представлены на плоскости  $t-M$  (рис. 15.1). Точка, определяемая координатами  $(t, M)$  на этой плоскости, показывает вероятность возникновения хотя бы одного землетрясения с магнитудой в интервале от  $M-0,25$  до  $M+0,25$  за время от 0 до  $t$ .

Район может быть объявлен областью усиленных наблюдений, если вероятность возникновения землетрясения с магнитудой  $M_\alpha$  или выше превосходит  $P_\alpha$ . Аналогичным образом область

концентрированных наблюдений можно охарактеризовать вероятностью  $P_{\beta}$ . Приняв в предварительном порядке

$$M_{\alpha} = 6, P_{\alpha} = 0,2, \quad (15.28)$$

мы видим, что район Канто можно объявить зоной усиленных наблюдений соответственно через 2,6 и 15 лет после наблюдения аномальной деформации земной коры со средним радиусом 10 и 50 км.

На данной стадии исследований не ясно, какие значения следует принять для  $P_{\alpha}$  и  $P_{\beta}$ . Их оптимальные значения должны быть определены практикой бедушего.

### 15.3. ПРЕДЕЛЬНЫЕ ДЕФОРМАЦИИ И ВЕРОЯТНОСТЬ ВОЗНИКНОВЕНИЯ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ

Разработанная в предыдущем разделе вероятностная теория в основном базируется на эмпирических данных. В ряде же случаев при определении вероятности времени возникновения землетрясения возможен более физически обоснованный подход.

Вернемся к рабочей гипотезе о механизме возникновения землетрясений, основанной на тектонике плит (см. § 8.1.7—8.1.9). Если при движении плит земная кора испытывает сжатие или сдвиг, а это в конечном счете приводит к разрыву и сильному землетрясению, то ведя непрерывные наблюдения за деформациями земной коры, можно будет судить о возможности возникновения землетрясения. Самым важным при этом является определение времени возникновения разрыва или, что то же самое, установление значения предельной деформации.

#### 15.3.1. Статистика предельных деформаций

Цубои [449], исследовавший данные триангуляций о деформации земной коры, вызванной землетрясением 1927 г. в Танго, пришел к выводу, что земная кора терпит разрыв, если деформация превосходит  $10^{-4}$  (см. § 5.3.2). Этот вывод был подкреплен анализом деформаций земной коры при землетрясении 1930 г. в Северном Идзу [449] (см. § 5.3.3).

Со времени работы Цубои был накоплен значительный материал по деформациям земной коры при землетрясениях, и поэтому Рикитакэ [349, 351] провел статистические исследования предельных деформаций по данным современных наблюдений (табл. 15.12). На рис. 15.2 приведена гистограмма предельных деформаций земной коры. Среднее значение разрушающих

ТАБЛИЦА 15.12

Деформации земной коры в непосредственной близости к эпицентрам землетрясений [349, 351]

Землетрясения	Год	<i>M</i>	Координаты эпицентра	Деформация, $10^{-5}$	Примечания
<i>Нивелирование</i>					
Ноби	1891	7,9	35,6° с. ш., 136,6° в. д.	5,9	Ход 1
Ноби	1891	7,9	35,6° с. ш., 136,6° в. д.	5,8	Ход 2
Уго	1914	6,4	39,5° с. ш., 140,4° в. д.	6,2	
Омати	1918	6,1; 6,1	36,5° с. ш., 137,8° в. д.	3,0	Два толчка
Қанто	1923	7,9	35,2° с. ш., 139,3° в. д.	5,8	Берег залива Сагами
Танго	1927	7,5	35,6° с. ш., 135,1° в. д.	3,2	Разлом Гомура
Танго	1927	7,5	35,6° с. ш., 135,1° в. д.	3,5	Разлом Ямада
Южн. Болгария	1928	6,7; 6,7	42° с. ш., 25° в. д.	15,0	Два толчка
Сев. Идзу	1930	7,0	35,1° с. ш., 139,0° в. д.	4,0	
Ното	1933	6,0	37,1° с. ш., 137,0° в. д.	0,5	
Нагано	1941	6,2	36,7° с. ш., 138,3° в. д.	2,8	

Тоттори	1943	7,4	35,5° с. ш., 134,2° в. д.	1,7	
Фукуи	1948	7,3	36,1° с. ш., 136,2° в. д.	3,6	
Керн-Каунти	1952	7,7	35,0° с. ш., 119,0° з. д.	6,0	
Сев. Мияги	1962	6,5	38,7° с. ш., 141,1° в. д.	3,5	
Мацусиро	1965—1966	6,3	36,5° с. ш., 138,2° в. д.	6,3	Рой толчков, кумулятивная магнитуда
<i>Триангуляция</i>					
Сан-Франциско	1906	8,3	38° с. ш., 123° з. д.	17,0	Разлом Сан-Андреас
Канто	1923	7,9	35,2° с. ш., 139,3° в. д.	7,5	Подводный разрыв
Танго	1927	7,5	35,6° с. ш., 135,1° в. д.	3,5	Разлом Гомура
Сев. Идзу	1930	7,0	35,1° с. ш., 139,0° в. д.	9,0	Разлом Танна
Империал-Валли	1940	7,1	32,8° с. ш., 115,5° з. д.	8,5	
Тоттори	1943	7,4	35,5° с. ш., 134,2° в. д.	5,0	
Фукуи	1948	7,3	36,1° с. ш., 136,2° в. д.	5,6	Погребенный разлом
Керн-Каунти	1952	7,7	35,0° с. ш., 119,0° з. д.	4,3	
Фэрвью-Пик	1954	7,1	39,5° с. ш., 118,5° з. д.	6,2	
Аляска	1964	8,4	61,1° с. ш., 147,6° в. д.	8,4	

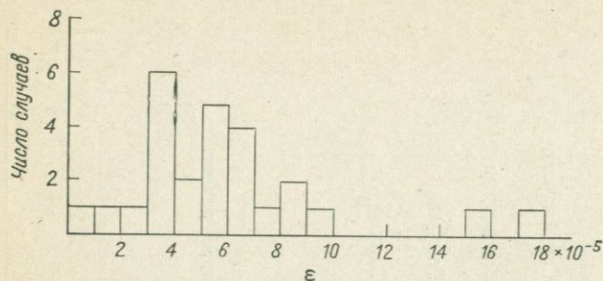


Рис. 15.2. Гистограмма предельных деформаций земной коры по данным нивелировок и триангуляций в зонах землетрясений [353].

деформаций  $\epsilon_0$  и среднеквадратичное отклонение  $\sigma$  получаются равными

$$\epsilon_0 = 4,7 \cdot 10^{-5}, \quad \sigma = 1,9 \cdot 10^{-5}. \quad (15.29)$$

### 15.3.2. Вероятность возникновения землетрясения, определяемая по деформациям земной коры

Полагая, что  $\epsilon - \epsilon_0$ , где  $\epsilon$  — деформация земной коры в определенном районе, подчиняется гауссову закону распределения и что  $d\epsilon/dt$ , или скорость накопления деформаций в этом районе, известна, Рикитакэ [349] вычислил вероятности сильного землетрясения для таких районов, как Канто, прибрежные воды у берегов восточного Хоккайдо и у тихоокеанского побережья Центральной Японии. Для прибрежных вод отсутствуют данные о деформациях земной коры, и для дна моря они вычислены экстраполяцией деформаций на суше в соответствии с моделью субдукции плиты [408, 409]. Интересно, что 17 июня 1973 г. землетрясение с магнитудой 7,4 действительно произошло восточнее Хоккайдо. Кумулятивная (накопленная) вероятность возникновения здесь землетрясения после землетрясения 1894 г. ( $M=7,9$ ) была оценена примерно в 80% ([349]; см. рис. 8.12, § 4.2.1 и 8.4.3).

### Анализ с помощью распределения Вейбула

Предположение о том, что разность  $\epsilon - \epsilon_0$  подчиняется распределению Гаусса, видимо, несправедливо, так как в этом случае  $\epsilon$  должно было бы быть определено в диапазоне, включающем значения  $\epsilon < 0$ . Чтобы исправить положение, Хагивара [145] предложил использовать для рассмотренного анализа вероятностей распределение Вейбула [479], которое широко применяется при исследованиях контроля качества. Было показано,

что это распределение очень полезно для исследования времени существования зданий, предметов промышленного производства и т. п.

Обозначим малый интервал времени через  $\Delta t$ . Пусть вероятность разрыва участка земной коры в интервале времени между  $t$  и  $t + \Delta t$  равна  $\lambda(t)\Delta t$  (при условии, что разрыв не происходит раньше  $t$ ). Величина  $\lambda(t)$ , называемая степенью риска, подчиняется распределению Вейбула:

$$\lambda(t) = Kt^m, \quad (15.30)$$

где  $K > 0$  и  $m > -1$ .

Кумулятивная вероятность разрушения выражается формулой

$$F(t) = 1 - R(t), \quad (15.31)$$

где  $R(t)$  называется надежностью (вероятностью спокойного периода.— *Ред.*) и определяется выражением

$$R(t) = \exp\left[-\int_0^t \lambda(t) dt\right] = \exp\left(-\frac{Kt^{m+1}}{m+1}\right). \quad (15.32)$$

Функция плотности вероятности разрушения  $f(t)$  получается из уравнения

$$f(t) = -\frac{dR(t)}{dt} = Kt^m \exp\left(-\frac{Kt^{m+1}}{m+1}\right). \quad (15.33)$$

Среднее время до разрыва, или так называемое (как в исследованиях по контролю качества) среднее время жизни, равно

$$E[t] = \int_0^{\infty} t f(t) dt = \left(\frac{K}{m+1}\right)^{-1/(m+1)} \Gamma\left(\frac{m+2}{m+1}\right), \quad (15.34)$$

где  $\Gamma$  — гамма-функция. Аналогичным образом среднеквадратичное значение времени до разрыва равно

$$E[t^2] = \int_0^{\infty} t^2 f(t) dt = \left(\frac{K}{m+1}\right)^{-2/(m+1)} \Gamma\left(\frac{m+3}{m+1}\right). \quad (15.35)$$

Среднеквадратичное отклонение времени до разрыва, определяемое как  $(E[t^2] - E^2[t])^{1/2}$ , будет равно

$$(E[t^2] - E^2[t])^{1/2} = E[t] \left[ \Gamma\left(\frac{m+3}{m+1}\right) - \Gamma^2\left(\frac{m+2}{m+1}\right) \right]^{1/2} / \Gamma\left(\frac{m+2}{m+1}\right). \quad (15.36)$$

Произведя двойное логарифмирование  $1/R$ , получаем

$$\ln \ln \left( \frac{1}{R} \right) = \ln \left( \frac{K}{m+1} \right) + (m+1) \ln t. \quad (15.37)$$

Будем считать, что накопление деформации при подвижке плит происходит с постоянной скоростью  $u$ . Начало отсчета времени взято в момент сильного землетрясения, когда аккумулярованная энергия деформации в основном высвободилась. В этом случае полагаем

$$\varepsilon = ut, \quad (15.38)$$

и, таким образом, проведенный выше анализ можно представить в функции  $\varepsilon$ . Например, (15.37) можно переписать в виде

$$\ln \ln \left( \frac{1}{R(\varepsilon)} \right) = \ln \left( \frac{Ku^{-m-1}}{m+1} \right) + (m+1) \ln \varepsilon. \quad (15.39)$$

Это показывает, что  $\ln \ln(1/R)$  линейно связано с  $\ln \varepsilon$ .

Для получения  $m$  и  $K$  из фактических данных обычно подсчитывают число землетрясений  $n_i$  для каждого диапазона деформаций с интервалом  $\Delta\varepsilon$ . Так, плотность вероятности для диапазона между  $i\Delta\varepsilon$  и  $(i+1)\Delta\varepsilon$  ( $i=0, 1, 2, \dots$ ) можно найти из соотношения

$$f_i \Delta\varepsilon = n_i / N, \quad (15.40)$$

где  $N$  — общее число данных. Соответственно кумулятивная вероятность определяется выражением

$$F = \Delta\varepsilon \sum_{i=0}^l f_i = \sum_{i=0}^l n_i / N, \quad (15.41)$$

и теперь  $R$  можно легко подсчитать из (15.31).

Эта процедура была использована для анализа данных табл. 15.12 по предельным деформациям. Исключая крайние значения предельных деформаций для землетрясений в Сан-Франциско (1906 г.), Южной Болгарии (1928 г.) и Ното (1933 г.), проводим прямую через точки на графике в координатах  $\ln \ln(1/R)$  и  $\ln \varepsilon$ , показанную на рис. 15.3. Здесь  $m=1,6$  и  $Ku^{-m-1}=0,0337$ , если  $\varepsilon$  выражено в единицах  $10^{-5}$ .

Если в диапазоне деформаций  $0-\varepsilon$  не происходит разрыва земной коры, тогда вероятность разрыва для диапазона деформаций  $\varepsilon - (\varepsilon + \varepsilon_s)$  определяется следующим выражением:

$$F_s(\varepsilon_s | \varepsilon) = [F(\varepsilon + \varepsilon_s) - F(\varepsilon)] / [1 - F(\varepsilon)]. \quad (15.42)$$

Это выражение представляет собой не что иное, как степень риска для рассматриваемого диапазона деформаций.

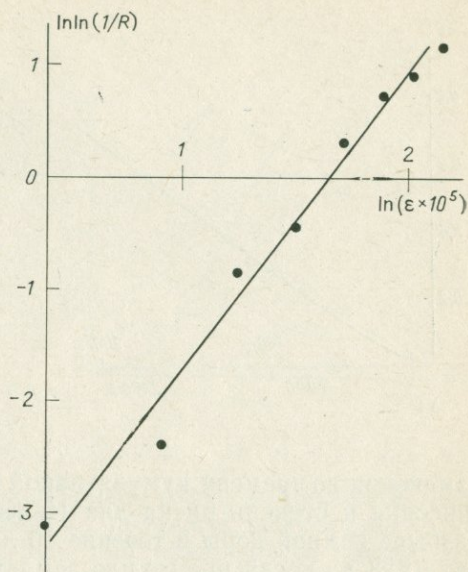


Рис. 15.3. Значения  $\ln \ln(1/R)$  в зависимости от  $\ln \epsilon$  для распределения Вейбула [351].

#### Район Южного Канто

Основные данные о развивающихся в настоящее время деформациях земной коры в районе Южного Канто вблизи Токио (Япония) приведены в § 5.4.1. Среднее значение максимальной деформации сдвига оценивается в  $0,0568 \cdot 10^{-5}$  год<sup>-1</sup>.

По определенным ранее параметрам  $m$  и  $K$  и скорости накопления деформаций можно вычислить величины, связанные с распределением Вейбула. На рис. 15.4 и 15.5 показаны

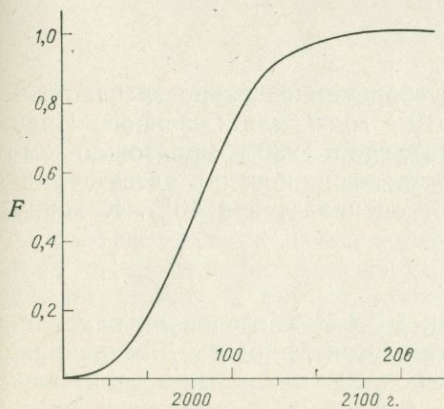


Рис. 15.4. Кумулятивная вероятность землетрясения в районе Южного Канто [351].

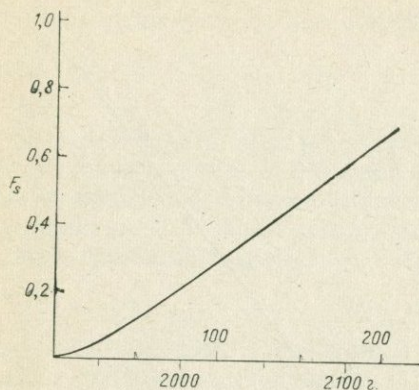


Рис. 15.5. Степень риска возникновения в течение 10-летнего периода землетрясения в районе Южного Канто для эпохи, показанной по оси абсцисс. Предполагается, что до начала рассматриваемой эпохи землетрясение не произошло [351].

изменения во времени кумулятивной вероятности сильного землетрясения и степени риска для 10-летнего периода (вероятность разрыва земной коры в течение 10 лет). За начало отсчета принят 1923 г., когда произошло землетрясение в Канто с  $M=7,9$ . Вероятность землетрясения в период 1923—1974 гг. составляет 20%. К 2000 г. она достигнет 50%, а к 2050 г. — 90%.

В § 15.3.1 описаны статистические исследования предельных деформаций земной коры для сильных землетрясений с магнитудой 6 и более. Отметим, что вычисляемые в этом разделе вероятности также справедливы только для сильных землетрясений. Полученные здесь результаты можно использовать для оценки предварительной вероятности возникновения землетрясения в соответствии с § 15.2.2. Лучше всего основываться на вероятности, найденной из реально наблюдаемых фактов, а не на использовании лишь статистического анализа прошедших событий.

#### *Район Северного Идзу*

В § 5.4.2 получено значение современной скорости накопления деформации сдвига  $0,096 \cdot 10^{-5}$  год<sup>-1</sup> для Северного Идзу (в 100 км к юго-западу от Токио), где в 1930 г. произошло землетрясение с  $M=7,0$ . Вероятность возникновения здесь землетрясения в последующие 45 лет оценивается в 40%. К концу столетия она достигнет 85%.

#### *Зона разлома Сан-Андреас*

Шольц и Фитч [392, 393] (см. § 5.4.4) исследовали накопление деформаций в зоне разлома Сан-Андреас. Для района, включающего Сан-Франциско, скорость накопления сдвиговых деформаций они оценили в  $0,05 \cdot 10^{-5}$  год<sup>-1</sup>. Принимая это значе-

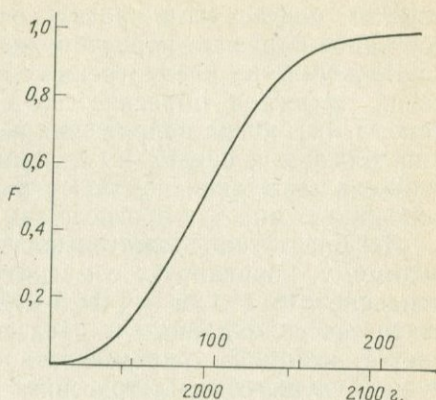


Рис. 15.6. Кумулятивная вероятность землетрясения в районе Сан-Франциско [351].

ние и полагая, что вся накопленная ранее деформация была снята при землетрясении 1906 г., получаем кумулятивную вероятность, приведенную на рис. 15.6. Вероятность землетрясения в период 1906—1975 гг. оказывается равной 30%, к концу столетия она достигнет 50%.

Подобным образом можно подсчитать вероятность для района Форт-Техон, где сильное землетрясение произошло в 1857 г. Если скорость накопления деформаций  $0,06 \cdot 10^{-5}$  год<sup>-1</sup> оценена правильно [392], то кумулятивная вероятность землетрясения к 1975 г. достигала 80%.

Согласно замечанию Сэвиджа и Бурфорда [379, 380], оценка Шольца и Фитча [392, 393] для накопленной деформации может быть завышена, так как при рассмотрении движений земной коры они учитывали в основном ползучесть в зоне разлома. Приведенные здесь вероятности могут содержать ошибки.

#### 15.4. ПРОГНОЗ, ОСНОВАННЫЙ НА МОДЕЛИ ДИЛАТАНСИИ

Содержание двух последних разделов можно рассматривать как попытку долгосрочного прогноза магнитуды и времени землетрясения в вероятностных терминах.

Исследования и наблюдения привели к выявлению различных предвестников, которые можно использовать при прогнозе землетрясений. К ним относятся аномальные поднятия земной поверхности, изменения электрического сопротивления пород, изменения режима грунтовых вод и содержания в них радона, изменение отношения  $V_p/V_s$  или только  $V_p$  и т. п. (см. предыдущие главы). Лабораторные эксперименты (см. гл. 13)

в целом подтвердили правильность этих предвестников, когда состояние образцов пород близко к разрушению.

Большинство рассмотренных выше предварающих землетрясения эффектов объясняется, видимо, развитием дилатансии (см. гл. 14), когда напряжения в земной коре создают деформации, близкие к предельным. Земная кора разрывается не мгновенно, а этому предшествуют различного рода изменения, что особенно важно для прогноза землетрясений.

Логарифм продолжительности времени предвестников, по видимому, коррелирует с магнитудой землетрясения. Это было показано в § 14.1, а в § 15.5 будут приведены дополнительные статистические данные о предвестниках. В результате оказывается возможным предсказать с известной точностью магнитуду будущего землетрясения по продолжительности предвестника. Сложность состоит в том, что время предвестника устанавливается только после землетрясения. Можно также определять время землетрясения при условии вероятного определения магнитуды по таким данным, как, например, пространственная протяженность явления-предвестника. Это было показано в § 15.2.2.

Для некоторых предвестников (как, например, для отношения  $V_p/V_s$ ) рассматриваемая величина непосредственно перед землетрясением возвращается к своему обычному значению. В таких случаях можно определить приближенное значение времени предвестника, а отсюда и магнитуду землетрясения.

В благоприятных случаях типа тех, что упомянуты в предыдущем абзаце, прогноз является полудетерминистическим, и поэтому в будущем следует уделять особое внимание изучению предвестников, характеристики которых восстанавливаются и возвращаются к нормальному уровню перед самым землетрясением.

## 15.5. СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ПРЕДВЕСТНИКОВ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИИ

Для предсказания землетрясений имеет большое значение линейная зависимость между логарифмом времени предвестника и магнитудой землетрясения. Эта зависимость была впервые отмечена в работах Цубокавы [453, 454] и впоследствии исследована Шольцем и др. [394], Уиткомом и др. [480]. Найденные эмпирические зависимости показывают, что с увеличением продолжительности действия предвестника увеличивается и магнитуда землетрясения. Например, время предвестника землетрясения с магнитудой 7 достигает нескольких лет, в то время как для землетрясений с магнитудой 4 оно составляет лишь десятки

дней. В противоположность предвестникам, связанным с величиной магнитуды, иногда наблюдаются эффекты другого рода, появляющиеся непосредственно перед сильным землетрясением, скажем, за несколько часов до него.

Чтобы выяснить, каким образом следует проводить наблюдения предвестников обоих типов, автор [353] провел статистический анализ всех доступных ему предвестников землетрясений. Собраны, конечно, не все данные, но автор все же проанализировал 282 предвестника. Позднее автор получил дополнительные данные, но уже не смог их использовать. Большая часть данных имеет японское и американское происхождение, но использованы также и опубликованные советские данные, переведенные на японский или английский язык. Вероятно, много подобных данных имеется в КНР, Новой Зеландии, Италии, Турции и других странах, расположенных в сейсмичных районах, однако автор не пытался включить их в статистический анализ.

После завершения своего анализа автор обнаружил аналогичную работу Мячкина и Зубкова [270], но в ней нет детального рассмотрения природы различных предвестников.

### *15.5.1. Классификация предвестников*

Предвестники подразделяются на 15 видов согласно методам наблюдений. Они приведены в табл. 15.13, дополненной табл. 15.14, в которую включены данные, ставшие известны автору позднее.

В таблице 15.15 указано число использованных случаев по всем 15 видам предвестников и их сокращенные обозначения.

Дадим краткое описание каждого предвестника.

#### *Деформации земной поверхности (l)*

Большинство данных по этому виду предвестников получено с помощью нивелирования (§ 5.7). Некоторые данные получены геодезическим методом (§ 5.4.4) и измерениями на 100-метровом ромбическом базисе вблизи Токио (§ 5.3.13). Сюда также включены предшествующие землетрясению поднятия земной поверхности, проявляющиеся в аномальных отливах моря (§ 6.1), а также данные, полученные из мареографических наблюдений.

#### *Наклоны и деформации (t)*

Большое количество данных по наклонам и деформациям получено измерениями с помощью горизонтальных маятниковых наклономеров, пузырьковых уровнемеров, водотрубных наклономеров, скважинных наклономеров и деформографов (§ 7.7).

ТАБЛИЦА 15.13

Данные о предвестниках [353]

Землетрясение	Год	<i>M</i>	Эпицентр	Величина изменения	Время предвестника, сут	Эпицентральное расстояние, км	Примечания
<i>Вид предвестника: деформации земной поверхности (I)</i>							
<i>Ромбический базис</i>							
Канто, Япония	1923	7,9	35,2° с. ш., 139,3° в. д.	$1 \cdot 10^{-5}$ (деф.)	1500	70	[449]
<i>Геодиметр</i>							
Холлистер, США	1960	5,0	36,8° с. ш., 121,4° з. д.	$4 \cdot 10^{-6}$	0,0125	10	Калифорния [162]
Корралитос	1964	5,2	37,0° с. ш., 121,7° з. д.	$3 \cdot 10^{-6}$	400	10	То же
<i>Нивелирование</i>							
Секихара, Япония	1927	5,3	37,5° с. ш., 138,8° в. д.	$1,5 \cdot 10^{-5}$	90	0	[449]
Тонанкай	1944	8,0	33,7° с. ш., 136,2° в. д.	—	3600	150	Резкие изменения вековых движений [102]
				$5 \cdot 10^{-6}$	0,15		[102]
Нагаока	1961	5,2	37,5° с. ш., 138,8° в. д.	$3 \cdot 10^{-6}$	1000	4	[192]
Сев. Мино	1961	7,0	36,0° с. ш., 136,8° в. д.	$7 \cdot 10^{-6}$	4300	15	[454]
Нингата	1964	7,5	38,4° с. ш., 139,2° в. д.	$3 \cdot 10^{-6}$	3600	40	[67]
Оми	1967	5,0	36,5° с. ш., 138,0° в. д.	$5 \cdot 10^{-6}$	120	3	[454]
Дунахарасты, Венгрия	1596	6	Близ Будапешта	—	290	—	Опускание на 5,5 см за несколько дней перед толчком [34]

Ташкент, СССР	1966	5,5	41,3° с. ш., 69,3° в. д.	—	7000	—	Резкие изменения вековых движений [244]
Гарм	1969	5,7	39,0° с. ш., 70,3° в. д.	—	620	—	Резкие изменения вековых движений [371]
Сан-Фернандо, США	1971	6,4	34,4° с. ш., 118,4° з. д.	$1,2 \cdot 10^{-5}$	2500	15	[59]
<i>Отливы моря</i>							
Адзигасава, Япония	1793	6,9	40,7° с. ш., 140,0° в. д.	1—2 м (поднятие поверхности)	0,17	—	
Садо	1802	6,6	37,8° с. ш., 138,4° в. д.	1 м	0,21	—	
Хамада	1872	7,1	34,8° с. ш., 132,0° в. д.	2—3 м	0,008	—	
Танго	1927	7,5	35,6° с. ш., 135,1° в. д.	1 м	0,10	—	Данные взяты из [177]
<i>Мареографические наблюдения</i>							
Ниигата, Япония	1964	7,5	38,4° с. ш., 139,2° в. д.	Опускание на 2 см	360	40	[455]
<i>Вид предвестника: наклоны и деформации (t)</i>							
<i>Горизонтальные маятниковые наклономеры</i>							
Канто, Япония	1923	7,9	35,2° с. ш., 139,3° в. д.	$1,5 \cdot 10^{-5}$ (наклон)	0,33	80	Обс. Токийского университета [176]
Тоттори	1943	7,4	35,5° с. ш., 134,2° в. д.	$5 \cdot 10^{-7}$	0,25	60	Обс. Икуно [374]
Тонанкай	1944	8,0	33,7° с. ш., 136,2° в. д.	$2 \cdot 10^{-7}$	0,24	160	Обс. Камигамо [374]

Землетрясение	Год	<i>M</i>	Эпицентр	Величина изменения	Время предвестника, сут	Эпицентрально-ное расстояние, км	Примечания
Нанки	1950	6,7	33,9° с. ш., 135,8° в. д.	$7,5 \cdot 10^{-7}$	0,29	80	Обс. Тамамидзу
				$2 \cdot 10^{-7}$	0,28	120	Обс. Камигамо
				$1 \cdot 10^{-7}$	0,23	200	Обс. Коти [374]
Дайсёдзи-оки	1952	6,8	36,5° с. ш., 136,2° в. д.	$3 \cdot 10^{-4}$	90	40	Обс. Огоя
				$1 \cdot 10^{-4}$	10		То же [290]
Посино	1952	7,0	34,5° с. ш., 135,8° в. д.	—	400	80	Изменения направления наклона; обс. Камигамо
				$3 \cdot 10^{-6}$	15		Обс. Камигамо
				$1 \cdot 10^{-5}$	15	60	Обс. Кису
				$1 \cdot 10^{-5}$	15	80	Обс. Юра [441]
				$3 \cdot 10^{-6}$	200	40	Обс. Кису
				$5 \cdot 10^{-6}$	100		То же
Одайгахара	1960	6,0	34,5° с. ш., 136,0° в. д.	$3 \cdot 10^{-6}$	10		„
				$1,5 \cdot 10^{-5}$	120	90	Обс. Синомисаки
				$2 \cdot 10^{-6}$	20		То же
				$3,3 \cdot 10^{-5}$	200	90	Обс. Юра
				$4 \cdot 10^{-6}$	110		То же
				$3 \cdot 10^{-6}$	20	90	
				—	30	90	Изменения в направлении наклонов, обс. Акибасан

				—	5			То же
				$1,5 \cdot 10^{-5}$	30	90		Обс. Оура
				$3 \cdot 10^{-6}$	5			То же
				$6 \cdot 10^{-6}$	30	100		Обс. Камигамо
				$1 \cdot 10^{-6}$	5			То же [441]
Хиуганада	1961	7,0	31,6° с. ш., 131,9° в. д.	$5 \cdot 10^{-7}$	12	120		Обс. Макимине
				$5 \cdot 10^{-7}$	4			То же [441]
Сев. Мино	1961	7,0	36,0° с. ш., 136,8° в. д.	$2,5 \cdot 10^{-5}$	50	40		Обс. Огоя
				$5 \cdot 10^{-6}$	15			То же
				$1 \cdot 10^{-5}$	50	60		Обс. Камнока
				$5 \cdot 10^{-7}$	15			То же [441]
Сирахама-оки	1962	6,4	33,6° с. ш., 135,2° в. д.	$1 \cdot 10^{-6}$	20	35		Обс. Юра
				$5 \cdot 10^{-7}$	7			То же
				$1 \cdot 10^{-5}$	40	65		Обс. Кису
				$1 \cdot 10^{-6}$	3			То же [441]
Этидзенмисаки-оки	1963	6,9	35,8° с. ш., 135,8° в. д.	$1,8 \cdot 10^{-5}$	180	80		Обс. Камигамо
				$5 \cdot 10^{-6}$	60			То же
				$3 \cdot 10^{-6}$	15			”
				$5 \cdot 10^{-6}$	180	90		Обс. Огоя
				$7 \cdot 10^{-6}$	70			То же
				$4 \cdot 10^{-6}$	15			”
				$2 \cdot 10^{-6}$	180	110		Обс. Икуно
				$2 \cdot 10^{-6}$	60			То же
				$1 \cdot 10^{-6}$	10			” [441]
Ашхабад, СССР	1957	4	—	$5 \cdot 10^{-7}$	0,042	25		Станция Ашхабад [306, 307]

Землетрясение	Год	<i>M</i>	Эпицентр	Величина изменения	Время предвестника, сут	Эпицентрально-ное расстояние, км	Примечания
Алма-Ата	1958	4,0	—	$3 \cdot 10^{-7}$	0,125	250	Станция Алма-Ата [306, 307]
		4,7					
Афганистан	1959	5,0	—	$3 \cdot 10^{-6}$	0,5	245	Станция Кондара [306, 307]
	1959	3,5	—	$3 \cdot 10^{-6}$	0,5	300	То же
<i>Пузырьковые уровнемеры</i>							
Сан-Фернандо, США (афтершок)	1971	4,7	34,4° с. ш., 118,4° з. д.	$6 \cdot 10^{-4}$ (наклон)	0,17	10	Наблюдались с помощью уровня, прикрепленного к теодолиту [435]
<i>Водотрубные наклономеры</i>							
Фукуи, Япония	1948	~5	36,2° с. ш., 136,2° в. д.	$1 \cdot 10^{-6}$	0,008	20	Обс. Бандодзима [141]
Нингата	1964	7,5	38,4° с. ш., 139,2° в. д.	$1,5 \cdot 10^{-5}$	3000	80	Обс. Мадзе [204]
Мацусиро	1966	4,5	36° с. ш., 138° в. д.	$1,5 \cdot 10^{-7}$	0,083	2,4	Обс. Мацусиро [496]
		4,5				4,2	
		4,5				2,4	
		4,6		$3 \cdot 10^{-7}$	0,042	6,7	То же
		4,7		$8 \cdot 10^{-7}$	0,042	8,1	„

		4,4		6·10 <sup>-7</sup>	0,042	4,5	„
		4,4				4,1	„
		4,6		5·10 <sup>-7</sup>	0,050	4,9	„
Центр. Гифу	1969	6,6	35,8° с. ш., 137,1° в. д.	5·10 <sup>-7</sup> год <sup>-1</sup>	250	48	Обс. Инуяма
				5·10 <sup>-7</sup> год <sup>-1</sup>	250	60	Обс. Камитакара [402]
П-ов Ацуми	1971	6,1	34,5° с. ш., 137,1° в. д.	5·10 <sup>-7</sup> год <sup>-1</sup>	250	90	Обс. Инуяма [402]
Данвилл, США	1970	4,3	37,8° с. ш., 121,9° з. д.	5·10 <sup>-7</sup>	30	30	Обс. Беркли
		4,3					
		4,1		3·10 <sup>-7</sup>	1,0		То же [489]
		4,0					
<i>Скважинные наклономеры</i>							
Р-н Холлистера, США	1973	3,0	В пределах 36,5—37,0° с. ш., 121,1—121,7° з. д.	Резкое изменение направления наклона	7	3	Обс. Натин
		2,8			5	7	То же
		2,7			5	6	„
		2,9			5	7	„
	1974	4,3			15	17	„
	1973	2,8			7	8	Обс. Либби
		2,6			33	5	То же
	1974	2,7			30	10	„
	1973	2,9			15	6	Обс. Сейдж
		2,8			10	7	То же
	1974	2,7			15	4	„
							Данные взяты из [188]

Землетрясение	Год	<i>M</i>	Эпицентр	Величина изменения	Время пред- вестника, сут	Эпицентральный расстояние, км	Примечания
<i>Деформографы</i>							
Йосино, Япония	1952	7,0	34,5° с. ш., 135,8° в. д.	2,5·10 <sup>-6</sup> (деф.)	300	50	Обс. Осакаяма [375]
				1,5·10 <sup>-6</sup>	120	72	Обс. Иде
				3·10 <sup>-6</sup>	60		То же
				1·10 <sup>-6</sup>	11		„ [436]
Центр. Гифу	1969	6,6	35,8° с. ш., 137,1° в. д.	5·10 <sup>-7</sup> год <sup>-1</sup>	250	48	Обс. Инуяма [402]
Южн. Тянь-Шань, СССР	1965	6,0	41,8° с. ш., 79,4° в. д.	9·10 <sup>-8</sup>	15	250	Станция Талгар
				5·10 <sup>-8</sup>	4		То же [224]
Гиндукуш	1965	7,5	36,3° с. ш., 70,7° в. д.	Изменение скорости деформации	4	300	Станция Кондара [225]
Душанбе	1965	4,5		То же	3	100	То же [225]
Джунгарский Ала- тау	1967	5,0	45,4° с. ш., 80,4° в. д.	5·10 <sup>-8</sup> (деф.)	10	320	Станция Талгар [224]
Памир	1969	3,0	39,0° с. ш., 70,3° в. д.	3·10 <sup>-8</sup>	2	5	Станция Гарм [224]
<i>Вид предвестника: форшоки (f)</i>							
Хатинохе-оки, Япония	1763	7,4	40,7° с. ш., 142,0° в. д.		30		[466]
Токати-оки	1843	8,4	41,8° с. ш., 144,8° в. д.		15		[466]
Ига	1854	6,9	34,8° с. ш., 136,2° в. д.		2		[266]

Эдо	1855	6,9	35,8° с. ш., 139,8° в. д.	0,42	[266]
Хатинохе-оки	1856	7,8	40,5° с. ш., 143,5° в. д.	4	[466]
Хамада	1872	7,1	34,8° с. ш., 132,0° в. д.	5	[192]
Немуро-оки	1894	7,9	42,4° с. ш., 146,3° в. д.	0,21	[466]
Рикую	1896	7,5	39,5° с. ш., 140,7° в. д.	8	[192]
Камитакай	1897	6,3	36,6° с. ш., 138,2° в. д.	0,35	[192]
Уго	1914	6,4	39,5° с. ш., 140,4° в. д.	11	[192]
Омати	1918	6,1	36,5° с. ш., 137,8° в. д.	0,42	[192]
		6,1			
Симабара	1922	6,5	32,7° с. ш., 130,1° в. д.	0,46	[192]
		5,9			
Канто	1923	7,9	35,2° с. ш., 139,3° в. д.	1500	Активность в преф. Вакаяма [197]
Сев. Гифу	1927	4,6	36,1° с. ш., 137,0° в. д.	40	[254]
Сев. Хиросима	1927	6,0	35,0° с. ш., 132,8° в. д.	70	[254]
Секихара	1927	5,3	37,5° с. ш., 138,8° в. д.	0,029	[192]
Центр. Кумамото	1929	4,9	32,9° с. ш., 130,8° в. д.	11	[254]
Сев. Идзу	1930	7,0	35,1° с. ш., 139,0° в. д.	19	[254]
Сев. Хиросима	1930	6,0	35,0° с. ш., 132,9° в. д.	60	[254]
Вост. Яманаси	1931	6,0	35,4° с. ш., 138,9° в. д.	14	[254]
Хиуганада	1931	6,6	32,2° с. ш., 132,1° в. д.	8	[254]
Санрику	1933	8,3	39,1° с. ш., 144,7° в. д.	60	[192]
Сев. Кумамото	1933	5,0	33,0° с. ш., 130,9° в. д.	15	[254]
Зап. Оита	1935	4,8	33,1° с. ш., 131,1° в. д.	1	[254]
Центр. Киото	1936	4,5	35,1° с. ш., 135,8° в. д.	21	[254]
Центр. Кумамото	1937	5,0	32,8° с. ш., 130,8° в. д.	174	[254]

Землетрясение	Год	M	Эпицентр	Величина изменения	Время предвестника, сут	Эпицентрально-ное расстояние, км	Примечания
Южн. Нагасаки	1937	5,0	32,8° с. ш., 130,0° в. д.		76		[254]
Центр. Яманаси	1940	5,0	35,6° с. ш., 138,5° в. д.		12		[254]
Нагано	1941	6,2	36,7° с. ш., 138,3° в. д.		56		[254]
Микава	1945	7,1	34,7° с. ш., 137,0° в. д.		2		[192]
Вост. Кумамото	1946	5,1	32,7° с. ш., 130,6° в. д.		2		[254]
Имайти	1949	6,4	36,7° с. ш., 139,7° в. д.		1		[192]
		6,7					
Токати-оки	1952	8,1	42,3° с. ш., 143,9° в. д.		2		[192]
П-ов Осима	1953	5,4	42,2° с. ш., 139,9° в. д.		66		[254]
Босо-оки	1953	7,5	34,3° с. ш., 141,8° в. д.		2200		Активность в преф. Вакаяма [197]
Амамносима	1954	6,1	29,3° с. ш., 131,3° в. д.		0,33		[254]
О. Ниидзима	1957	6,3	34,3° с. ш., 139,4° в. д.		12		[254]
Камикоти	1963	4,8	36,2° с. ш., 137,6° в. д.		5		[254]
Мацусиро	1964	3,3	36° с. ш., 138° в. д.		0,17		[431]
	1967	~5			180		Сакаи-Вилледж [135]
		~5			210		Адзума-Вилледж [135]
		~5			120		Косоку-Сити [135]
		~5			120		Тогура-Таун [135]
		~5			120		Камиямада-Таун [135]
		~5			150		Санада-Таун [135]

Токати-оки	1968	7,9	40,7° с. ш., 143,6° в. д.	14	[192]
Вблизи п-ова Кии	1968	4,9	33,0° с. ш., 135,6° в. д.	5	[458]
Вати	1968	5,6	35,2° с. ш., 135,4° в. д.	180	Преф. Киото [303]
Юго-вост. Акита	1970	6,2	39,2° с. ш., 140,8° в. д.	100	[327]
Тидзу	1970	4,3	35,3° с. ш., 134,2° в. д.	0,21	Преф. Тоттори [215]
П-ов Ацуми	1971	6,1	34,5° с. ш., 137,1° в. д.	0,75	[172]
О. Хатидзэ-оки	1972	7,3	33,3° с. ш., 141,0° в. д.	2,3	[206]
Вблизи о. Итуруп, Курильские о-ва	1958	8,0	44,3° с. ш., 148,5° в. д.	120	[466]
Вблизи о. Уруп	1963	8,1	43,8° с. ш., 150,0° в. д.	1	[466]
Вблизи о. Шикотан	1969	7,8	40,1° с. ш., 142,5° в. д.	1	[466]
Вблизи Южн. Калифорнии, США	1812	—	34° с. ш., 120° з. д.	0,021	[279]
Сокорро	1906	—	34,0° с. ш., 107,0° з. д.	10	Нью-Мексико [279]
Сев.-вост. Аризона	1910	—	36,0° с. ш., 111,1° з. д.	13	[279]
Плезант-Валли	1915	7,6	40,5° с. ш., 117,5° з. д.	0,8	Невада [279]
Элсмор	1921	6,1	38,8° с. ш., 112,2° з. д.	17	Юта [279]
Уиттиер	1929	4,7	34° с. ш., 118° з. д.	64	Калифорния [331] [279]
Элленсберг	1934	—	47° с. ш., 121° з. д.	4	[279]
Монтана	1935	6,3	46,6° с. ш., 112,0° з. д.	9	[279]
		6,0			
Белен	1935	—	34,7° с. ш., 106,8° з. д.	5	Нью-Мексико [279]

Землетрясение	Год	M	Эпицентр	Величина изменения	Время предвестника, сут	Эпицентральное расстояние, км	Примечания
Керн-Каунти	1952	7,7	35,0° с. ш., 118,8° з. д.		0,092		[331]
Хоторн	1956	5,3	38,3° с. ш., 119,0° з. д.		0,0021		Невада [279]
Крысьи о-ва	1965	7,7	51,3° с. ш., 178,6° в. д.		4		[257]
Паркфилд	1966	5,3	35,9° с. ш., 120,9° з. д.		0,13		Калифорния [257]
Данвилл	1970	4,3	37,8° с. ш., 121,9° з. д.		16		То же
		4,3					
		4,1					
		4,0					
Беар-Валли, юг	1972	4,6	36,5° с. ш., 121,1° з. д.		5		„ [495]
У берегов Чили	1960	8,3	39,5° ю. ш., 74,5° з. д.		1,38		[428]
Кремаста, Греция	1966	6,3	38,9° с. ш., 21,5° в. д.		60		[367]
Манагуа, Никарагуа	1972	6,2	12,1° с. ш., 86,2° з. д.		0,125		[237]
<i>Вид предвестника: значение b (b)</i>							
Фэрбенкс, США	1970	3,0		1,3→0,8 (уменьшение)	7		Аляска [394]
	1970	5,0			60		То же
Данвилл	1970	4,3	37,8° с. ш., 121,9° з. д.	1,2→0,8	1		Калифорния [54]
		4,0		1,05→0,6	1,2		То же
		3,7		1,2→0,9	155		Калифорния [495]
		3,6					

Холлистер	1971	3,9	36,7° с. ш., 121,3° з. д.	0,8→0,6	40	То же
				0,8→0,4	9	"
Беар-Валли, север	1972	5,0	36,6° с. ш., 121,2° з. д.	1,0→0,8	130	"
Беар-Валли, юг	1972	4,6	36,5° с. ш., 121,1° з. д.	1,2→0,9	120	"
		4,6		0,9→0,8	5	"
Каракас, Венесуэла	1967	6,5	10,6° с. ш., 67,3° з. д.	1,3→0,7	930	[89]
<i>Вид предвестника: микросейсмичность (m)</i>						
Фэрбенкс, США	1970	3,0	—	Число толчков в сутки 80→40 (уменьшение)	7	Аляска [394]
Гарм, СССР	1969	5,7	39,0° с. ш., 70,3° в. д.		550	Средняя Азия [371]
	1966	5,5			550	То же
		5,5				
<i>Вид предвестника: механизм очага (s)</i>						
Гарм, СССР	1966	5,4	39° с. ш., 70° в. д.		470	Средняя Азия
					130	
	1969	6,2			360	То же
					110	
						Данные взяты из [371]
Нарын	1963	4,8	41,4° с. ш., 76,0° в. д.		720	Средняя Азия
	1966	4,8			45	То же
						Данные взяты из [410]

Землетрясение	Год	M	Эпицентр	Величина изменения	Время пред- вестника, сут	Эпицентральный расстояние, км	Примечания
<i>Вид предвестника: аномалия крипа на разломе (с)</i>							
Холлистер, США	1961	5,6 5,5	36,7° с. ш., 121,3° з. д.	Удвоение скорости крипа	800		
Паркфилд	1966	5,3	35,9° с. ш., 120,9° з. д.		—	14	
<i>Вид предвестника: <math>V_p/V_s</math> (v)</i>							
Гарм, СССР	1956	5,5	39° с. ш., 70° в. д.	10% (умень-	90		Свежие трещины Данные взяты из [277]
		4,8		шение)			
	1957	4,1		12% <sub>0</sub>	57		
	1959	5,5		12% <sub>0</sub>	33		
	1961	4,1		10% <sub>0</sub>	72		
		4,8		9% <sub>0</sub>	51		
	1962	4,5		12% <sub>0</sub>	36		
		4,5		8% <sub>0</sub>	48		
	1963	4,1		10% <sub>0</sub>	48		
		4,8		17% <sub>0</sub>	30		
	1964	4,1		9% <sub>0</sub>	45		
	1966	5,5		13% <sub>0</sub>	30		
	1967	4,8		12% <sub>0</sub>	90		
		9% <sub>0</sub>	45				

Блу-Маунтин- Лейк, Нью-Йорк	1971	1,3	43,9° с. ш., 74,4° з. д.	120%	0,12	Данные [398]	взяты из
		1,7			0,12		
		2,0			0,40		
		2,7		120%	3,4		
		3,1		120%	6,0		
	3,3		150%	6,1			
						Данные [394]	взяты из
Сан-Фернандо	1971	6,4	34,4° с. ш., 118,4° з. д.	100%	1100	[480]	
О. Ветренный	1971	3,8	51,6° с. ш., 178,8° в. д.	50%	50	Алеутские о-ва [218]	
Сев. Мияги, Япо- ния	1962	6,5	38,7° с. ш., 141,1° в. д.	70%	360	[299]	
Нингата	1964	7,5	38,4° с. ш., 139,2° в. д.	40%	3540	[328]	
Тюгоку—Кинки	1967	5,0	35° с. ш., 135° в. д.	90%	50	[52]	
	1968	5,0		70%	52	[52]	
Сев. Нагано	1968	5,3	36,8° с. ш., 138,3° в. д.	30%	110	[480]	
Юго-вост. Акита	1970	6,2	39,2° с. ш., 140,8° в. д.	20%	730	[328]	

Вид предвестника:  $V_p$  и  $V_s$  ( $\omega$ )

*Аномалия  $V_p$*

Сан-Фернандо, США	1971	6,4	34,4° с. ш., 118,4° з. д.	20% (умень- шение)	1100	[480]
Мыс Мугу	1973	6,0	34,1° с. ш., 119,0° з. д.	20%	380	[421]

Землетрясение	Год	<i>M</i>	Эпицентр	Величина изменения	Время предвестника, сут	Эпицентральное расстояние, км	Примечания
Риверсайд	1974	4,1	34,0° с. ш., 117,4° з. д.		200		[481]
<i>Невязка Р-волн</i>							
Гарм, СССР	1969	5,7	39,0° с. ш., 70,3° в. д.	0,4 с (увеличение)	440	25	[492]
Мыс Мугу, США	1973	6,0	34,1° с. ш., 119,0° з. д.	1,0 с	180	10	[421]
Ниигата, Япония	1964	7,5	38,4° с. ш., 139,2° в. д.	10 с	3600	100	[328]
Мацусиро	1965— 1967	6,3	36,5° с. ш., 138,2° в. д.	0,5 с	950	0	[493]
Седдон, Новая Зеландия	1966	6,1	41,6° ю. ш., 174,3° в. д.	0,4 с	360	40	[494]
Гисборн	1966	6,2	38,6° ю. ш., 177,7° в. д.	0,4 с	550	18	[494]
<i>Анизотропия <math>V_s</math></i>							
Хр. Слейт, США	1971	4,0	39,1° с. ш., 118,2° з. д.	2,3% (увеличение $V_{SH} - V_{SV}$ )	38		Невада [124]
Мина	1971	3,9	38,4° с. ш., 118,2° з. д.	2,5 с	10		То же
<i>Вид предвестника: геомагнетизм (g)</i>							
Танабэ, Япония	1962	6,1 6,4	33,7° с. ш., 135,4° в. д.	7γ	3200	70	[443]
Ниигата	1964	7,5	38,4° с. ш., 139,2° в. д.	10—15γ	3600	40	[93]

*Вид предвестника: теллурические токи (e)*

Камчатка, СССР	1959	7,8		150 мВ/км	17	
	1965	5,8		80 мВ/км	16	
	1968	5,0		120 мВ/км	17	
	1969	5,5		100 мВ/км	20	
		5,5		90 мВ/км	13	
		4,5		70 мВ/км	10	
		4,5		50 мВ/км	10	
		4,5		50 мВ/км	8	

Данные взяты из [271]. Эпицентральные расстояния меньше 150 км. Эпицентры в море вблизи восточного побережья

	1966	4,5	Русская гавань	—	0,13	
	1968	6,0	53° с. ш., 160° в. д.	300 мВ/км	9	30
	1971	5,0	Кроноцкий залив	40 мВ/км	10	—
		5,0	Кроноцкий залив	30 мВ/км	4	—
		7,7	Кроноцкий залив	40 мВ/км	22	

Станция Кроноки [416]

[86]

Данные взяты из [415]

*Вид предвестника: электросопротивление (r)*

Район Холлистера, США	1973	3,9	36,6° с. ш., 121,2° з. д.	24‰ (уменьшение)	60	
		3,5		6‰	30	

Данные взяты из [238]

Землетрясение	Год	M	Эпицентр	Величина изменения	Время пред- вестника, сут	Эпицентрально- ное расстоя- ние, км	Примечания
Гарм, СССР	1967	4,2	39,0° с. ш., 70,3° в. д.	120/0	66		
	1968	4,3		30/0	57		
	1969	5,7		180/0	225		
		4,8		140/0	141		
	1970	4,8		120/0	180		
	1972	4,2		80/0	102		
Токати-оки, Япо- ния	1968	7,9	44,7° с. ш., 143,6° в. д.	$-7,2 \cdot 10^{-5}$ (относит. измен.)	0,096	712	Данные взяты из [29]
Центр. Сайтама	1968	6,1	36,0° с. ш., 139,4° в. д.	$1,1 \cdot 10^{-4}$	0,14	96	
У берегов Вост. Хоккайдо	1969	7,8	43,1° с. ш., 148,2° в. д.	$1,0 \cdot 10^{-4}$	0,17	1,094	
Центр. Гифу	1969	6,6	35,8° с. ш., 137,1° в. д.	$6,0 \cdot 10^{-5}$	0,050	205	
Мыс Эримо-оки	1971	7,0	41,2° с. ш., 143,7° в. д.	$-3 \cdot 10^{-5}$	0,29	780	
О. Хатидзедзима	1972	7,3	33,3° с. ш., 141,0° в. д.	$1 \cdot 10^{-5}$	0,10	252	
Токийский залив	1973	4,9	35,5° с. ш., 139,9 в. д.	$-3 \cdot 10^{-5}$	0,15	50	
Тоси-оки	1974	6,1	35,6° с. ш., 140,8° в. д.	$-3 \cdot 10^{-5}$	0,14	119	
П-ов Идзу	1974	6,9	34,6° с. ш., 138,8° в. д.	$-4 \cdot 10^{-5}$	0,17	100	

Данные взяты из  
[503]. Наблюдения проводились в Абурацубо в 60 км к югу от Токио

*Вид предвестника: содержание радона (i)*

Ташкент, СССР	1966	4	41,3° с. ш., 69,3° в. д.	14‰ (увеличение)	11	[394]
		5,2		20‰	250	[394]
		5,5		200‰	2500	[372]
	1967	—	—	—	3	
					3	
				8		
Фергана	1969	—	40,4° с. ш., 71,3° в. д.	—	7	
					4	
					13	

Данные Т. Хагивары (личное сообщение, 1974)

*Вид предвестника: подземные воды (u)*

Пржевальск, СССР	1970	—	42,5° с. ш., 78,4° в. д.	Увеличение температуры на 15°C Повышение уровня воды на 15 см	72	30	[372]
Мекеринг, Австралия	1968	6,9	32° ю. ш., 117° в. д.	Повышение на 2,9 см	0,063	110	[113]

*Вид предвестника: дебит нефтяных скважин (o)*

Суэцкий залив	1969	6,1	27,5° с. ш., 33,9° в. д.	330	100
	1971	4,8		120	100
	1972	5,1		150	100

Данные взяты из [25]

ТАБЛИЦА 15.14

## Дополнительные данные о предвестниках

Вид предвестника	Землетрясение	Год	$M$	Эпицентр	Величина изменения	Время предвестника, сут	Эпицентральное расстояние, км	Примечания
$w$	Беар-Валли, Калифорния, США	1972	5,0	36,0° с. ш., 121,2° з. д.	Увеличение на 0,3 с запаздывания $P$ -волн	54	2	[365]
Сейсмические волны <sup>a)</sup>	Хаит, около Гарма, СССР	1966	4,8	—		120		[286]
$v$	Центр. Гифу, Япония	1969	6,6	35,8° с. ш., 137,1° в. д.	Уменьшение на 20%	950	50	[251]
$w$	Гисборн, Новая Зеландия	1966	6,2	38,6° ю. ш., 177,7° в. д.	Увеличение на 0,5 с запаздывания $P$ -волн	480	20	[427]
$v$	Сидзи, пров. Нинся, Китай	1970	5,7	36,0° с. ш., 105,8° в. д.	Уменьшение на 5%	300		[88]
$w$	Сидзи, пров. Нинся, Китай	1970	5,7	36,0° с. ш., 105,8° в. д.	Уменьшение $V_p$ на 18%	300		[88]

<i>g</i>	Ситка, Аляска, США	1972	7,2	56,8° с. ш., 135,7° з. д.	Уменьшение гориз. сост. напряжен- ности на 20γ	2740	50	[491]
<i>w</i>	Беар-Валли	1974	5,3	36,6° с. ш., 121,2° з. д.	Увеличение на 0,3 с запаздывания <i>P</i> -волн	60		М. Дж. Джон- стон, личное сообщение, 1974
<i>t</i>	Беар-Валли	1974	5,3	36,6° с. ш., 121,2° з. д.	Резкое изменение азимута наклона	60		[187]
<i>g</i>	Беар-Валли	1974	5,3	36,6° с. ш., 121,2° з. д.	Увеличение на 2γ и уменьшение	60		[414]
<i>c</i>	Беар-Валли	1974	5,3	36,6° с. ш., 121,2° з. д.	Резкое изменение	60		М. Дж. Джон- стон, личное сообщение, 1974
<i>g</i>	Гарм, СССР	1974	1,5	39,0° с. ш., 70,3° в. д.	15γ		0,17	[411]

а) Отношение энергии высокочастотных сейсмических волн к энергии низкочастотных волн.

ТАБЛИЦА 15.15

Число предвестников [353]

Вид предвестника	Сокращенное обозначение	Число наблюдений
Деформации земной поверхности	<i>l</i>	19
Наклоны и деформации	<i>t</i>	84
Форшоки	<i>f</i>	73
Наклон графика повторяемости <i>b</i>	<i>b</i>	11
Микросейсмичность	<i>m</i>	3
Механизм очага	<i>s</i>	6
Аномалии крипа на разломе	<i>c</i>	2
$V_p/V_s$	<i>v</i>	27
$V_p$ и $V_s$	<i>w</i>	11
Геомагнетизм	<i>g</i>	2
Земные токи	<i>e</i>	13
Электросопротивление	<i>r</i>	17
Содержание радона	<i>i</i>	9
Подземные воды	<i>u</i>	2
Дебит нефти	<i>o</i>	3
	Итого	282

*Форшоки (f)*

О форшоках перед главным толчком сообщалось издавна, даже в те далекие времена, когда еще не велись инструментальные наблюдения. Время этого предвестника колеблется от нескольких минут до сотен дней (§ 8.3). Время предвестника определяется интервалом времени между первым замеченным толчком и главным толчком.

*Наклон графика повторяемости (b)*

Иногда сообщается об уменьшении величины константы *b* в формуле (8.1) Гутенберга—Рихтера (§ 8.3.4).

*Микросейсмичность (m)*

Иногда наблюдается уменьшение числа микроземлетрясений перед основным толчком (§ 8.3.4).

### *Механизм очага (s)*

В Гарме, СССР (§ 8.3.4), наблюдались изменения ориентации осей сжатия перед землетрясениями средней величины.

### *Аномалии крипа на разломе (c)*

Имеется несколько сообщений об изменениях скорости крипа на разломе Сан-Андреас (§ 11.1.1) перед землетрясениями.

### *Отношение $V_p/V_s$ (v)*

В ряде стран наблюдалось уменьшение отношения  $V_p/V_s$  и его восстановление до нормального значения перед землетрясениями (§ 9.1).

### *$V_p/V_s$ ( $\omega$ )*

Иногда сообщается об изменениях скорости  $V_p$  (§ 9.2) и анизотропии скорости поперечных волн (§ 9.3) в преддверии землетрясений.

### *Изменения геомагнитного поля (g)*

Из большого числа сообщений об изменениях геомагнитного поля перед землетрясениями лишь некоторые представляются достоверными (§ 10.6).

### *Теллурические токи (e)*

Эти данные взяты из наблюдений на Камчатке (§ 10.8). По-видимому, они не согласуются с данными по другим предвестникам.

### *Электросопротивление (r)*

Использованы кратковременные изменения сопротивления, наблюдаемые в Японии (§ 10.9.4), и долговременные из СССР (§ 10.9.1) и США (§ 10.9.2). Имеется значительное количество китайских данных (§ 10.9.3), но они не использованы здесь потому, что, по мнению автора, они не обладают необходимой детальностью.

### *Содержание радона (i)*

В СССР установлено изменение содержания радона в подземных водах перед землетрясением (§ 12.4).

### *Подземные воды (u)*

Имеется мало надежных данных (§ 12.2). Китайские данные, например те, которые приведены в табл. 12.1, были получены слишком поздно и не смогли быть использованы здесь.

### Дебит нефтяных скважин (*о*)

Изменения дебита нефтяных скважин перед землетрясениями наблюдались в Суэцком заливе (§ 12.3).

#### 15.5.2. Гистограммы времен предвестников

Для предвестников  $t$  (наклоны и деформации) и  $f$  (форшоки) имеется большое число наблюдений — соответственно 84 и 74. Для каждого из них построены гистограммы (в логарифмическом масштабе) времени предвестника  $\lg T$  (рис. 15.7 и 15.8). На этих рисунках логарифм времени предвестника нанесен в зависимости от магнитуд землетрясений. Разброс точек на графике таков, что невозможно обнаружить зависимость времени предвестника от магнитуды подготавливаемого землетрясения.

Однако похоже, что на гистограмме для наклонов и деформаций имеются два пика при  $\lg T = 1$  и  $\lg T = -1$ , где  $T$  измеряется в сутках. Это может навести на мысль о том, что имеются долго- и краткосрочные предвестники, хотя форшоки не обнаруживают такой тенденции.

Чтобы установить, имеются ли различия между наклонами и деформациями, наблюдаемыми с помощью приборов различ-

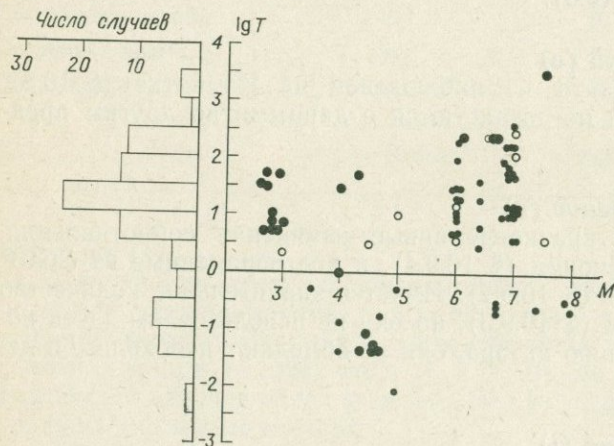


Рис. 15.7. Гистограмма данных группы  $t$  (наклоны и деформации) совместно с логарифмом времени предвестника (числа дней), нанесенным в зависимости от магнитуды последующего землетрясения. В гистограмму включены данные, для которых магнитуда неизвестна; поэтому имеется некоторое несоответствие между гистограммой и числом точек на рисунке. Большие и малые сплошные кружки и светлые кружки соответствуют данным, полученным наклономерами (скважинными и водотрубными), горизонтальными маятниковыми наклономерами и деформографами [353].

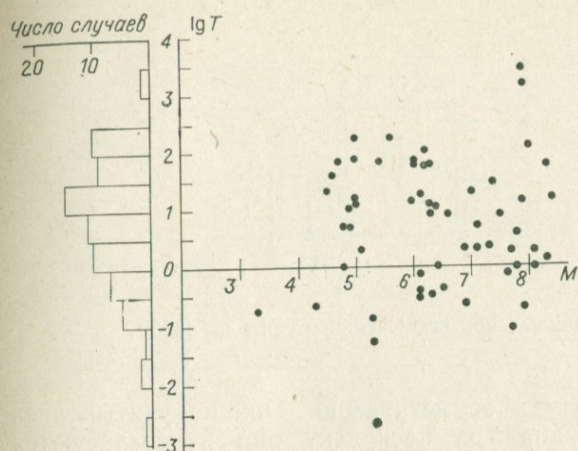


Рис. 15.8. Гистограмма данных группы  $f$  (форшоки) совместно с логарифмом времени предвестника (числа дней) в зависимости от магнитуды [353].

ных типов, данные по каждому типу прибора нанесены на рис. 15.7 большими сплошными кружками (наклонометры скважинные или водотрубные), малыми сплошными кружками (горизонтальные маятниковые наклонометры, включая пузырьковые уровнемеры) и светлыми кружками (деформографы).

Малые сплошные кружки (данные, полученные горизонтальными маятниковыми наклонометрами) характеризуются таким большим разбросом, что нельзя выявить зависимости между временем предвестника и магнитудой, как и в случае форшоков на рис. 15.8. Внимательное рассмотрение рис. 15.7 обнаруживает тенденцию к возрастанию логарифма времени предвестника с ростом магнитуды, и в то же время ряд больших сплошных кружков концентрируется в области  $\lg T = -1$ . Поэтому можно сказать, что предвестники в виде изменения наклона, зафиксированные наклонометрами, отличными от горизонтальных маятниковых, сходны по своему характеру с изменениями высот земной поверхности, выявленными геодезическими методами, и с вариациями отношения  $V_p/V_s$ , электросопротивления и т. п. (см. рис. 15.9 и 15.12). Автор полагает, что в настоящее время данные, полученные горизонтальными маятниковыми наклонометрами и деформографами, не позволяют получить каких-либо систематизированных результатов в отношении времен этих предвестников. Это относится и к форшокам, несмотря на наличие большого количества данных.

Почти все времена вариаций теллурических токов остаются постоянными и сосредоточены вблизи значения  $\lg T = 1,1$

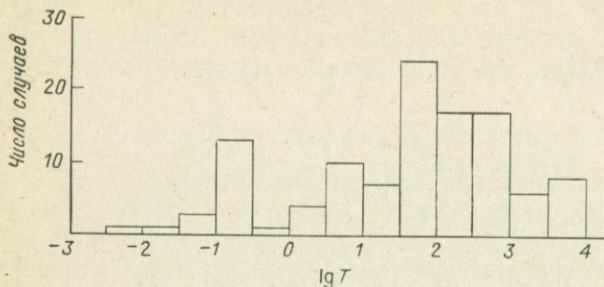


Рис. 15.9. Гистограмма данных при исключении групп  $t$  и  $f$  [353].

независимо от магнитуды землетрясения. Они не учитывались при статистическом анализе, поскольку они не согласуются с данными по другим предвестникам.

За исключением предвестников  $t$ ,  $f$  и  $e$ , предвестники всех остальных групп рассматриваются вместе. Гистограмма времен этих предвестников (общим числом 112) показана на рис. 15.9. Видно, что времена предвестников имеют два максимума: один около  $\lg T = 2$  и второй около  $\lg T = -1$ .

### 15.5.3. Гистограммы для различных диапазонов магнитуд

Чтобы более четко продемонстрировать физические характеристики предвестников, были построены гистограммы для различных интервалов магнитуд как по всем данным, так и при исключении групп  $t$ ,  $f$  и  $e$ . Результаты приведены на рис. 15.10 и 15.11. На рис. 15.10 не видно четкой зависимости времени предвестников от магнитуды. Однако рис. 15.11 ясно показывает, что с увеличением магнитуды максимум частоты смещается в сторону больших времен. Другой важной особенностью рис. 15.11 является наличие изолированного пика времени предвестника в области  $\lg T = -1$  независимо от значения магнитуды. С возрастанием магнитуды этот пик выделяется более четко.

Мы приходим к выводу, что предвестники, представленные на рис. 15.11, делятся на два типа, один из которых (тип  $A_1$ ) характеризуется малым временем, приводящим к появлению пика около  $\lg T = -1$ , а другой (тип  $A_2$ ) характеризуется временем, зависящим от значения магнитуды. В противоположность предвестникам типа  $A$  ( $A_1 + A_2$ ), трудно обнаружить какую-либо закономерность во временах предвестников видов  $t$  и  $f$ , хотя эффекты, наблюдавшиеся с помощью водотрубных

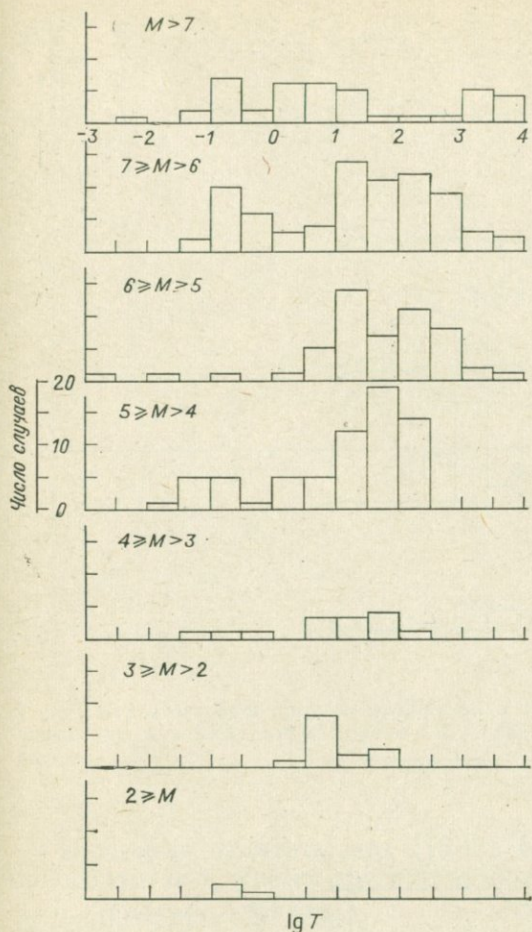


Рис. 15.10. Гистограммы логарифма времени предвестника (числа дней) для всех видов предвестников по различным интервалам магнитуд [353].

и скважинных наклономеров, в общем подобны предвестникам типа А. Если виды  $t$  и  $f$  являются предвестниками, то их можно назвать предвестниками типа В.

#### 15.5.4. Характеристики предвестников типа А

На рис. 15.12 показано время предвестника в зависимости от магнитуды для предвестников типа А. Вместо точек поставлены буквы, соответствующие принятому сокращению для видов

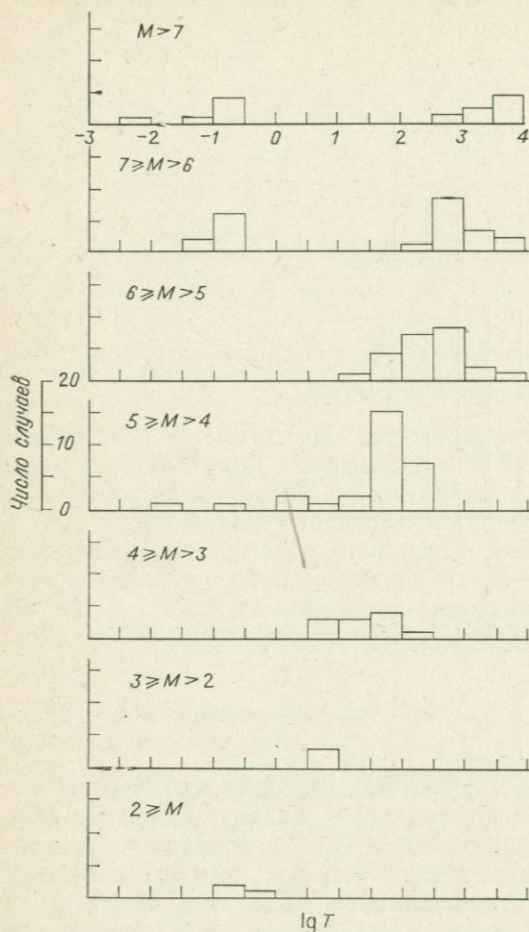


Рис. 15.11. Гистограммы логарифма времени предвестника (числа дней) для всех групп, кроме  $t$  и  $f$ , по различным интервалам магнитуд [353].

предвестников (см. § 15.5.1 и табл. 15.15). Как и следовало ожидать из рис. 15.11, данные четко разделяются на две группы.

Точки, группирующиеся в области  $\lg T = -1$  для магнитуд больше 5, относятся к типу  $A_1$ . Остальные точки, относящиеся к типу  $A_2$ , зависят от магнитуды. Прямая, проходящая через эти точки, проведена по методу наименьших квадратов и описывается соотношением

$$\lg T = 0,76M - 1,83.$$

(15.43)



0,1; 0,5 и 0,7 сут после наблюдения предвестника типа  $A_1$  составляют соответственно 1, 25 и 70%. Подобным же образом найдено, что вероятности возникновения землетрясения в течение 10, 100 и 1000 дней после наблюдения предвестника типа  $A_2$  составляют соответственно 35, 68 и 91%.

Число предвестников различных видов, приведенных в табл. 15.15, позволяет вычислить вероятность принадлежности наблюдаемого предвестника одному из типов:  $A_1$ ,  $A_2$  и В. Расчеты выполнены для следующих трех случаев:

1) данные группы  $t$  (наклоны и деформации) и  $f$  (форшоки) отнесены к типу В;

2) данные группы  $f$  отнесены к типу В;

3) аналогично (2), но данные, полученные скважинными и водотрубными наклономерами, переведены в группу данных типа А.

В табл. 15.16 приведены вероятности отнесения сигнала-предвестника к соответствующему типу. Эти вероятности, безусловно, будут уточняться по мере получения более совершенных данных в будущем. Однако уже теперь можно сказать, что около половины всех сигналов можно рассматривать как краткие или долгосрочные предвестники, относящиеся к типу  $A_1$  или  $A_2$ . Если мы наблюдаем вариации какого-либо эффекта, похожие на предвестник, мы можем полагать, что они будут предвестниками типов  $A_1$ ,  $A_2$  или В с вероятностями, приведенными в табл. 15.16.

ТАБЛИЦА 15.16

Вероятности (в %) отнесения предвестника к одному из типов [353]

	$A_1$	$A_2$	В
(1)	6	36	58
(2)	8	49	43
(3)	11	57	32

Весьма важно, что предвестники типа А подразделяются на долго- и краткосрочные. Предвестники типа  $A_2$ , видимо, обусловлены такими процессами в земной коре, как развитие дилатансии при деформациях земной коры, приближающихся к предельным значениям. С другой стороны, предвестники типа  $A_1$  могут быть тесно связаны с активизацией крипа, непосредственно предшествующей основному разрыву.

## 15.6. ЧЕТЫРЕ ЭТАПА ПРОГНОЗА ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ

Содержание рассмотренных выше разделов позволяет наметить следующую возможную процедуру прогноза.

### *15.6.1. Статистический прогноз — предварительный этап*

Когда район исследования определен и имеются данные сейсмических наблюдений за период в несколько десятилетий и более, представляется возможным произвести статистический анализ сейсмичности. В таком случае, как было показано в § 15.1, можно вычислить предварительные вероятности возникновения землетрясения определенной магнитуды в определенный интервал времени.

Эти исследования трудно использовать для предсказания конкретного будущего землетрясения в данном районе, но все описанное в § 15.1 в известной степени полезно для оценки сейсмической опасности в определенном районе.

### *15.6.2. Долговременный прогноз — стадия накопления деформаций*

В Японии, а также в штатах Калифорния и Невада в США в сейсмичных районах часто производят повторные геодезические съемки. В таком случае зачастую можно проследить накопление деформаций в земной коре после происшедшего сильного землетрясения. На этом основании вероятностная теория, разработанная по данным о предельных деформациях и описанная в § 15.3, может указать вероятность повторения сильного землетрясения.

Это нечто вроде долговременного прогноза, охватывающего интервал в несколько десятилетий. В случае завершения исследований по густой геодезической сети, как это планируется в Японии (см. § 4.2.2), можно ожидать значительного прогресса в прогнозировании подобного рода. Однако в настоящее время накопление деформаций и связанный с этим вероятностный анализ может быть использован только для прогноза землетрясений с магнитудой 7 и более в связи с недостаточной плотностью геодезической сети.

### *15.6.3. Средне- и краткосрочный прогноз — развитие дилатансии*

При организации в сейсмичном районе усиленных наблюдений, особенно в таком районе, для которого высока вероятность

землетрясения, определенная методом, описанным в предыдущем разделе, имеется достаточно оснований надеяться, что рано или поздно удастся наблюдать предвестник типа  $A_2$ , определенного в § 15.5.3 и 15.5.4.

Если наблюдается такой предвестник, как изменение отношения  $V_p/V_s$ , который возвращается к своему прежнему уровню перед основным толчком, то мы можем определить приближенное значение времени предвестника и, следовательно, магнитуду подготавливаемого землетрясения. Как было показано в § 15.2, эти значения даны в вероятностных терминах. Однако при благоприятных условиях, как утверждают Шольц и др. [394], прогноз времени землетрясения может быть почти детерминистическим.

Даже при предвестниках, не исчезающих перед землетрясением (таких, как изменение сопротивления, поднятие земной поверхности и т. п.), магнитуду будущего землетрясения с известной степенью приближения можно оценить по пространственной протяженности этих предвестников. Если магнитуда определена, то, по крайней мере в вероятностных терминах, может быть установлено время возникновения основного толчка (см. § 15.2.2).

Из соотношений между логарифмом времени предвестника и магнитудой (15.43)—(15.46) следует, что время предвестника для магнитуд 7 и 6 составляет соответственно 6—7 лет и 1—2 года. При этом в вероятностных терминах может быть произведена и оценка сейсмической опасности.

#### *15.6.4. Сверхкраткосрочный прогноз — стадия непосредственно перед основным разрывом*

Наблюдение предвестника непосредственно перед возникновением землетрясения является очень трудной задачей, но предупреждение, основанное на таком сверхкраткосрочном прогнозе, без сомнения, могло бы спасти много жизней, хотя и не все материальные ценности. Как было описано в ряде предыдущих глав этой книги, имеется много примеров аномальных отливов моря, внезапных изменений наклонов земной поверхности, электросопротивления и других явлений, происходящих непосредственно перед землетрясениями большой магнитуды. Однако большая часть таких данных носит, можно сказать, фрагментарный характер, так что автор не уверен, можно ли использовать их для прогноза землетрясений, даже если они действительно имеются.

Ситуация, по-видимому, сильно изменилась с появлением рассмотренной выше статистической сводки предвестников. Из рис. 15.12 видно и автор убежден, что мы иногда действительно

наблюдаем весьма кратковременные предвестники, названные здесь предвестниками типа  $A_1$  и появляющиеся примерно за несколько часов до землетрясения. Время этих предвестников, по-видимому, не зависит от магнитуды землетрясения. Однако, что также видно из рис. 15.11, частота наблюдения предвестников типа  $A_1$ , вероятно, возрастает с увеличением магнитуды землетрясения.

Установлено, что если наблюдается предвестник типа  $A_1$ , то вероятность возникновения землетрясения в течение нескольких часов становится достаточно большой. Причина возникновения таких кратковременных предвестников пока не ясна; как мы полагаем, в очаговой зоне будущего землетрясения может происходить крип, что особенно вероятно в случае сильных землетрясений. В силу этого для краткосрочного прогноза очень важно приложить усилия для обнаружения предвестников типа  $A_1$  в районе, где уже наблюдались предвестники типа  $A_2$ . Однако автор опасается, что в реальных условиях наблюдения таких предвестников в ряде случаев сопряжены с большими трудностями из-за естественных и искусственных шумов. Поэтому для обеспечения высокого значения отношения сигнал/шум важно проводить наблюдения предвестников различных типов. Данные по предвестникам типа  $A_1$  накапливаются исключительно быстро благодаря осуществлению программ по прогнозу землетрясений в Японии, США, СССР, Китае и других странах. Поэтому в ближайшее время можно ожидать раскрытия природы предвестников типа  $A_1$  и соответственно более успешного применения их в краткосрочном прогнозе землетрясений.

## 15.7. ИССЛЕДОВАНИЕ ОПЕРАЦИЙ ПРИМЕНИТЕЛЬНО К ПРОГНОЗУ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

Прогноз землетрясений отличается от обычных геофизических исследований тем, что при нем возникает необходимость оценивать вероятность возникновения землетрясения даже при отсутствии достаточных данных о причинной связи между предшествующими явлениями и возникновением землетрясений. Ситуация в какой-то степени аналогична военным операциям: полководец должен принимать определенные решения даже в отсутствие достаточно полной информации о передвижениях противника.

Автор подчеркивает, что в таких условиях при планировании работ по прогнозу необходимо уделить большое внимание подходу, основанному на исследованиях операций и, если необходимо, на системе типа «план—программа—финансирование». На

этом пути в Японии пока достигнуты лишь ограниченные результаты из-за трудностей в координации бюджетов различных организаций. Однако молодыми сотрудниками были проведены некоторые работы по исследованию операций применительно к прогнозу землетрясений.

### 15.7.1. Наиболее эффективные нивелировки для прогноза землетрясений в Японии

Хагивара [143] разработал метод оперативного поиска и планирования нивелирных работ на территории Японии с целью слежения за прогностическими деформациями земной коры. Предположим, что на площади  $A$  происходит аномальная деформация земной поверхности со средним радиусом  $r$ . Пусть  $\Delta L$  — длина нивелирного хода в пределах рассматриваемой площади. Тогда вероятность обнаружения деформации составит  $2r_e\Delta L/A$ , где  $r_e$  — эффективный радиус деформированной части площади  $A$ . Для получения результата нивелирной съемки длина нивелирного хода должна быть конечной, а поэтому  $r_e$  должно быть меньше  $r$ . Поскольку площадь  $A$  намного больше территории деформаций-предвестников, можно принять, что  $r_e \approx r$ . Вероятность вычисляется исходя из предположения, что аномальная деформация может быть обнаружена, когда площадь деформированной области перекрыта площадью  $\Delta L \times \times r_e$  с обеих сторон от  $\Delta L$ .

Предположим теперь, что съемка ведется вдоль нивелирного хода длины  $L$  в пределах площади  $A$ . В этом случае вероятность обнаружения деформации-предвестника равна  $2r_e L/A$ . Разбивая  $A$  на ряд зон  $A_i$  ( $i=1, 2, \dots, n$ ) и обозначая длины нивелирных ходов через  $L_i$ , имеем

$$\sum_{i=1}^n L_i = L. \quad (15.47)$$

Ожидаемое число землетрясений, которое может быть предсказано с помощью нивелирной съемки, составит

$$\tilde{N} = \sum_{i=1}^n \int_{r_S}^{r_T} N_i(r) (2r_e L_i/A) dr, \quad (15.48)$$

где  $N_i(r)$  — число землетрясений как функция  $r$ . Пределы интегрирования  $r_S$  и  $r_T$  суть радиусы деформированной области при землетрясениях соответственно минимальной и максимальной магнитуды. Их можно определить по данным о сейсмичности района, а также по формуле Гутенберга—Рихтера (8.1) совместно с уравнением (15.1). Оптимальная пропорция длины

нивелирного хода для соответствующих зон получается максимизацией  $N$  при условии (15.47).

Хагивара применил этот подход к Японским о-вам, разделенным на семь районов примерно одинаковой площади. Получились поразительные результаты: нивелирование должно быть сконцентрировано главным образом в центральной части Японии. Проведение съемок в крайних северных и южных районах, т. е. на о-вах Хоккайдо и Кюсю, малоэффективно. При проведении этого исследования сейсмичность для отдельных районов определялась по каталогу землетрясений с  $M > 6$  за 1800—1968 гг.

Данный вывод представляется разумным, если учесть малую сейсмичность о-вов Хоккайдо и Кюсю. При этом не принималось во внимание действительное распределение нивелирных ходов, а потому реальная возможность установления деформаций-предвестников будет отличаться от расчетной.

Аналогичным образом в работе [146] рассмотрено оптимальное распределение гравиметрических пунктов для целей прогноза землетрясений.

#### *15.7.2. О месте организации новой обсерватории для наблюдения за деформациями земной коры в Японии*

Симадзаки [405] на основе современного распределения сейсмичности определил вероятность наблюдения трех или более прогностических изменений деформаций в течение 5 лет на ряде гипотетических обсерваторий Японии. Предполагается, что эти изменения составляют 0,1 от полного скачка деформаций при землетрясении. Удивительно, что районы с высокой вероятностью располагаются вдоль тихоокеанского побережья северо-восточной Японии. Местоположение обсерваторий по наблюдению за деформациями земной коры до сих пор выбиралось без учета получающегося веса наблюдений. Однако накопление данных по предвестникам землетрясений может быть существенно ускорено правильным выбором мест наблюдения. На основе подобного исследования обсерваторию по наблюдению за деформациями земной коры, расположение которой ранее планировалось в 190 км к северо-востоку от Токио, рекомендовано перенести на 50 км южнее.

## АКТИВНОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ НА ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ

Несмотря на быстрое развитие сейсмологии и смежных геофизических дисциплин в последние годы, прогноз землетрясений пока остается неудовлетворительным. Это в особенности касается предсказания времени возникновения разрушительного землетрясения. Появилась идея о возможности постепенно высвобождать сейсмическую энергию, накопившуюся в земной коре. Это предотвратило бы землетрясение. Однако сомнительно, можно ли влиять таким образом на очень сильные землетрясения, например, в районе островных дуг.

Данная книга посвящена главным образом изложению вопросов прогноза землетрясений и мы лишь очень кратко опишем проблемы воздействия на возникновение землетрясений.

### 16.1. ДЕНВЕРСКИЕ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ

В 1962 г. в Арсенале Скалистых гор близ Денвера (штат Колорадо, США) в глубокую скважину закачивали используемую воду. Глубина скважины составляла 3800 м. Спустя примерно месяц после начала закачки совершенно неожиданно в этом районе стали происходить многочисленные землетрясения, хотя он в течение долгого времени был асейсмичным. Объем закачанной воды составлял примерно  $2 \cdot 10^4$  м<sup>3</sup> в месяц.

С прекращением закачки число землетрясений заметно уменьшилось, но после ее возобновления сейсмическая активность стремилась вернуться к прежнему уровню. Несмотря на полное прекращение закачки в сентябре 1969 г., землетрясения продолжали происходить. Более того, стали происходить сравнительно сильные землетрясения. Эта серия землетрясений продолжалась почти 10 лет. Суммарный объем закачанной воды составил около  $6 \cdot 10^5$  м<sup>3</sup>.

По сейсмическим наблюдениям за период с декабря 1965 г. по март 1966 г. регистрировалось 10—20 микроземлетрясений в сутки с магнитудами от отрицательных до 3,7. Эпицентры располагались в области примерно эллиптической формы дли-

ной 8 км и шириной 3 км с центром в скважине. Глубина очагов колебалась от 4,5 до 5,5 км.

Денверские землетрясения стали предметом исследования многих сейсмологов (см., например, [83, 84, 157, 312]). Ивенс выдвинул теорию, по которой эти землетрясения были вызваны закачкой воды. Он утверждал, что трение на плоскостях разрыва в земной коре уменьшается при увеличении давления в порах, так что в конце концов возникает проскальзывание, как предполагается в теории Хубберта и Руби ([166], см. § 13.1.2). Образцы, взятые из скважины, показали, что скважина была пробурена в разрывной зоне, где в земной коре несомненно было много трещин. В связи с этим Хили и др. [157] пришли к выводу: «Пространственно-временная корреляция сейсмической активности с местом и скоростью закачки в скважину указывает на явную причинную связь между землетрясениями и закачкой жидкости».

## 16.2. ЭКСПЕРИМЕНТЫ С ЗАКАЧКОЙ ВОДЫ В МАЦУСИРО

К концу самого бурного периода роя землетрясений в Мацусиро в Центральной Японии (см. § 5.6.14) из почвы выделилось большое количество минеральной воды, объемом примерно до  $10^7$  м<sup>3</sup>. Нет никакого сомнения, что эта вода имела какое-то отношение к сейсмической активности.

Национальным исследовательским центром по предотвращению стихийных бедствий [437] была пробурена скважина глубиной 1800 м у подножия горы Минаками в центре сейсмической активности на ее ранней стадии. В январе—феврале 1970 г. был проведен эксперимент по закачке воды в эту скважину. В это время уровень активности настолько понизился, что за месяц происходило только 20 ощутимых землетрясений. Общий объем закачанной воды составлял лишь 2880 м<sup>3</sup>. Вода закачивалась под давлением 14—50 бар.

Согласно сейсмическим наблюдениям [300], через 5—10 дней после закачки среднесуточное число микроземлетрясений внезапно увеличивалось примерно в 10 раз. Эпицентры этих слабых толчков находились на расстоянии 4 км от скважины и были приурочены к линии простираения разлома, появившегося в период роя землетрясений. Сначала очаги были расположены у поверхности, а с течением времени мигрировали на глубину. Кажется несомненным, что эти микротолчки были вызваны закачкой воды. Высказывалось предположение, что в непосредственной близости от скважины не происходило микроземлетрясений потому, что земная кора в этом месте была почти целиком раздроблена более ранней роевой активностью.

### 16.3. ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ И ИСКУССТВЕННЫЕ ВОДОХРАНИЛИЩА

Имеются сообщения о случаях, когда возникновение умеренно сильных и даже разрушительных землетрясений было связано с заполнением искусственных водохранилищ. Как уже отмечалось в § 8.3.2, через 5 месяцев после того, как началось заполнение водохранилища, образованного плотиной Кремаста в Греции, там стали происходить многочисленные форшоки, закончившиеся в феврале 1966 г. толчком с магнитудой 6,2 [314].

Аналогичные землетрясения, связанные с водохранилищами, происходили вблизи плотин Хувер в США [58], Монтэнар во Франции [366, 367], Кариба в Родезии [115, 116], Койна в Индии [74, 121], Синьфын в Китае [401] и других искусственных водохранилищ. Основные данные об этих случаях приведены в табл. 16.1.

ТАБЛИЦА 16.1

Искусственные водохранилища и землетрясения

Плотина	Местонахождение	Высота, м	Общий объем, $10^6$ м <sup>3</sup>	Начало заполнения	Землетрясение максимальной магнитуды	
					дата	M
Хувер (США)	36,0° с. ш., 114,7° з. д.	142	35 000	1935 г.	4/V 1939	5,0
Монтэнар (Франция)	44,9° с. ш., 5,7° в. д.	130	275	Апр. 1962 г.	25/IV 1963	4,9
Кариба (Родезия)	16,5° ю. ш., 28,8° в. д.	125	175 000	Дек. 1958 г.	23/IX 1963	6,1
Кремаста (Греция)	38,9° с. ш., 21,5° в. д.	147	4 750	Июль 1965 г.	5/II 1966	6,2
Койна (Индия)	17,4° с. ш., 73,7° в. д.	103	2 780	1962 г.	10/XII 1967	6,4
Синьфын (Китай)	23,7° с. ш., 114,7° в. д.	105	11 500	Окт. 1959 г.	19/III 1962	6,1

Землетрясения, связанные с заполнением водохранилищ, по-видимому, возникают при плотинах высотой более 100 м. Вероятно, величина полного объема воды никак не связана с возникновением землетрясений, а важна высота плотины. Представляется весьма вероятным, что вода проникает в по-

роды под напором столба воды и это приводит к возникновению землетрясений, как было в Денвере и Маусиро.

Согласно наблюдениям микроземлетрясений [136] в Центральной Японии в районе плотины Куробе ( $36^{\circ} 34'$  с. ш.,  $137^{\circ} 40'$  в. д.) высотой 186 м с максимальным объемом воды  $148,8 \cdot 10^6$  м<sup>3</sup>, была найдена отчетливая корреляция между числом микроземлетрясений и высотой уровня воды, хотя разрушительных землетрясений там не произошло. Ссылки на другие примеры можно найти в работах [122, 163, 245, 368].

#### 16.4. ЭКСПЕРИМЕНТЫ НА НЕФТЯНЫХ ПРОМЫСЛАХ РЕЙНДЖЛИ

Опыт Денвера, Маусиро и других искусственных водохранилищ позволяет предположить, что можно управлять

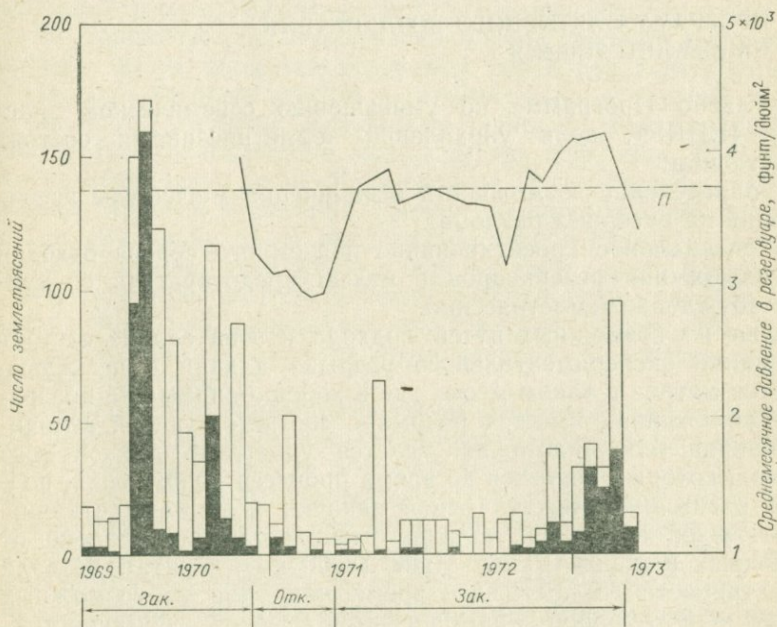


Рис. 16.1. Зависимость месячного числа землетрясений от закачки и откачки жидкости на нефтяных промыслах Рейнджли. Светлые и зачерненные столбики обозначают соответственно ежемесячное число всех землетрясений и землетрясений, происходивших в радиусе 1 км от забоя экспериментальной скважины. Пунктирной линией П обозначено пороговое значение давления, необходимое для генерации землетрясений. Давление в резервуаре показано кривой, колеблющейся около П (шкала в фунт/дюйм<sup>2</sup> справа). 1 фунт/дюйм<sup>2</sup> = 0,0703 кгс/см<sup>2</sup>. Внизу указаны периоды закачки (Зак.) и откачки (Отк.) жидкости [476].

землетрясениями путем закачки или откачки воды. NCER [159] совместно с нефтяной компанией «Шеврон» провел эксперимент по управлению землетрясениями на нефтяном месторождении Рейнджли (запад штата Колорадо, США).

На рис. 16.1 показаны изменения месячного числа микроземлетрясений, зарегистрированных на этих нефтяных промыслах 14 сейсмографами, сигналы от которых передавались в NCER (Менло-Парк, Калифорния), в зависимости от закачки или откачки воды в экспериментальной скважине глубиной около 2000 м. Видно, что землетрясения начинают происходить, когда давление закачки превосходит определенную величину, например 250 бар. Результаты экспериментов на нефтяных промыслах Рейнджли убедительно свидетельствуют о возможности управления землетрясениями путем закачки и откачки воды.

### 16.5. ПРОГРАММА АКТИВНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ

Согласно Программе по уменьшению сейсмической опасности (ENRP), цели управления землетрясениями состоят в следующем:

- 1) определение возможности ограничения магнитуды землетрясений на активных разломах;
- 2) специальное проектирование подземного сброса отходов и расположения резервуаров с целью предотвратить случайное возбуждение землетрясений.

Один из возможных путей подхода к этой задаче состоит в создании экспериментального разрыва длиной в несколько десятков метров в таком месте, где в хорошо видных на поверхности обнажениях имеется разрыв с соответствующей величиной напряжений. Возможно, удастся управлять длиной того разрыва, который появится во время процесса разрушения, подбирая расстояние между точкой закачки и точками откачки. Место таких испытаний должно быть достаточно удалено от населенных районов. Район Мина (8000 км<sup>2</sup>) в штате Невада рассматривается в настоящее время как один из возможных вариантов. Этот район характеризуется высокой сейсмичностью, хотя там никогда не происходили очень сильные землетрясения.

Если такой опыт по управлению землетрясениями когда-либо удастся, то следующим объектом станет небольшой участок разлома Сан-Андреас. В этом случае потребуется большая осторожность, чтобы не возбудить сильное землетрясение.

Вероятно, подобные средства управления землетрясениями окажутся неприменимыми в зоне субдукции океанической плиты типа Японии, где в противоположность разлому Сан-

Андреас большинство сильных землетрясений происходит под морским дном и на глубинах, недоступных для современных методов бурения. Однако даже в Японии нельзя совершенно исключить возможность управления землетрясениями, происходящими на суше, хотя в такой густонаселенной стране не легко будет осуществить подобный эксперимент.

Был также предложен гораздо более радикальный способ высвобождения энергии деформаций с помощью ядерных взрывов. После подземного ядерного взрыва «Бенхэм», произведенного в 1968 г. в штате Невада (1,1 Мт), произошли многочисленные афтершоки [6, 148, 158]. Толчки происходили на площади около  $10 \times 10$  км<sup>2</sup> с наибольшей глубиной 7 км. Магнитуды их не превышали 5. По сравнению с магнитудой самого взрыва (6,3) эти толчки были намного слабее. После взрыва появилось много разломов типа сдвига. Полагают, что часть энергии деформаций, накопленной в земной коре, высвободилась посредством землетрясений, возбужденных взрывом. Вероятно, причиной этих землетрясений было увеличение порового давления из-за движения подземных вод в результате взрыва.

Проводя ядерные взрывы в глубине зоны, в которой напряжения почти достигли критических значений, можно надеяться высвободить накопленную там энергию деформаций. В этом случае непременно произойдет сильное землетрясение с афтершоками. Однако население сможет заблаговременно подготовиться, поскольку будет предсказано точное время его возникновения. Человеческие жертвы будут в этом случае исключены, а потому лучше возбудить землетрясение этим способом, чем ждать, пока оно произойдет естественным путем, ибо время возникновения искусственно возбужденного землетрясения будет известно заранее.

Однако в настоящее время такая идея представляется чересчур фантастической. Нет никакой гарантии в том, что все будет развиваться так, как нам хотелось бы. Например, мы не знаем, что делать с радиоактивными веществами, которые могут выделиться из-под земли. Возможное управление землетрясениями с помощью закачки воды кажется более реальным, чем с помощью ядерных взрывов. Если нам удастся разработать такой способ управления землетрясениями, мы сможем лучше понять их механизм, а это приведет нас в будущем к практическому управлению сильными землетрясениями.

## КАК РЕАГИРОВАТЬ НА ПРЕДУПРЕЖДЕНИЕ О ЗЕМЛЕТРЯСЕНИИ?

Гамильтон [147] писал на страницах «Трудов Американского геофизического союза»: «В течение последнего года в США на основе вариаций времен пробега сейсмических волн были успешно предсказаны два землетрясения — одно в Нью-Йорке и другое в Калифорнии. В результате недавних исследований обнаружилось, что аналогичным методом можно было предсказать еще два толчка в центральной Калифорнии. Кроме того, на записях наклономеров, работающих с мая 1973 г. в центральной Калифорнии, были обнаружены наклоны-предвестники по меньшей мере для 10 землетрясений, происшедших вблизи местоположения этих приборов. Вероятно, возможность прогноза землетрясений уже не за горами».

По словам Гамильтона, когда в 1973 г. Геологическая служба США объявила о прогнозе землетрясения (кстати, несбывшемся), один из членов городского совета Холлистера, где было предсказано землетрясение с магнитудой 4, прежде всего задвинул подальше на полку начатую бутылку виски. В описанном случае предсказано землетрясение, которое не влечет за собой разрушений, и среди местных жителей не должно произойти серьезного волнения, особенно в таких районах, где население привыкло к землетрясениям с малыми или средними магнитудами.

Что должно делать население в случае получения надежного прогноза разрушительного землетрясения? Судя по быстрому развитию в последние годы исследований по предсказанию землетрясений, описанных в предыдущих главах этой книги, уже недалеко то время, когда станет возможным надежное предупреждение, основанное на научной оценке сейсмической опасности, по крайней мере в некоторых районах США, Японии и т. д., где проводятся интенсивные работы по обнаружению предвестников землетрясений.

Как следует реагировать на такое предсказание? Безусловно, это одна из наиболее острых проблем, стоящих перед администраторами, законодателями, геофизиками, работниками средств массовой информации и даже отдельными лицами, живущими в потенциально опасных районах. Эта проблема очень

сложна, так как при предсказании времени и магнитуды землетрясения обязательно должна учитываться возможность ошибок.

### 17.1. ОПЫТ МАЦУСИРО

Мацусирский рой землетрясений 1965—1967 гг. (см. § 4.2.1, 5.6.14) предоставил уникальную возможность организовать официальный выпуск предупреждений о землетрясениях. Предупреждения исходили от местного филиала JMA и были основаны на усиленных наблюдениях, проводимых ERI и другими организациями. Обычно они звучали следующим образом: «Не позднее чем через несколько месяцев такой-то город подвергнется воздействию землетрясения средней силы. Степень разрушений будет незначительной».

Реакция местного населения на это оповещение была самой разной и сильно зависела от характера занятий и условий жизни людей. Местные органы власти реагировали правильно: ремонтировали школьные здания, старые мосты и пр. или усиливали пожарные команды, медицинскую службу и т. д. Однако владельцы гостиниц и сувенирных магазинов были недовольны подобными предсказаниями, так как опасались потери клиентов. Местное население ни разу не впало в панику, так как предсказываемый толчок не был разрушительным и к тому же в продолжение этого роя землетрясений люди, по-видимому, уже привыкли к землетрясениям, которые одно время происходили столь часто, что за день ощущалось более 600 толчков. Автор убежден в важности приучать население к таким оповещениям, чтобы оно могло их правильно оценить. Следует подчеркнуть, что органы, ответственные за выпуск предупреждений, должны правильно выбирать время для оповещения.

### 17.2. КАКИМ ОБРАЗОМ СЛЕДУЕТ ДОВОДИТЬ ДО СВЕДЕНИЯ НАСЕЛЕНИЯ ПРЕДУПРЕЖДЕНИЕ О ЗЕМЛЕТРЯСЕНИИ?

Что будет делать местное население, если уполномоченные эксперты предскажут разрушительное землетрясение с магнитудой 7 или более в течение определенного времени (например, нескольких лет)? Если предсказанный эпицентр находится в густонаселенной местности, можно ожидать больших неурядиц. Те, кто примет такой прогноз всерьез, захотят уехать, если это возможно, но другие, которые никогда не испытывали сильного землетрясения, не примут предупреждение всерьез.

Поскольку многие люди живут недалеко от места работы, тесно связанной с данной местностью, их будет трудно

эвакуировать на длительное время. Если для безопасности потребуется остановить атомные электростанции, доменные печи, нефтеперерабатывающие заводы и другие предприятия тяжелой индустрии или прервать работу общественного транспорта, убытки будут грандиозны. При объявлении прогноза землетрясения должна учитываться возможная ошибка времени возникновения, которая для землетрясения с магнитудой 7, вероятно, может колебаться от нескольких месяцев до года. В связи с этим представляется почти невозможной полная остановка тех предприятий, которые подвергнутся опасности во время сильного землетрясения.

Никакой местный орган власти не имеет полномочий для управления промышленными предприятиями таким образом, как описано в предыдущем абзаце. Даже если бы это было возможно, эти предприятия потребуют от правительства возмещения своих убытков. Поскольку в обозримом будущем прогноз не будет совершенным, такие требования компенсации вызовут бесконечные споры, особенно в случае несбывшегося прогноза. Вначале прогнозы почти наверняка часто не будут сбываться, хотя они могут и не быть полной неудачей в научном смысле. В таком случае специалистам, сделавшим прогноз, придется отказаться от своих должностей, так что скоро вообще не останется специалистов по прогнозу землетрясений.

Несмотря на указанные выше недостатки, автор полагает, что предупреждение о землетрясении следует всегда доводить до сведения населения. Как стало ясно во время Маусирского роя, национальным и местным органам власти следует многое сделать в связи с угрозой землетрясения. Очень важно укрепить школьные здания, больницы и пр. Следует осмотреть слабые места дорог, гидротехнических сооружений и т. п. Если поблизости имеются водохранилища, следует принять особые меры для их безопасности. Чрезвычайно важны также меры предосторожности от возможных оползней. В безопасном месте необходимо создать аварийные запасы продовольствия. Следует обратить внимание на работу радио и проволочных средств связи. Таким образом, правительственным органам предстоит большая работа.

В известной мере то же самое относится к частным предприятиям и отдельным лицам. Они должны подготовить аварийные запасы: пищу, воду, одежду, огнетушители, портативные радиоустройства, ручные фонари и т. д. Они также должны быть готовы при необходимости заблаговременно отремонтировать свои здания и дома.

Быть может, написанное в этом разделе плохо систематизировано. Это просто отрывочные предложения, которые возникли из собственного опыта автора в отношении разрушительных

землетрясений прошлого. Автор хотел бы предложить провести исследование на тему: «Прогноз землетрясений и реакция населения». В Японии проводилось социально-психологическое изучение поведения людей во время разрушительного землетрясения, но до сих пор никогда не предпринималось научное исследование в этом направлении.

### 17.3. СОЦИАЛЬНО-ЭКОНОМИЧЕСКИЕ И ПОЛИТИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ РЕАКЦИИ ЛЮДЕЙ НА ПРОГНОЗ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

В 1974 г. автор узнал от проф. Дж. Хааса (Университет штата Колорадо), что в США собираются проводить исследования по темам: «Технико-экономические следствия прогноза землетрясений» (Станфордский научно-исследовательский институт) и «Социально-экономические и политические последствия прогноза землетрясений» (Университет штата Колорадо). Результатом этих исследований должна быть подготовка рекомендаций для законодательных и административных органов о мероприятиях в случае надежного прогноза разрушительного землетрясения. Автор полагает, что такие исследования очень своевременны, и с нетерпением ждет их результатов.

При проведении таких исследований различные организации и отдельные лица должны подробно ответить на ряд вопросов, касающихся их реакции на опубликование прогноза землетрясения.

Допустим, предсказано разрушительное землетрясение, такое, как произошло в Сан-Фернандо в 1971 г. ( $M=6,4$ ). При этом делаются запросы с целью определить наиболее вероятную реакцию представителей ста или более общественных организаций и частных учреждений Калифорнии. К ним относятся городской совет, полиция, департаменты: пожарный, больниц, водного снабжения, канализации, улиц, газоснабжения, электричества, телефонной связи, школ, общественных работ, а также производственные фирмы, магазины, фирмы по продаже недвижимости, банки и строительные организации.

Опросы в районе Сан-Фернандо, где в 1971 г. население испытало разрушительное землетрясение, представляют особый интерес для таких исследований, ибо ответы на вопросники в районе, никогда не подвергавшихся действию разрушительного землетрясения, могут быть и нереалистичными. В районе Сан-Фернандо в организации будут направлены вопросы такого рода: если бы землетрясение 1971 г. было предсказано за 9 месяцев, 2 года и 5 лет, что бы вы предприняли для предотвращения ущерба от него? Если бы в настоящее время был опубликован надежный прогноз подобного землетрясения, как вы

поступили бы в этом случае? Как повлияли бы на ваши действия меры, принятые другими организациями?

Вероятная реакция граждан на прогноз землетрясения будет интенсивно изучаться в двух районах Калифорнии, выбранных согласно предложениям сейсмологов. Автор позволит себе процитировать здесь мини-сценарий такого исследования, предложенный профессором Хаасом и его коллегами в следующем виде.

«После весьма тщательного научного исследования и оценки эксперты предсказали землетрясение с магнитудой 6,6 по шкале Рихтера (т. е. примерно такое же, как землетрясение 1971 г. в Сан-Фернандо), которое должно произойти не позднее чем через 36 месяцев, считая от настоящего момента ( $\pm$  один месяц). Эпицентр землетрясения будет расположен в пределах вашего города. Ученые считают, что 20% города подвергнется серьезным разрушениям, 50% — разрушениям средней силы, а остальная часть испытает незначительные разрушения.

Радио, телевидение и газеты будут подробно освещать прогноз и очень скоро познакомят население с оценками будущих разрушений. Пока не ясно, какую помощь можно ожидать от федерального правительства и правительства штата.

Страховые компании договорились временно прекратить продажу всего имущества в вашем районе, застрахованного от землетрясений. Крупные банки и акционерные общества штата (в том числе в вашем районе) сохраняют полное молчание относительно своих планов. Они высказались в том смысле, что будут вкладывать свои деньги с минимальным риском для себя. Строители будут заканчивать здания и сооружения, находящиеся в процессе строительства, но не будут начинать новых построек. Агенты по продаже недвижимости в вашем городе будут поощрять своих местных клиентов при обсуждении их планов иметь в виду соседние графства.

Ожидается, что безработица в вашем районе возрастет. Филиалы крупных универмагов планируют сокращение персонала посредством перехода к системе самообслуживания.

Управление по оказанию неотложной помощи при губернаторе штата готово оказать техническое содействие вашему городу для подготовки к землетрясению. Однако, по всей видимости, это на 6—7% увеличит налоги, собираемые городом, для оплаты расходов по укреплению ветхих общественных зданий, координации пожарной помощи между отдельными округами и подготовке эвакуации школьников из городских школ в школы в соседних местностях по мере приближения момента землетрясения.

Местные организации Красного креста, Армии спасения и больницы здесь и в других округах пересматривают свои планы оказания экстренной помощи.

Большинство местных бизнесменов говорят, что пока они будут продолжать работать по-прежнему, но закроют свои предприятия с приближением момента землетрясения (либо на длительные каникулы, либо для принятия мер по защите своих вкладов)».

Вопросы, сопровождающие этот сценарий, могут быть такими:

- 1) Собираетесь ли вы уезжать на время землетрясения?
- 2) Имеются ли у вас возражения против отправки ваших детей в другие школы?
- 3) Будете ли вы делать какие-либо изменения в конструкции вашего дома с целью уменьшить возможный ущерб?

Ответы на вопросники, поступившие от организаций и отдельных лиц, будут обобщаться и снова направляться этим организациям и лицам с просьбой сообщить дополнительные соображения о своих будущих действиях в случае опубликования прогноза. Повторение таких исследований поможет получить более реалистичные ответы. Таким образом можно будет определить наиболее вероятную реакцию местного населения на прогноз землетрясения. Такие сведения, безусловно, сильно помогут административным и законодательным органам решить вопрос о наиболее разумной программе действий в случае опубликования прогноза.

Если в течение нескольких лет эти исследования будут закончены, то мы будем иметь путеводную нить для определения реакции населения на прогноз землетрясения. Эти реакции в разных странах могут быть различными и будут в значительной степени определяться национальными особенностями, экономическими условиями и некоторыми другими факторами. Поэтому автор надеется, что подобные исследования будут проведены в возможно большем числе сейсмичных стран.

1. *Abdullabekov K. N., Bezuglaya L. S., Golovkov V. P., Skovorodkin Y. P.*, On the possibility of using magnetic methods to study tectonic processes, *Tectonophysics*, **14**, 257 (1972).
2. *Aggarwal Y. P., Sykes L. R., Armbruster J., Sbar M. L.*, Premonitory changes in seismic velocities and prediction of earthquakes, *Nature*, **241**, 101 (1973).
3. *Aggarwal Y. P., Sykes L. R., Simpson D. W., Richards P. G.*, Spatial and temporal variations in  $t_s/t_p$  and in P-wave residuals at Blue Mountain Lake, New York: application to earthquake prediction, *J. Geophys. Res.*, **80**, 718 (1975).
4. *Aki K.*, Some problems in statistical seismology, *Zisin (J. Seismol. Soc. Japan)*, Ser. 2, **8**, 205 (in Japanese) (1956).
5. *Aki K.*, Seismicity and seismological method, *Tectonophysics*, **6**, 41 (1968).
6. *Aki K.*, Recent results on the mechanism of earthquakes with implications for the prediction and control program, *Tectonophysics*, **14**, 227 (1972).
7. *Aki K., Defazio T., Reasenber P., Nur A.*, An active experiment with earthquake faults for an estimation of the in situ stress, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, **60**, 1315 (1970).
8. *Alewine, III, R. W., Heaton T. H.*, Tilts associated with the Pt. Mugu earthquake. In: *Kovach R. L. and Nur A.* (editors), *Proceedings of the Conference on Tectonic Problems on the San Andreas Fault System*, Stanford Univ. Publ., *Geol. Sci.*, **13**, 94 (1973).
9. *Allredge L. R.*, Instruments and geomagnetic stations. In: *Matsushita S., Campbell W. H.* (editors), *Physics of Geomagnetic Phenomena*, Academic Press, New York, **1**, 29 (1967).
10. *Allen C. R.*, Transcurrent fault in continental areas, *Phil. Trans. R. Soc.*, Ser. A, **258**, 82 (1965).
11. *Allen C. R., Helmberger D. V.*, Search for temporal changes in seismic velocities using large explosions in Southern California. In: *Kovach R. L., Nur A.* (editors), *Proceedings of the Conference on Tectonic Problems on the San Andreas Fault System*, Stanford Univ. Publ., *Geol. Sci.*, **13**, 436 (1973).
12. *Allen C. R., Smith S. W.*, Pre-earthquake and post-earthquake surficial displacements, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **56**, 966 (1966).
13. *Allen C. R., Amand P. S., Richter C. F., Nordquist J. M.*, Relationship between seismicity and geologic structure in the southern California region, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, **55**, 753 (1965).
14. *Alsop L. E., Oliver J. E.* (editors), *Joint U. S.—Japan conference: premonitory phenomena associated with several recent earthquakes and related problems*, *EOS (Trans. Am. Geophys. Union)*, **50**, 376 (1969).
15. *Альгаузен Н. М., Барсуков О. М.*, О временных вариациях электропроводности, сб. «Физические основания поисков методов прогноза землетрясений», отв. ред. акад. М. А. Садовский, «Наука», М., 1970.
16. *Ambraseys N. N.*, Some characteristic features of the Anatolian fault zone, *Tectonophysics*, **9**, 143 (1970).

17. *Anderson D. L.*, Accelerated plate tectonics, *Science*, **187**, 1077 (1975).
18. *Anderson D. L.*, *Whitcomb J. H.*, The dilatancy diffusion model of earthquake prediction. In: *Kovach R. L.*, *Nur A.* (editors), Proceedings of the Conference on Tectonic Problems on the San Andreas Fault System, Stanford Univ. Publ., Geol. Sci., **13**, 417 (1973).
19. *Anderson D. L.*, *Minster B.*, *Cole D.*, The effect of oriented cracks on seismic velocities, *J. Geophys. Res.*, **79**, 4011 (1974).
20. *Ando M.*, A fault-origin model of the great Kanto earthquake of 1923 as deduced from geodetic data, *Bull. Earthquake Res. Inst.*, Univ. Tokyo, **49**, 19 (1971).
21. *Ando M.*, Faulting in the Mikawa earthquake of 1945, *Tectonophysics*, **22**, 173 (1974).
22. *Ando M.*, Seismo-tectonics of the 1923 Kanto earthquake, *J. Phys. Earth*, **22**, 263 (1974).
23. *Ando M.*, Possibility of a major earthquake in the Tokai district, Japan and its pre-estimated seismotectonic effects, *Tectonophysics*, **25**, 69 (1975).
24. *Анциферов М. С.*, О возможностях геоакустического прогноза местных землетрясений. Труды 3-го Всесоюзного симпозиума по сейсмическому режиму (3—7 июня 1968 г.), ч. II, Новосибирск, 1969, стр. 128—141.
25. *Arieh E.*, *Merzer A. M.*, Fluctuations in oil flow before and after earthquakes, *Nature*, **247**, 534 (1974).
26. *Bakun W. H.*, *Steward R. M.*, *Tocher D.*, Variations in  $V_p/V_s$  in Bear Valley in 1972. In: *Kovach R. L.*, *Nur A.* (editors), Proceedings of the Conference on Tectonic Problems on the San Andreas Fault System, Stanford Univ. Publ., Geol. Sci., **13**, 453 (1973).
27. *Барсуков О. М.*, Variations of electric resistivity of mountain rocks connected with tectonic causes, *Tectonophysics*, **14**, 273 (1972).
28. *Барсуков О. М.*, Поиски электрических критериев прогноза землетрясений. Сб. «Экспериментальная сейсмология», отв. ред. акад. М. А. Садовский, М., «Наука», 1971.
29. *Барсуков О. М.*, Вариации электросопротивления горных пород и землетрясения. Сб. «Предвестники землетрясений», Деп. № 5498-73, М., 1973.
30. *Барсуков О. М.*, *Сорокин О. Н.*, Изменения кажущегося сопротивления горных пород в Гармском сейсмоактивном районе, *Изв. АН СССР, Физика Земли*, № 10, 100 (1973).
31. *Барсуков О. М.*, *Краснюк П. Д.*, *Листов Н. А.*, *Сорокин О. Н.*, Ориентировочная оценка размеров зоны подготовки землетрясения по измерению электрического сопротивления горного массива. Сб. «Предвестники землетрясений», Деп. № 5498-73, М., 1973.
32. *Báth M.*, Earthquake prediction, *Scientia (Milan)*, Mai—Juin, 1 (1966).
33. *Beaumont C.*, *Berger J.*, Earthquake prediction: modification of the earth tide tilts and strains by dilatancy, *Geophys. J.*, **39**, 111 (1974).
34. *Bendefy L.*, Elastic, plastic and permanent deformations of the earth's crust in connection with earthquake, *Proc. 2nd Int. Symp. on Recent Crustal Movements*, Helsinki, 1966, p. 57.
35. *Benioff H.*, A linear strain seismograph, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, **25**, 238 (1935).
36. *Benioff H.*, Fused quartz estensometer for secular, tidal, and seismic strains, *Geol. Soc. Am. Bull.*, **70**, 1019 (1959).
37. *Berger J.*, Some observations of the San Fernando, California earthquake with a laser strain meter, *The San Fernando, California, Earthquake of February 9, 1971*, U. S. Geol. Survey, Prof. Paper No. 733, 1971, p. 150.
38. *Berger J.*, Application of laser techniques to geodesy and geophysics. In: *Landsberg H. E.*, *van Miegheem J.* (editors), *Advances in Geophysics*, Academic Press, New York, **16**, 1973, p. 1.
39. *Bolt B. A.*, Earthquake studies in the People's Republic of China, *EOS (Trans. Am. Geophys. Union)*, **55**, 108 (1974).

40. *Bourcius G. M. B., Earnshaw K. B.*, Results of field testing a two-length optical distance-measuring instrument, *J. Geophys. Res.*, **79**, 3015 (1974).
41. *Boyes W. S.*, Horizontal and vertical crustal movement in the Inangahua earthquake of 1968, *Bull. R. Soc. New Zealand*, **9**, 61 (1971).
42. *Brace W. F.*, Current laboratory studies pertaining to earthquake prediction, *Tectonophysics*, **6**, 75 (1968).
43. *Brace W. F., Orange A. S.*, Electrical resistivity changes in saturated rock under stress, *Science*, **153**, 1529 (1966).
44. *Brace W. F., Orange A. S.*, Electrical resistivity changes in saturated rocks during fracture and frictional sliding, *J. Geophys. Res.*, **73**, 1433 (1968).
45. *Brace W. F., Orange A. S.*, Further studies of the effects of pressure on electrical resistivity of rocks, *J. Geophys. Res.*, **73**, 5407 (1968).
46. *Brace W. F., Orange A. S., Madden T. R.*, The effect of pressure on the electrical resistivity of water-saturated crystalline rocks, *J. Geophys. Res.*, **70**, 5669 (1965).
47. *Brace W. F., Paulding (Jr.) B. W., Scholz C. H.*, Dilatancy in the fracture of crystalline rocks, *J. Geophys. Res.*, **71**, 3939 (1966).
48. *Brady B. T.*, Theory of earthquakes, 1. A scale independent theory of rock failure, *Pure Appl. Geophys.*, **112**, 701 (1974).
49. *Breiner S.*, Piezomagnetic effect at the time of local earthquakes, *Nature*, **202**, 790 (1964).
50. *Breiner S.*, The Piezomagnetic Effect in Seismically Active Areas (Thesis, Stanford Univ.), Stanford, Calif., 1967.
51. *Bronson W.*, The Earth Shook, the Sky Burned, Pocket Books, New York, 1971.
52. *Brown R.*, Precursory changes in  $V_p/V_s$  before strike-slip events. In: *Kovach R. L., Nur A.* (editors), Proceedings of the Conference on Tectonic Problems on the San Andreas Fault System, Stanford Univ. Publ. Geol. Sci., **13**, 463 (1973).
53. *Brune J. N., Allen C. R.*, A microearthquake survey of the San Andreas fault system in southern California, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, **57**, 277 (1967).
54. *Bufe C. G.*, Frequency-magnitude variations during the 1970 Danville earthquake swarm, *Earthquake Notes*, **41**(3), 3 (1970).
55. *Bufe C. G., Bakun W. H., Tocher D.*, Geophysical studies in the San Andreas fault zone at the Stone Canyon Observatory, California. In: *Kovach R. L., Nur A.* (editors), Proceedings of the Conference on Tectonic Problems on the San Andreas Fault System, Stanford Univ. Publ., Geol. Sci., **13**, 86 (1973).
56. *Byerlee J. D.*, Frictional characteristics of granite under high confining pressure, *J. Geophys. Res.*, **72**, 3639 (1967).
57. *Caloi P., Spadea M. C.*, Prime indicazioni di registrazioni clinografiche ottenute in zona ad elevata sismicità, *Ann. Geof.*, **8**, 121 (1955).
58. *Carder D. S.*, Seismic investigations in the Boulder Dam area, 1940—1944, and the influence of reservoir loading and local activity, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, **35**, 175 (1945).
59. *Castle R. O., Alt J. N., Savage J. C., Balazs E. I.*, Elevation changes preceding the San Fernando earthquake of February 9, 1971, *Geology*, **2**, 61 (1974).
60. *Chapman S., Bartels J.*, Geomagnetism, Oxford Univ. Press, London, 1940.
61. *Chen P. S., Lin P. H.*, An application of statistical theory of extreme values to moderate and long interval earthquake prediction, *Acta Geophys. Sinica*, **16**, 6 (in Chinese) (1973).
62. *Chinnery M. A.*, The deformation of the ground around surface faults, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, **51**, 355 (1961).
63. *Coe R. S.*, Earthquake prediction program in the People's Republic of China, *EOS (Trans. Am. Geophys. Union)*, **52**, 940 (1971).

64. Cook K. L., Granite Mountain records vault 15 miles south of Salt Lake City, Utah (Report presented to the 4th U. S.—Japan Conference on Earthquake Prediction), 1973.
65. Cox A., Doell R. R., Dalrymple G. B., Reversals of the earth's magnetic field, *Science*, **144**, 1537 (1964).
66. Dambara T., Vertical movements of the earth's crust in relation to the Matsushiro earthquake, *J. Geod. Soc. Japan*, **12**, 18 (in Japanese) (1966).
67. Dambara T., Crustal movements before, at and after the Niigata earthquake, *Rep. Coord. Comm. Earthquake Prediction*, **9**, 93 (in Japanese) (1973).
68. Dambara T., A method of adjustment of the secondary geodetic net, and horizontal displacements in Tanna and Yamakita areas, *J. Geod. Soc. Japan*, in press (in Japanese) (1975).
69. Davis P. M., The piezomagnetic computation of magnetic anomalies due to ground loading by a man-made lake, *Pure Appl. Geophys.*, in press (1975).
70. Davis P. M., Stacey F. D., Geomagnetic anomalies caused by a man-made lake, *Nature*, **240**, 348 (1972).
71. Defazio T. L., Aki K., Alba J., Solid earth tide and observed change in the in situ seismic velocity, *J. Geophys. Res.*, **78**, 1319 (1973).
72. Department of Geodesy and Geophysics, Annual Report 1972—73, Univ. of Cambridge, Cambridge, 1973.
73. Derr J. S., Earthquake lights: a review of observations and present theories, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, **63**, 2177 (1973).
74. Dutta T. K., A note on the source parameter of the Koynanagar earthquake of 10th December 1967, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, **59**, 935 (1969).
75. Earthquake Research Institute, Changes in the total geomagnetic intensity before and after the Southeast Akita earthquake, *Rep. Coord. Comm. Earthquake Prediction*, **5**, 22 (1971).
76. Eisler J. D., Investigation of a method for determining stress accumulation at depth, 1, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, **57**, 891 (1967).
77. Eisler J. D., Investigation of a method for determining stress accumulation at depth, 2, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, **59**, 43 (1969).
78. Environmental Science Services Administration, E. S. S. A. Symposium on Earthquake Prediction, U. S. Dept of Commerce, Washington, D. C., 1966.
79. Environmental Science Services Administration, The Prince William Sound, Alaska, Earthquake of 1964 and Aftershocks, Vol. 1, U. S. Government Printing Office, Washington, D. C., 1966.
80. Environmental Science Services Administration, The Prince William Sound, Alaska, Earthquake of 1964 and Aftershocks, Vol. 2, U. S. Government Printing Office, Washington, D. C., 1969.
81. Environmental Science Services Administration, The Prince William Sound, Alaska, Earthquake of 1964 and Aftershocks, Vol. 3, U. S. Government Printing Office, Washington, D. C., 1969.
82. Epstein B., Lomnitz C., A model for the occurrence of large earthquakes, *Nature*, **211**, 954 (1966).
83. Evans D. M., Man-made earthquakes in Denver, *Geotimes*, **10**(9), 11 (1966).
84. Evans D. M., Man-made earthquakes — a progress report, *Geotimes*, **12**(6), 19 (1967).
85. Evison F. F., Seismogenesis, *Tectonophysics*, **9**, 113 (1970).
86. Fedotov S. A., Dolbilkina N. A., Morozov V. N., Myachkin V. I., Preobrazhensky V. B., Sobolev G. A., Investigation on earthquake prediction in Kamchatka, *Tectonophysics*, **9**, 249 (1970).
87. Fedotov S. A., Gusev A. A., Boldyrev S. A., Progress of earthquake prediction in Kamchatka, *Tectonophysics*, **14**, 279 (1972).

88. *Feng T. Y., Tan A. N., Wang K. F.*, Velocity anomalies of seismic waves from near earthquakes and earthquake prediction, *Acta Geophys. Sinica*, **17**, 84 (1974) (in Chinese).
89. *Fiedler B. G.*, Local *b*-values related to seismicity, *Tectonophysics*, **23**, 277 (1974).
90. *Fisher R. A.*, Tests of significance in harmonic analysis. In: *Fisher R. A.*, *Contributions to Mathematical Statistics*, Wiley and Sons, New York, 1950, pp. 53—59.
91. *Fitch T. J., Scholz C. H.*, Mechanism of underthrusting in southwest Japan: a model of convergent plate interactions, *J. Geophys. Res.*, **76**, 7260 (1971).
92. *Freiberger W. F.*, *The International Dictionary of Applied Mathematics*, D. van Nostrand, Princeton, N. J., 1960.
93. *Fujita N.*, The magnetic disturbances accompanying the Niigata earthquake, *J. Geod. Soc. Japan*, **11**, 8 (1965) (in Japanese).
94. *Fujita N.*, Vertical movements of Miura Peninsula, *Rep. Coord. Comm. Earthquake Prediction*, **5**, 36 (1971) (in Japanese).
95. *Fujita N., Fujii Y.*, Gravity change in Japan, *J. Geod. Soc. Japan*, **20**, 77 (1974).
96. *Garland G. D.*, *Introduction to Geophysics—Mantle, Core and Crust*, W. B. Saunders, Philadelphia, Pa., 1971.
97. Geoelectric Division, Lanchou, Seismology Brigade, *Changes of Strain-Resistivity before Earthquakes*, Publication of Lanchou Seismology Brigade, Lanchou, 1974.
98. Geographical Survey Institute, Resurvey of the southwestern part of Japan after the great Nankaido earthquake of 1946, *J. Geogr. Surv. Inst. Japan*, **3**, 31 (1952).
99. Geographical Survey Institute. Resurvey of the southwestern part of Japan after the great Nankaido earthquake of 1946, *J. Geogr. Surv. Inst. Japan*, **4**, 1 (1954).
100. Geographical Survey Institute, *Index Maps of Precise Leveling for Every Observation Year*, Tokyo, 1967.
101. Geographical Survey Institute, Crustal activities in Boso and Miura Peninsula region, *Rep. Coord. Comm. Earthquake Prediction*, **1**, 25 (1969) (in Japanese).
102. Geographical Survey Institute, Vertical crustal movements in the Tokai district, *Rep. Coord. Comm. Earthquake Prediction*, **2**, 49 (1969) (in Japanese).
103. Geographical Survey Institute, Crustal movement in eastern part of Hokkaido district, *Rep. Coord. Comm. Earthquake Prediction*, **8**, 1 (1972) (in Japanese).
104. Geographical Survey Institute, Recent crustal movement in South Kanto district, *4. Rep. Coord. Comm. Earthquake Prediction*, **8**, 23 (1972) (in Japanese).
105. Geographical Survey Institute, Deformations of Mitaka rhombus line, *Rep. Coord. Comm. Earthquake Prediction*, **8**, 32 (1972) (in Japanese).
106. Geographical Survey Institute, G.D.P. traverse survey of high precision in eastern part of Hokkaido and Kanto-Hokuriku district, *Rep. Coord. Comm. Earthquake Prediction*, **9**, 127 (1973) (in Japanese).
107. Geographical Survey Institute, G.D.P. traverse survey of high precision in northeastern part of Japan, *Rep. Coord. Comm. Earthquake Prediction*, **11**, 60 (1974) (in Japanese).
108. Geographical Survey Institute, Precise strain measurements in Yamakita and Tanna regions, *Rep. Coord. Comm. Earthquake Prediction*, **11**, 94 (1974) (in Japanese).
109. Geographical Survey Institute, G.D.P. traverse survey of high precision in Chubu and Tokai districts, *Rep. Coord. Comm. Earthquake Prediction*, **11**, 107 (1974) (in Japanese).

110. Geographical Survey Institute, G.D.P. traverse survey of high precision in Kyushu district, Rep. Coord. Comm. Earthquake Prediction, 11, 123 (1974) (in Japanese).
111. Geological Survey of Japan, Measurements on the time variation of seismic wave velocities by explosion-seismic method (the results of the fifth experiment), Rep. Coord. Comm. Earthquake Prediction, 8, 46 (1972) (in Japanese).
112. Geological Survey of Japan, Neotectonic Map Tokyo, Tokyo, 5 sheets, 1973.
113. *Gordon F. R.*, Water level changes preceding the Meckering, Western Australia, earthquake of October 14, 1968, Bull. Seismol. Soc. Am., 60, 1739 (1970).
114. *Gordon F. R.*, Faulting during the earthquake at Meckering, Western Australia, 14 October 1968, Bull. R. Soc. New Zealand, 9, 85 (1971).
115. *Gough D. I., Gough W. I.*, Stress and deflection in the lithosphere near Lake Kariba, 1, Geophys. J., 21, 65 (1970).
116. *Gough D. I., Gough W. I.*, Load-induced earthquakes at Lake Kariba, 2, Geophys. J., 21, 79 (1970).
117. *Gouin P.*, Coincidence of magnetic disturbances with local earthquakes recorded from the Ethiopian rift system, Nature, 208, 541 (1965).
118. *Greensfelder R. W., Bennett J. H.*, Characteristics of strain variation along the San Andreas fault from geodimeter measurements. In: *Kovach R. L., Nur A.* (editors), Proceedings of the Conference on Tectonic Problems on the San Andreas Fault System, Stanford Univ. Publ., Geol. Sci., 13, 54 (1973).
119. *Griggs D. T., Jackson D. D., Knopoff L., Shreve R. L.*, Earthquake prediction: modelling the anomalous  $V_p/V_s$  source region, Science, 187, 537 (1975).
120. *Gumbel E. J.*, Statistics of extremes, Columbia Univ. Press, New York, 1962. (Русский перевод: *Гумбель Э.*, Статистика экстремальных значений, М., «Мир», 1965.)
121. *Gupta H., Narain H., Rastogi B. K., Mohan I.*, A study of the Koyna earthquake of December 10, 1967, Bull. Seismol. Soc. Am., 59, 1149 (1969).
122. *Gupta H. K., Rastogi B. K., Narain H.*, Earthquakes in the Koyna region and common features of the reservoir-associated seismicity. In: *Ackermann W. C., White G. F., Worthington E. B.* (editors), Man-Made Lakes: Their Problems and Environmental Effects, Am. Geophys. Union, Geophys. Monogr., 17, 455 (1973).
123. *Gupta I. N.*, Premonitory changes in shear velocity anisotropy in Nevada. In: *Kovach R. L., Nur A.* (editors), Proceedings of the Conference on Tectonic Problems on the San Andreas Fault System, Stanford Univ. Publ., Geol. Sci., 13, 479 (1973).
124. *Gupta I. N.*, Premonitory variations in S-wave velocity anisotropy before earthquakes in Nevada, Science, 182, 1129 (1973).
125. *Gupta I. N.*, Dilatancy and premonitory variations of P, S travel times, Bull. Seismol. Soc. Am., 63, 1157 (1973).
126. *Gupta I. N.*, Seismic velocities in rock subjected to axial loading up to shear fracture, J. Geophys. Res., 78, 6936 (1973).
127. *Gupta I. N.*, Precursory reorientation of stress axes due to vertical migration of seismic activity? J. Geophys. Res., 80, 272 (1975).
128. *Gutenberg B., Richter C. F.*, Frequency of earthquakes in California, Bull. Seismol. Soc. Am., 34, 185 (1944).
129. *Gutenberg B., Richter C. F.*, Seismicity of the Earth and Associated Phenomena, Princeton Univ. Press, Princeton, 2nd ed., 1954. (Русский перевод: *Гутенберг Б., Рихтер К. Ф.*, Сейсмичность Земли, ИЛ, М., 1948.)

130. *Gutenberg B., Richter C. F.*, Magnitude and energy of earthquakes, *Ann. Geophys.*, **9**, 1 (1956).
131. *Hagiwara T.*, Observation of changes in the inclination of the earth's surface at Mt. Tsukuba (3rd report), *Bull. Earthquake Res. Inst., Univ. Tokyo*, **25**, 27 (1947).
132. *Hagiwara T.*, Earthquake prediction, *Kagaku*, **32**, 367 (1962) (in Japanese).
133. *Hagiwara T.* (editor), Proceedings of the United States—Japan Conference on Research Related to Earthquake Prediction Problems, Earthquake Research Institute, Univ. of Tokyo, Tokyo, 1964.
134. *Hagiwara T.*, Prediction of earthquakes. In: P. J. Hart (editor), *The Earth's Crust and Upper Mantle*, *Am. Geophys. Union, Geophys. Monogr.*, **13**, 1974 (1969). (Русский перевод: Земная кора и верхняя мантия, под ред. П. Харта, «Мир», М., 1972.)
135. *Hagiwara T.*, The development of earthquake prediction research, *Gakujitsu Geppo. Japan Soc. Promotion Sci.*, **26**, 2 (1973) (in Japanese).
136. *Hagiwara T., Ohtake M.*, Seismic activity associated with the filling of the reservoir behind the Kurobe dam, Japan, 1963—1970, *Tectonophysics*, **15**, 241 (1972).
137. *Hagiwara T., Rikitake T.*, Japanese program on earthquake prediction, *Science*, **157**, 761 (1967).
138. *Hagiwara T., Rikitake T.*, La previsione dei terremoti, *Enciclopedia della Scienza della Tecnica*, 1969, pp. 218—228.
139. *Hagiwara T., Rikitake T.*, Neue Entwicklungen in der Erdbebenprognose, *Umschau*, **69**, 56 (1969).
140. *Hagiwara T., Rikitake T., Yamada J.*, Observations of the deformation of the earth's surface at Aburatsubo, Miura Peninsula, 1. *Bull. Earthquake Res. Inst., Univ. Tokyo*, **26**, 23 (1948).
141. *Hagiwara T., Rikitake T., Kasahara K., Yamada J.*, Observation of ground tilting and strain at Hokugo Village, Fukui Prefecture, Rep. Spec. Comm. Investigation of Fukui earthquake, Science Council Japan, Tokyo, 1949, p. 61.
142. *Hagiwara T., Rikitake T., Kasahara K., Yamada J.*, Observations of the deformation of the earth's surface at Aburatsubo, Miura Peninsula, 3. *Bull. Earthquake Res. Inst., Univ. Tokyo*, **27**, 39 (1949).
143. *Hagiwara Y.*, Optimum project of leveling survey for earthquake prediction, *J. Geod. Soc. Japan*, **17**, 38 (1971).
144. *Hagiwara Y.*, Geodesy in Japan, *Geophys. Surv.*, **1**, 305 (1974).
145. *Hagiwara Y.*, Probability of earthquake occurrence as obtained from a Weibull distribution analysis of crustal strain, *Tectonophysics*, **23**, 313 (1974).
146. *Hagiwara Y., Tajima H.*, Secular changes in gravity. In: Tsubokawa I. (editor), *Publ. 50th Anniv.—Great Kanto Earthquake, 1923*, Earthquake Research Institute, Univ. of Tokyo, Tokyo, 311—327, 1973.
147. *Hamilton R. M.*, Earthquake prediction and public reaction, *EOS (Trans. Am. Geophys. Union)*, **55**, 739, 742 (1974).
148. *Hamilton R. M., Healy J. H.*, Aftershocks of the Benham nuclear explosion, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, **59**, 2271 (1969).
149. *Harada T., Kassai A.*, Horizontal strain of the crust in Japan for the last 60 years, *J. Geod. Soc. Japan*, **17**, 4 (1971) (in Japanese).
150. *Harada Y.*, Investigation of active crust by means of geodetic surveys in Japan. In: Alsop L. E., Oliver J. E. (editors), *Joint U. S.—Japan Conference: Premonitory Phenomena Associated with Several Recent Earthquakes and Related Problems—EOS (Trans. Am. Geophys. Union)*, **50**, 402 (1969).
151. *Harrison J. C.*, Tidal tilts in the Poorman Mine, Boulder, Colorado, *EOS (Trans. Am. Geophys. Union)*, **55**, 221 (1974).

152. *Hasbrouck W. P., Allen J. H.*, Quasistatic magnetic field changes associated with the CANNIKIN nuclear explosion, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, **62**, 1479 (1972).
153. *Hatai S., Abe N.*, The responses of the catfish, *Parasilurus Asotus*, to earthquakes, *Proc. Imp. Acad. Japan*, **8**, 375 (1932).
154. *Hatai S., Kokubo S., Abe N.*, The earth currents in relation to the responses of catfish, *Proc. Imp. Acad. Japan*, **8**, 478 (1932).
155. *Hayakawa M.*, The variation of seismic wave velocity, *Rep. Geol. Surv. Japan*, Spec. Number, 7—24 (1950).
156. *Hayford J. F., Baldwin A. L.*, The earth movements in the California earthquake of 1906, *U. S. Coast Geod. Surv. Rep.*, Appendix No. 3, 69 (1907).
157. *Healy J. H., Rubey W. W., Griggs D. T., Raleigh C. B.*, The Denver earthquakes, *Science*, **161**, 1301 (1968).
158. *Healy J. H., Hamilton R. M., Raleigh C. B.*, Earthquakes induced by fluid injection and explosion, *Tectonophysics*, **9**, 205 (1970).
159. *Healy J. H., Lee W. H. K., Pakiser L. C., Raleigh C. B., Wood M. D.*, Prospects of earthquake prediction and control, *Tectonophysics*, **14**, 319 (1972).
160. *Heirtzler J. R., Dickson G. O., Herron E. M., Pitman, III, W. C., Le Pichon X.*, Marine magnetic anomalies, geomagnetic field reversals, and motions of the ocean floor and continents, *J. Geophys. Res.*, **73**, 2119 (1968).
161. *Hess H. H.*, History of ocean basins. In: Engel A. E. J., James H. L., Leonard B. F. (editors), *Petrological Studies*, Geological Society of America, New York, 1962, pp. 599—620.
162. *Hofmann R. B.*, Geodimeter fault movement investigations in California, *Bull. Dept. Water Resour., State of California*, No. 116-6 (1968).
163. *Hofmann R. B.*, Seismic activity and reservoir filling at Oroville and San Luis Dams, California. In: Ackermann W. C., White G. F., Worthington E. B. (editors), *Man-Made Lakes: Their Problems and Environmental Effects*, Am. Geophys. Union, *Geophys. Monogr.*, **17**, 468 (1973).
164. *Holmes A.*, *Principles of Physical Geology*, Thomas Nelson and Sons, London-Edinburgh, 1944. (Русский перевод: Холмс А., Основы физической геологии, ИЛ, М., 1949.)
165. *Hosoyama K.*, Characteristic tilt of the ground that preceded the occurrence of the strong earthquake of March 7, 1952, *J. Phys. Earth*, **1**, 75 (1952).
166. *Hubbert M. K., Rubey W. W.*, Role of fluid pressure in mechanics of overthrust faulting, **1**, 2, *Bull. Geol. Soc. Am.*, **70**, 115 (1959).
167. *Hughes W. J.*, The effect of two periodic conductivity anomalies on geomagnetic micropulsation measurements, *Geophys. J.*, **31**, 407 (1973).
168. *Hughes W. J.*, The effect of micropulsations on a localized earth conductivity anomaly, *Geophys. J.*, **36**, 641 (1974).
169. *Hughes W. J.*, The polarization of micropulsations and geoelectric structure, *Geophys. J.*, **38**, 95 (1974).
170. *Huzita K., Kisimoto Y., Shiono K.*, Neotectonics and seismicity in the Kinki area, southwest Japan, *J. Geosci., Osaka Univ.*, **16**, Art. 6, 93 (1973).
171. *Ichikawa M.*, Re-analyses of mechanism of earthquakes which occurred in and near Japan and statistical studies on the nodal plane solutions obtained, *Geophys. Mag.*, **35**, 207 (1971).
172. *Iida K., Shichi R.*, Crustal deformation before the earthquakes of Sept. 9, 1969 (central part of Gifu Pref.) and Jan. 5, 1971 (off Atumi Peninsula), *Rep. Coord. Comm. Earthquake Prediction*, **7**, 41 (1972) (in Japanese).
173. *Iida K., Shichi R., Oida T., Yamada K.*, Recent seismic activity,

- especially the Atsumi Peninsula earthquake on January 5, 1971, Rep. Coord. Comm. Earthquake Prediction, 5, 38 (1971).
174. *Iijima H.*, Surface geology of Matsushiro area and disaster by the Matsushiro earthquake swarm, Rep. Cooperative Res. Disaster Prevention, 18, 103 (1969) (in Japanese).
  175. *Iizuka S.*, Measurements on the time variations of seismic wave velocities by explosion-seismic method (preliminary report on the fourth experiment), Rep. Coord. Comm. Earthquake Prediction, 6, 15 (1971) (in Japanese).
  176. *Imamura A.*, Present status of earthquake research, Stenographic Records of Lunch-time Talks at the Japanese House of Peers, No. 29 (1928).
  177. *Imamura A.*, Theoretical and applied seismology, Maruzen, Tokyo, 1937.
  178. Imperial Earthquake Investigation Committee, 1904 and 1973, *Dai Nihon Jishin Shiryo* (Japanese Historical Records Relevant to Earthquakes), Reprinted by Shibunkan, Kyoto, Part 1, 2 (in Japanese).
  179. *Isacks B., Oliver J. E., Sykes L. R.*, Seismology and the new global tectonics, *J. Geophys. Res.*, 73, 5855 (1968).
  180. *Ishibashi K., Tsumura K.*, A microearthquake observation in the South Kanto region, *Bull. Earthquake Res. Inst., Univ. Tokyo*, 49, 97 (1971).
  181. *Ishimoto M.*, Observation sur les variations de l'inclination de la surface terrestre (premier rapport), *Bull. Earthquake Res. Inst., Univ. Tokyo*, 2, 1 (1927).
  182. *Ishimoto M., Iida K.*, Observations sur les séismes enregistrés par le microsismographe construit dernièrement, 1, *Bull. Earthquake Res. Inst., Univ. Tokyo*, 17, 443 (1939).
  183. *Ispir Y., Üyar O.*, An attempt in determining the seismomagnetic effect in North West Turkey, *J. Geomagn. Geoelectr.*, 23, 295 (1971).
  184. Japanese Network of Crustal Movement Observatories, Spatial distribution of strain-steps associated with the earthquake of the central part of Gifu Prefecture, September 9, 1969, *Bull. Earthquake Res. Inst., Univ. Tokyo*, 48, 1217 (1970).
  185. *Johnson A. G., Kovach R. L.*, Water level fluctuations on the San Andreas fault south of Hollister, California. In: *Kovach R. L., Nur A.* (editors), Proceedings of the Conference on Tectonic Problems on the San Andreas Fault System, Stanford Univ. Publ., Geol. Sci., 13, 489 (1973).
  186. *Johnson A. G., Kovach R. L., Nur A.*, Fluid pressure variations and fault creep in central California, *Tectonophysics*, 23, 257 (1974).
  187. *Johnston M. J. S.*, Tectonomagnetic experiments in Western U. S. A., *EOS* (Trans. Am. Geophys. Union), 56, 1113 (1974).
  188. *Johnston M. J. S., Mortensen C. E.*, Tilt precursors before earthquakes on the San Andreas fault, California, *Science*, 186, 1031 (1974).
  189. *Johnston M. J. S., Smith B. E., Johnston J. R., Williams F. J.*, A search for tectonomagnetic effects in California and Western Nevada. In: *Kovach R. L., Nur A.* (editors), Proceedings of the Conference on Tectonic Problems on the San Andreas Fault System, Stanford Univ. Publ., Geol. Sci., 13, 225 (1973).
  190. *Johnston M. J. S., Bakun W. H., Pakiser L. C., Tarr A. C.*, Earthquakes — can they be predicted or controlled? *Industr. Res.*, November 15, 30 (1974).
  191. *Jungels P., Anderson D. L.*, Strains and tilts associated with the San Fernando earthquake. The San Fernando, California, Earthquake of February 9, 1971, U. S. Geol. Surv. Prof. Paper No. 733, 1971.
  192. *Kaminuma K., Iwata T., Kayano I., Ohtake M.*, Summary of scientific data of major earthquakes in Japan, 1872—1972, Spec. Rep. Earthquake Res. Inst., Univ. Tokyo, 9, 1 (1973) (in Japanese).
  193. *Kanamori H.*, Recent developments in earthquake prediction research in Japan, *Tectonophysics*, 9, 291 (1970).

194. *Kanamori H.*, Faulting of the great Kanto earthquake of 1923 as revealed by seismological data, *Bull. Earthquake Res. Inst., Univ. Tokyo*, **49**, 13 (1971).
195. *Kanamori H.*, Mode of strain release associated with major earthquakes in Japan. In: Donath F. A. (editor), *Annual Review of Earth and Planetary Sciences, Annual Reviews, Palo Alto, Calif.*, **1**, 213 (1972).
196. *Kanamori H.*, Tectonic implications of the 1944 Tonankai and the 1946 Nankaido earthquakes, *Phys. Earth Planet. Inter.*, **5**, 129 (1972).
197. *Kanamori H.*, Relation between tectonic stress, great earthquakes and earthquake swarms, *Tectonophysics*, **14**, 1 (1972).
198. *Kanamori H., Chung W. Y.*, Temporal changes in P-wave velocity in southern California, *Tectonophysics*, **23**, 67 (1974).
199. *Kanamori H., Miyamura S.*, Seismometrical re-evaluation of the great Kanto earthquake of September 1, 1923, *Bull. Earthquake Res. Inst., Univ. Tokyo*, **48**, 115 (1970).
200. *Kaneko S.*, Transcurrent displacement along the Median Line, southwestern Japan, *New Zealand J. Geol. Geophys.*, **9**, 45 (1966).
201. *Kasahara J., Koresawa S., Tsumura K., Nakamura I., Nagumo S.*, The earthquake of December 4, 1972 in the east off Hachiojima, *Rep. Coord. Comm. Earthquake Prediction*, **9**, 51 (1973) (in Japanese).
202. *Kasahara K.*, The nature of seismic origins as inferred from seismological and geodetic observations, *Bull. Earthquake Res. Inst., Univ. Tokyo*, **35**, 473 (1957).
203. *Kasahara K.*, The source region of the Matsushiro swarm earthquake, *Bull. Earthquake Res. Inst., Univ. Tokyo*, **48**, 581 (1970).
204. *Kasahara K.*, Tiltmeter observation in complement with precise levellings, *J. Geod. Soc. Japan*, **19**, 93 (1973), (in Japanese).
205. *Kasahara K.*, Aseismic faulting following the 1973 Nemuro-oki earthquake, Hokkaido, Japan (a possibility), *Pure Appl. Geophys.*, **113**, № 1/2 (1975).
206. *Kasahara K., Yamada J., Takahashi T.*, and Technical Division of the Earthquake Research Institute, The Odawara bore-hole station equipped with a buoy tiltmeter, *Rep. Coord. Comm. Earthquake Prediction*, **10**, 51 (1973).
207. *Kato Y.*, Investigation of the changes in the earth's magnetic field accompanying earthquakes or volcanic eruptions, *Sci. Rep. Tohoku Imp. Univ., Ser. 1*, **27**, 1 (1939).
208. *Kato Y.*, Recent studies on geomagnetic changes accompanied by earthquakes. In: Nagata T. (editor), *Proc. Symp. Geomagnetic Changes Associated with Earthquakes and Volcanic Activities, Geophys. Inst., Univ. Tokyo, Tokyo*, 1966 (in Japanese).
209. *Kawada K.*, Electric resistivity measurement along and across a ground fissure in the Matsushiro area, *Bull. Earthquake Res. Inst., Univ. Tokyo*, **44**, 1759 (1966).
210. *Kawasumi H.*, Proofs of 69 years periodicity and imminence of destructive earthquake in southern Kwanto district and problems in the countermeasures thereof, *Chigaku Zasshi*, **79**, 115 (1970) (in Japanese).
211. *Kelleher J.*, Space-time seismicity of Alaska—Aleutian seismic zone, *J. Geophys. Res.*, **75**, 5745 (1970).
212. *Kelleher J., Savino J.*, Distribution of seismicity before large strike-slip and thrust-type earthquakes, *J. Geophys. Res.*, **80**, 260 (1975).
213. *Kelleher J., Sykes L., Oliver J.*, Possible criteria for predicting earthquake locations and their application to major plate boundaries of the Pacific and the Caribbean, *J. Geophys. Res.*, **78**, 2547 (1973).
214. *King G. C. P., Bilham R. G.*, Tidal tilt measurement in Europe, *Nature*, **243**, 74 (1973).
215. *Kisimoto Y., Nishida R.*, Some properties of an earthquake sequence near

- Chizu, Tottori Pref., in April, 1970, Rep. Coord. Comm. Earthquake Prediction, 6, 60 (1971) (in Japanese).
216. *Kisslinger C.*, Earthquake prediction, *Phys. Today*, 27, 36 (1974).
  217. *Kisslinger C.*, Processes during the Matsushiro earthquake swarm as revealed by levelling, gravity and spring-flow observations, *Geology*, 3, 57 (1975).
  218. *Kisslinger C.*, *Engdahl E. R.*, A test of the Semyenov prediction technique in the central Aleutian islands, *Tectonophysics*, 23, 237 (1974).
  219. *Kisslinger C.*, *Rikitake T.*, U. S.—Japan seminar on earthquake prediction and control, *EOS (Trans. Am. Geophys. Union)*, 55, 9 (1974).
  220. *Кондратенко А. М.*, *Нерсесов И. Л.*, Некоторые результаты изучения изменения скоростей продольных волн и отношения скоростей продольных и поперечных волн в очаговой зоне. Сб. «Физика землетрясений и сейсмика взрывов», М., Изд-во АН СССР, 1962.
  221. *Kovach R. L.*, *Nur A.*, *Wesson R. L.*, *Robinson R.*, Water level fluctuations and earthquakes on the San Andreas fault zone, *Geology* (1975), in press.
  222. *Kuno H.*, On the displacement of the Tanna fault since the Pleistocene, *Bull. Earthquake Res. Inst., Univ. Tokyo*, 14, 619 (1936).
  223. *Kuo T. K.*, *Chin P. Y.*, *Feng H. T.*, Discussion on the change of ground-water level preceding a large earthquake from an earthquake source model, *Acta Geophys. Sinica*, 17, 99 (1974) (in Chinese).
  224. *Latynina L. A.*, *Karmaleyeva R. M.*, On certain anomalies in the variations of crustal strains before strong earthquakes, *Tectonophysics*, 9, 239 (1970).
  225. *Латынина Л. А.*, *Кармалева Р. М.*, Измерение медленных движений в земной коре как метод поиска предвестников землетрясений. Сб. «Физические основания поисков методов прогноза землетрясений», отв. ред. акад. М. А. Садовский, М., «Наука», 1970.
  226. *Lee W. K. H.*, Earthquakes and China: a guide to some background materials, U. S. Geol. Surv., Open File Rep., 1974.
  227. *Lee W. H. K.*, *Eaton M. S.*, *Brabb E. E.*, The earthquake sequence near Danville, California, 1970, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 61, 1771 (1971).
  228. *Lensen G. J.*, Phases, nature and rates of earth deformation, *Bull. R. Soc. New Zealand*, 9, 97 (1971).
  229. *Lensen G. J.*, *Otway P. M.*, Earthshift and post-earthshift deformation associated with the May 1968 Inangahua earthquake, New Zealand, *Bull. R. Soc. New Zealand*, 9, 107 (1971).
  230. *Lomnitz C.*, Statistical prediction of earthquakes, *Rev. Geophys.*, 4, 377 (1966).
  231. *Lomnitz C.*, *Global Tectonics and Earthquake Risk*, Elsevier, Amsterdam, 1974.
  232. *Matsuda T.*, Strike-slip faulting along the Atotsugawa fault, Japan, *Bull. Earthquake Res. Inst., Univ. Tokyo*, 44, 1179 (1966).
  233. *Matsuda T.*, Active faults and active foldings, *Symp. Research on Earthquake Prediction*, Earthquake Research Inst., Univ. Tokyo, Tokyo, 1968 (in Japanese).
  234. *Matsuda T.*, Earthquakes and faults from geological stand-points, *Proc. 12th Conf. Earthquake Engineering, Comm. Earthquake Engineering, Japan Society of Civil Engineers, Tokyo*, 1972 (in Japanese).
  235. *Matsumura K.*, *Oike K.*, The microseismicities in and around Japan, *Annu. Rep. Disas. Prev. Res. Inst., Kyoto Univ.*, 16B, 77 (1973) (in Japanese).
  236. *Matsumura S.*, Variation of the elastic wave velocities of rocks in the process of deformation and fracture under high pressure, *Bull. Disas. Prev. Res. Inst., Kyoto Univ.*, 32, 2 (1960).
  237. *Matumoto T.*, *Latham G.*, Aftershocks and intensity of the Managua earthquake of 23 December 1972, *Science*, 181, 545 (1973).

238. *Mazzella A., Morrison H. F.*, Electrical resistivity variations associated with earthquakes on the San Andreas fault, *Science*, **185**, 855 (1974).
239. *McEvilly T. V., Johnson L. R.*, Earthquakes of strike-slip type in central California: evidence on the question of dilatancy, *Science*, **182**, 581 (1973).
240. *McGarr A.*, Earthquake prediction: absence of a precursive change in seismic velocities before a tremor of magnitude 3.3/4, *Science*, **185**, 1047 (1974).
241. *Meade B. K.*, Earthquake investigation in the vicinity of El Centro, California; horizontal movement, *Trans. Am. Geophys. Union*, **29**, 27 (1948).
242. *Meade B. K.*, Annual rate of slippage along the San Andreas fault. Сб. «Проблемы современных движений земной коры» (Третий международный симпозиум, Ленинград, СССР, 1968 г.) М., 1969.
243. *Meade B. K.*, Horizontal movement along the San Andreas fault system, *Bull. R. Soc. New Zealand*, **9**, 175 (1971).
244. *Mescherikov J. A.*, Recent crustal movements in seismic regions: geodetic and geomorphic data, *Tectonophysics*, **6**, 29 (1968).
245. *Mickery W. V.*, Reservoir seismic effects. In: Ackermann W. C., White G. F., Worthington E. B. (editors), *Man-Made Lakes: Their Problems and Environmental Effects*, *Am. Geophys. Union, Geophys. Monogr.*, **17**, 472 (1973).
246. *Milne J.*, *Earthquakes and other Earth Movements*, D. Appleton, New York, 1886.
247. *Milne J.*, Earthquakes in connection with electric and magnetic phenomena, *Trans. Seismol. Soc. Japan*, **15**, 135 (1890).
248. *Miyabe N.*, On the vertical movement in Kanto districts, *Bull. Earthquake Res. Inst., Univ. Tokyo*, **9**, 2 (1931).
249. *Miyakoshi J.*, Secular variation of Parkinson vectors in a seismically active region of Middle Asia, *J. Fac. General Education, Tottori Univ.*, **8**, 209 (1975).
250. *Miyamura S., Okada A., Izutuya S., Sugimura A.*, Levelling resurvey along the River Oguni, Yamagata Prefecture, *Bull. Earthquake Res. Inst., Univ. Tokyo*, **46**, 405 (1968) (in Japanese).
251. *Mizutani H., Ishido T., Matsui T.*, Changes in  $V_p/V_s$  ratio in the Central Gifu earthquake (abstract), Fall Meet. Seismol. Soc. Japan, 1973 (in Japanese).
252. *Mogi K.*, Study of the elastic shocks caused by the fracture of heterogeneous materials and its relation to earthquake phenomena, *Bull. Earthquake Res. Inst., Univ. Tokyo*, **40**, 125 (1962).
253. *Mogi K.*, Magnitude-frequency relation for elastic shocks accompanying fractures of various materials and some related problems in earthquakes (2nd paper), *Bull. Earthquake Res. Inst., Univ. Tokyo*, **40**, 831 (1962).
254. *Mogi K.*, Some discussions on aftershocks, foreshocks and earthquake swarms—the fracture of a semi-infinite body caused by an inner stress origin and its relation to the earthquake phenomena (3rd paper), *Bull. Earthquake Res. Inst., Univ. Tokyo*, **41**, 615 (1963).
255. *Mogi K.*, Experiments on fracture of rocks. In: Page R. (editor), *Proceedings of the Second United States—Japan Conference on Research Related to Earthquake Prediction Problems*, Lamont Geological Observatory, Columbia Univ., New York, 1966.
256. *Mogi K.*, Earthquakes and fractures, *Tectonophysics*, **5**, 35 (1967).
257. *Mogi K.*, Migration of seismic activity, *Bull. Earthquake Res. Inst., Univ. Tokyo*, **46**, 53 (1968).
258. *Mogi K.*, Rock breaking tests, *Kagaku*, **39**, 95 (1969) (in Japanese).
259. *Mogi K.*, Relationship between shallow and deep seismicity in the western Pacific region, *Tectonophysics*, **17**, 1 (1973).

260. *Mogi K.*, Rock fracture. In: Donath F. A. (editor), Annual Review of Earth and Planetary Sciences, Annual Reviews, Palo Alto, Calif., 1, 63 (1973).
261. *Mogi K.*, Rock fracture and earthquake prediction, J. Soc. Materials Sci. Japan, 23, 320 (1974) (in Japanese).
262. *Moore G. W.*, Magnetic disturbances preceding the 1964 Alaska earthquake, Nature, 203, 508 (1964).
263. *Mori T., Yoshino T.*, Local difference in variations of the geomagnetic total intensity in Japan, Bull. Earthquake Res. Inst., Univ. Tokyo, 48, 893 (1970).
264. *Murai I., Kaneko S.*, Notes on neotectonics of the South Kanto region. In: Tsubokawa I. (editor), Publication of the 50th Anniversary Great Kanto Earthquake, 1923, Earthquake Research Institute, Univ. of Tokyo, Tokyo, 1973 (in Japanese).
265. *Murai I., Kaneko S.*, The Izu—Hanto-oki earthquake of 1974 and the earthquake faults, especially, the relationships between the earthquake faults, the active faults, and the fracture systems in the earthquake area, Spec. Bull. Earthquake Res. Inst., Univ. Tokyo, 14, 159 (1974) (in Japanese).
266. *Musha K.*, Nihon Jishin Shiryo (Japanese historical records relevant to earthquakes), Mainichi Press, Tokyo, 1951.
267. *Musha K.*, Jishin Namazu (Earthquake and catfish), Toyotosho, Tokyo, 1957 (in Japanese).
268. *Muto K.*, A study of displacements of triangulation points, Bull. Earthquake Res. Inst., Univ. Tokyo, 10, 384 (1932).
269. *Muto K., Okuda T., Harada Y.*, The land deformation accompanying the Fukui earthquake of June 28, 1948, Bull. Geogr. Surv. Inst., 2, 27 (1950).
270. *Мячкин В. И., Зубков С. И.*, Сводный график предвестников землетрясений, Изв. АН СССР, Физика Земли, № 6, 28 (1973).
271. *Myachkin V. I., Sobolev G. A., Dolbilkina N. A., Morozov V. N., Preobrazhensky V. B.*, The study of variations in geophysical fields near focal zones of Kamchatka, Tectonophysics, 14, 287 (1972).
272. *Nagata T.*, Variation in earth-current in the vicinity of the Sikano fault, Bull. Earthquake Res. Inst., Univ. Tokyo, 22, 72 (1944) (in Japanese).
273. *Nagata T.*, Tectonomagnetism, Int. Assoc. Geomagn. Aeron. Bull., 27, 12 (1969).
274. *Nagata T.*, Effects of a uniaxial compression on remanent magnetizations of igneous rocks, Pure Appl. Geophys., 78, 100 (1970).
275. *Nagata T., Kinoshita H.*, Studies on piezo-magnetization, 1. Magnetization of titaniferous magnetite under uniaxial compression, J. Geomagn. Geoelectr., 17, 121 (1965).
276. *Nagumo S.*, The role of submarine seismometry in earthquake prediction research, Proc. Symp. Earthquake Prediction, December 12, 1972, Seismological Society of Japan, Tokyo, 1973 (in Japanese).
277. *Nason R. D.*, Fault creep and earthquakes on the San Andreas fault. In: Kovach R. L., Nur A. (editors), Proceedings of the Conference on Tectonic Problems on the San Andreas Fault System, Stanford Univ. Publ., Geol. Sci., 13, 275 (1973).
278. *Nasu N.*, Crustal deformation. In: Tsuya H. (editor), The Fukui Earthquake of June 28, 1948, Committee for the Study of Fukui Earthquake, Science Council Japan, Tokyo, 1950, p. 93—130.
279. National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), Earthquake History of the United States, Washington, D. C., 1973.
280. National Research Center for Disaster Prevention, Quaternary Tectonic Map of Japan, Tokyo, 1969.
281. National Research Center for Disaster Prevention, Explanatory Text of the Quaternary Tectonic Map of Japan, Tokyo, 1973.

282. National Research Center for Disaster Prevention, Earthquakes occurring in the Tokyo area, observed at the Iwatsuki Observatory, Rep. Coord. Comm. Earthquake Prediction, 12, 20 (1974) (in Japanese).
283. *Nersesov I. L.*, Earthquake prognostication in the Soviet Union, Bull. New Zealand Soc. Earthquake Eng., 3, 108 (1970).
284. *Нерсесов И. Л., Семенов А. Н., Симбирева И. Г.*, Пространственно-временное распределение отношений времен пробега поперечных и продольных волн в Гармском районе, Сб. «Экспериментальная сейсмология», отв. ред. акад. М. А. Садовский, М., «Наука», 1971.
285. *Нерсесов И. Л., Латынина Л. А., Кармалева Р. М.*, О связи деформаций земной коры с землетрясениями по данным станции Талгар, Сб. «Предвестники землетрясений», Деп. № 5498-73, М., 1973.
286. *Нерсесов И. Л., Лукк А. А., Пономарев В. С., Раутиан Т. Г., Рулев Б. Г., Семенов А. Н., Симбирева И. Г.*, Возможности прогнозирования землетрясений на примере Гармского района Таджикской ССР. Сб. «Предвестники землетрясений», Деп. № 5498-73, М., 1973.
287. *Nishimura E.*, On earth tides, Trans. Am. Geophys. Union, 31, 357 (1950).
288. *Nishimura E.*, On change of state of the materials in the earth's crust with relation to seismic activity. In: Memorial Issue of the Fifth Anniversary, Disaster Prevention Research Institute, Kyoto Univ., 1956.
289. *Nishimura E.*, On the continuous observation of crustal deformation, Zisin (J. Seismol. Soc. Japan), Ser. 2, 14, 260 (1961) (in Japanese).
290. *Nishimura E., Hosoyama K.*, On tilting motion of ground observed before and after the occurrence of an earthquake, Trans. Am. Geophys. Union, 34, 597 (1953).
291. *Nordquist J. M.*, Theory of largest values applied to earthquake magnitudes, Trans. Am. Geophys. Union, 26, 29 (1945).
292. *Nur A.*, Dilatancy, pore fluids, and premonitory variations of  $t_s/t_p$  travel times, Bull. Seismol. Soc. Am., 62, 1217 (1972).
293. *Nur A.*, The Matsushiro earthquake swarm: a confirmation of the dilatancy—fluid flow model, Geology, 2, 217 (1974).
294. *Nur A.*, Tectonophysics: the study of relations between deformation and forces in the earth, Proc. 3rd Congr. Int. Soc. Rock Mech., National Academy of Sciences, U. S. A., 1974, Vol. 1, Part A, pp. 247—317.
295. *Nur A., Simmons G.*, The effect of saturation on velocity in low porosity rocks, Earth Planet. Sci. Lett., 7, 183 (1969).
296. *Nur A., Bell M. L., Talwani P.*, Fluid flow and faulting, 1. A detailed study of the dilatancy mechanism and premonitory velocity changes. In: Kovach R. L., Nur A. (editors), Proceedings of the Conference on Tectonic Problems on the San Andreas Fault System, Stanford Univ. Publ., Geol., Sci., 13, 391 (1973).
297. *O'Connel R. J., Budiansky B.*, Seismic velocities in dry and saturated cracked solids, J. Geophys. Res., 79, 5412 (1974).
298. *Ohnaka Y., Kinoshita H.*, Effects of uniaxial compression on remanent magnetization, J. Geomagn. Geoelectr., 20, 93 (1968).
299. *Ohtake M.*, Changes in the  $V_p/V_s$  ratio related with the occurrence of some shallow earthquakes in Japan, J. Phys. Earth, 21, 173 (1973).
300. *Ohtake M.*, Seismic activity induced by water injection at Matsushiro, Japan, J. Phys. Earth, 22, 163 (1974).
301. *Oike K.*, Results of microearthquake observation, Proc. Symp. Earthquake Prediction, December 12, 1972, Seismological Society of Japan, Tokyo, 1973 (in Japanese).
302. *Okada A., Tsubokawa I.*, Vertical displacements accompanied by the swarm earthquakes in Matsushiro area, Rep. Coord. Comm. Earthquake Prediction, 2, 34 (1969) (in Japanese).
303. *Okano K., Hirano I.*, Recent microseismicity in the Kyoto—Osaka—Kobe region, Rep. Coord. Earthquake Prediction, 4, 52 (1970) (in Japanese).

304. *Oliver J.*, Earthquake prediction, *Science*, **144**, 1364 (1964).
305. *Oliver J.*, Recent earthquake prediction research in the U. S. A., *Tectonophysics*, **9**, 283 (1970).
306. *Островский А. Е.*, Об изменениях наклонов земной поверхности перед сильными близкими землетрясениями, Сб. «Физические основания поисков методов прогноза землетрясений», отв. ред. акад. М. А. Садовский, М., «Наука», 1970.
307. *Островский А. Е.*, Наклоны и землетрясения. Сб. «Предвестники землетрясений», Деп. № 5498-73, М., 1973.
308. *Ozawa I.*, Observations of the secular and annual changes of the crustal strains at Osakayama, Spec. Contrib. Geophys. Inst., Kyoto Univ., **11**, 205 (1971).
309. *Packard M., Varian R.*, Free nuclear induction in the earth's magnetic field, *Phys. Rev.*, **93**, 941 (1954).
310. *Page R.* (editor), Proceedings of the Second United States—Japan Conference on Research Related to Earthquake Prediction Problems, Lamont Geological Observatory, Columbia Univ., New York, 1966.
311. *Pakiser L. C., Healy J. H.*, Prédiction et contrôle des tremblements de terre, *La Recherche*, **2**, 717 (1971).
312. *Pakiser L. C., Eaton J. P., Healy J. H., Raleigh C. B.*, Earthquake prediction and control, *Science*, **166**, 1467 (1969).
313. *Pan C.*, Analysis of tidal strains from crustal Colorado strainmeter network, Preprint (personal communication by J. C. Harrison), 1973.
314. *Papazachos B. C.*, The time distribution of the reservoir-associated foreshocks and its importance to the prediction of the principal shock, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, **63**, 1973 (1973).
315. *Parkin E. J.*, Vertical movement in the Los Angeles region, 1906—1946, *Trans. Am. Geophys. Union*, **29**, 17 (1948).
316. *Parkin E. J.*, Horizontal crustal movements determined from surveys after the Alaskan earthquake of 1964. In: The Prince William Sound, Alaska, Earthquake of 1964 and Aftershocks, Vol. 3, Environmental Science Services Administration, U. S. Government Printing Office, Washington, D. C., 1969.
317. *Plafker G.*, Tectonic deformation associated with the 1964 Alaska earthquake, *Science*, **148**, 1675 (1965).
318. *Plafker G.*, Alaskan earthquake of 1964 and Chilean earthquake of 1960: implications for arc tectonics, *J. Geophys. Res.*, **77**, 901 (1972).
319. *Press F.*, Displacements, strains, and tilts at teleseismic distances, *J. Geophys. Res.*, **70**, 2395 (1965).
320. *Press F.*, Earthquake prediction: a challenge to geophysicists, *Geophysics*, **30**, 1242 (1965).
321. *Press F.*, A strategy for an earthquake prediction research program, *Tectonophysics*, **6**, 11 (1968).
322. *Press F.*, Earthquake prediction, *Sci. Am.*, **232**(5), 14 (1975).
323. *Press F., Brace W. F.*, Earthquake prediction, *Science*, **152**, 1575 (1966).
324. *Press F., Benioff H., Frosch R. A., Griggs D. T., Handin J., Hanson R. E., Hess H. H., Housner G. W., Munk W. H., Orowan E., Pakiser Jr. L. C., Sutton G., Tocher D.*, Earthquake prediction: a Proposal for a Ten Year Program of Research, Office Sci. Technol., Washington, D. C., 1965.
325. *Raleigh C. B., Paterson M. S.*, Experimental deformation of serpentine and its tectonic implications, *J. Geophys. Res.*, **70**, 3965 (1965).
326. *Reid H. F.*, The California Earthquake of April 18, 1906, 2. The Mechanics of the Earthquake, Carnegie Institution of Washington, Washington, D. C., 1910.

327. Research Group for Microearthquakes, Tohoku University, An earthquake that occurred in Southeast Akita Prefecture, Rep. Coord. Comm. Earthquake Prediction, **5**, 14 (1971) (in Japanese).
328. Research Group for Microearthquakes, Tohoku University, Variations in the travel time of compressional wave before the southeastern Akita earthquake of 1970 and the Niigata earthquake of 1964, Rep. Coord. Comm. Earthquake Prediction, **11**, 56 (1974) (in Japanese).
329. *Reyes A., Brune J., Canales L., Madrid J., Rebolbar J., Munguia L.*, A microearthquake survey of the San Miguel fault zone, Baja California, Mexico, Geophys. Res. Lett., **2**, 56 (1975).
330. *Reynolds O.*, Dilatancy. An abstract of a lecture delivered to the Royal Institute of Great Britain, Nature, **33**, 429 (1886).
331. *Richter C. F.*, Elementary Seismology, W. H. Freeman and Co., San Francisco, Calif., 1958. (Русский перевод: *Рихтер Ч. Ф.*, Элементарная сейсмология, ИЛ, М., 1963).
332. *Rikitake T.*, Changes in the Dogo hot spring associated with the Nankai earthquake, Spec. Bull. Earthquake Res. Inst., Univ. Tokyo, **5**, 189 (1947) (in Japanese).
333. *Rikitake T.*, Oscillations of a system of disk dynamos, Proc. Cambridge Philos. Soc., **54**, 89 (1958).
334. *Rikitake T.*, A five-year plan for earthquake prediction research in Japan, Tectonophysics, **3**, 1 (1966).
335. *Rikitake T.*, Elimination of non-local changes from total intensity values of the geomagnetic field, Bull. Earthquake Res. Inst., Univ. Tokyo, **44**, 1041 (1966).
336. *Rikitake T.*, Electromagnetism and the Earth's Interior, Elsevier, Amsterdam, 1966.
337. *Rikitake T.*, Earthquake prediction, Earth-Sci. Rev., **4**, 245 (1968).
338. *Rikitake T.* (editor), Earthquake Prediction — Tectonophysics, **6**, 1 (1968).
339. *Rikitake T.*, Geomagnetism and earthquake prediction, Tectonophysics, **6**, 59 (1968).
340. *Rikitake T.*, Prediction of magnitude and occurrence time of earthquakes, Bull. Earthquake Res. Inst., Univ. Tokyo, **47**, 107 (1969) (in Japanese).
341. *Rikitake T.*, An approach to prediction of magnitude and occurrence time of earthquakes, Tectonophysics, **8**, 81 (1969).
342. *Rikitake T.*, The undulation of an electrically conductive layer beneath the islands of Japan, Tectonophysics, **7**, 257 (1969).
343. *Rikitake T.*, Prévision des tremblements de terre, Sciences, **65**, 4 (1970).
344. *Rikitake T.* (editor), Earthquake Mechanics — Tectonophysics, **9**, 95 (1970).
345. *Rikitake T.*, Earthquake prediction studies in Japan, Geophys. Surv., **1**, 4 (1972).
346. *Rikitake T.*, Problems of predicting earthquakes, Nature, **240**, 202 (1972).
347. *Rikitake T.*, An earthquake prediction operation in an area south of Tokyo, Proc. Symp. Results of Upper Mantle Investigations with Emphasis on Latin America, Comite Argentino del Manto Superior, Buenos Aires, **2**, 95 (1972).
348. *Rikitake T.*, Japanese national program on earthquake prediction, Tectonophysics, **23**, 225 (1974).
349. *Rikitake T.*, Probability of earthquake occurrence as estimated from crustal strain, Tectonophysics, **23**, 299 (1974).
350. *Rikitake T.* (editor), Focal Processes and Prediction of Earthquakes — Tectonophysics, **23**, 217 (1974).
351. *Rikitake T.*, Statistics of ultimate strain of the earth's crust and probability of earthquake occurrence, Tectonophysics, **26**, 1 (1975).
352. *Rikitake T.*, Dilatancy model and empirical formulas for an earthquake area, Pure Appl. Geophys., **113**, № 1/2, 141, (1975).

353. *Rikitake T.*, Earthquake precursors, *Bull. Seismol. Soc. Am.* (1975), in press.
354. *Rikitake T.*, Crustal dilatancy and geomagnetic variations of short period, *J. Geomagn. Geoelectr.*, **65**, № 5, 1133, (1975).
355. *Rikitake T., Yamazaki Y.*, Small earth strains as detected by electric resistivity measurements, *Proc. Japan Acad.*, **43**, 477 (1967).
356. *Rikitake T., Yamazaki Y.*, Electrical conductivity of strained rocks (5th paper). Residual strains associated with large earthquakes as observed by a resistivity variometer, *Bull. Earthquake Res. Inst., Univ. Tokyo*, **47**, 99 (1969).
357. *Rikitake T., Yamazaki Y.*, Strain steps as observed by a resistivity variometer, *Tectonophysics*, **9**, 197 (1970).
358. *Rikitake T., Yamazaki Y., Hagiwara Y., Kawada K., Sawada M., Sasai Y., Watanabe T., Momose K., Yoshino T., Otani K., Ozawa K., Sanzai Y.*, Geomagnetic and geoelectric studies of the Matsushiro earthquake swarm, 1, *Bull. Earthquake Res. Inst., Univ. Tokyo*, **44**, 363 (1966).
359. *Rikitake T., Yamazaki Y., Hagiwara Y., Kawada K., Sawada M., Sasai Y., Yoshino T.*, Geomagnetic and geoelectric studies of the Matsushiro earthquake swarm, 2, *Bull. Earthquake Res. Inst., Univ. Tokyo*, **44**, 409 (1966).
360. *Rikitake T., Yukutake T., Yamazaki Y., Sawada M., Sasai Y., Hagiwara Y., Kawada K., Yoshino T., Shimomura T.*, Geomagnetic and geoelectric studies of the Matsushiro earthquake swarm, 3, *Bull. Earthquake Res. Inst., Univ. Tokyo*, **44**, 1335 (1966).
361. *Rikitake T., Yamazaki Y., Sawada M., Sasai Y., Yoshino T., Uzawa S., Shimomura T.*, Geomagnetic and geoelectric studies of the Matsushiro earthquake swarm, 4, *Bull. Earthquake Res. Inst., Univ. Tokyo*, **44**, 1735 (1966).
362. *Rikitake T., Yamazaki Y., Sawada M., Sasai Y., Yoshino T., Uzawa S., Shimomura T.*, Geomagnetic and geoelectric studies of the Matsushiro earthquake swarm, 5, *Bull. Earthquake Res. Inst., Univ. Tokyo*, **45**, 395 (1967).
363. *Rikitake T., Yukutake T., Sawada M., Sasai Y., Watanabe T., Tachinaka H.*, Geomagnetic and geoelectric studies of the Matsushiro earthquake swarm, 6, *Bull. Earthquake Res. Inst., Univ. Tokyo*, **45**, 919 (1967).
364. *Rikitake T., Yoshino T., Sasai Y.*, Geomagnetic noises and detectability of seismo-magnetic effect, 1, *Bull. Earthquake Res. Inst., Univ. Tokyo*, **46**, 137 (1968).
365. *Robinson R., Wesson R. L., Ellsworth W. L.*, Variation of P-wave velocity before the Bear Valley, California, earthquake of 24 February 1972, *Science*, **184**, 1281 (1974).
366. *Rothé J. P.*, Earthquakes and dams, *New Scientist*, **39**, 75 (1968).
367. *Rothé J. P.*, Seismes artificiels, *Tectonophysics*, **9**, 215 (1970).
368. *Rothé J. P.*, Summary: geophysics report. In: Ackermann W. C., White G. F., Worthington E. B. (editors), *Man-Made Lakes: Their Problems and Environmental Effects*, *Am. Geophys. Union, Geophys. Monogr.*, **17**, 441 (1973).
369. *Sacks I. S., Suyehiro S., Evertson D. W., Yamagishi Y.*, Sacks-Evertson strainmeter, its installation in Japan and some preliminary results concerning strain steps, *Papers Meteorol. Geophys.*, **22**, 195 (1971).
370. *Sadeh D. S., Meidav M.*, Search for sidereal periodicity in earthquake occurrences, *J. Geophys. Res.*, **78**, 7709 (1973).
371. *Sadovsky M. A., Nersesov I. L.*, Forecasts of earthquakes on the basis of complex geophysical features, *Tectonophysics*, **23**, 247 (1974).
372. *Sadovsky M. A., Nersesov I. L., Nigmatullayev S. K., Latynina L. A., Lukk A. A., Semenov A. N., Simbireva I. G., Ulomov V. I.*, The processes preceding strong earthquakes in some regions of Middle Asia, *Tectonophysics*, **14**, 295 (1972).

373. *Sassa K.*, Earthquakes and Disasters, Kobunsha, Kyoto, 1948 (in Japanese).
374. *Sassa K.*, *Nishimura E.*, On phenomena forerunning earthquakes, *Trans. Am. Geophys. Union*, **32**, 1 (1951).
375. *Sassa K.*, *Nishimura E.*, On phenomena forerunning earthquakes, *Publ. Bur. Central Seismol. Int.*, Ser. A, **19**, 277 (1955).
376. *Sassa K.*, *Ozawa I.*, *Yoshikawa S.*, Observation of the tidal strain of the earth, *Bull. Disas. Prev. Res. Inst.*, Kyoto Univ., **3**, 1 (1952).
377. *Sato H.*, A study of horizontal movement of the earth crust associated with destructive earthquakes in Japan, *Bull. Geogr. Surv. Inst.*, **19**, 89 (1973).
378. *Sato H.*, *Ichihara M.*, On the revision of triangulation after the great Kanto earthquake, *J. Geod. Soc. Japan*, **17**, 178 (1971).
379. *Savage J. C.*, *Burford R. O.*, Accumulation of tectonic strain in California, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, **60**, 1887 (1970).
380. *Savage J. C.*, *Burford R. O.*, Discussion of paper by C. H. Scholz and T. J. Fitch "Strain accumulation along the San Andreas fault", *J. Geophys. Res.*, **76**, 6469 (1971).
381. *Savage J. C.*, *Burford R. O.*, Geodetic determination of plate motion in central California, *J. Geophys. Res.*, **78**, 832 (1973).
382. *Savage J. C.*, *Prescott W. H.*, *Kinoshita W. T.*, Geodimeter measurements along the San Andreas fault. In: Kovach R. L., Nur A. (editors), *Proceedings of the Conference on Tectonic Problems on the San Andreas Fault System*, Stanford Univ. Publ., *Geol. Sci.*, **13**, 44 (1973).
383. *Savarensky E. F.*, On the prediction of earthquakes, *Tectonophysics*, **6**, 17 (1968).
384. *Savarensky E. F.*, Introductory remarks and Soviet national program on earthquake prediction, *Tectonophysics*, **23**, 221 (1974).
385. *Savarensky E. F.*, *Rikitake T.* (editors), *Forerunners of Strong Earthquakes — Tectonophysics*, **14**, 177 (1972).
386. *Savarensky E. F.*, *Hagiwara T.*, *Rikitake T.*, Geophysical principles for studying forerunners of earthquakes, *Tectonophysics*, **14**, 179 (1972).
387. *Schmidt P.*, Zur Fragen der Erdbebenprognose, 1, *Acta Geodaet., Geophys. et Montanist. Acad. Sci. Hung.*, **6**, 449 (1971).
388. *Schmidt P.*, Zur Fragen der Erdbebenprognose, 2, *Acta Geodaet., Geophys. et Montanist. Acad. Sci. Hung.*, **8**, 451 (1973).
389. *Scholz C. H.*, *Microfracturing of Rock in Compression*, Thesis, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Mass., 1967.
390. *Scholz C. H.*, Experimental study of the fracturing process in brittle rock, *J. Geophys. Res.*, **73**, 1447 (1968).
391. *Scholz C. H.*, The frequency-magnitude relation of microfracturing in rock and its relation to earthquakes, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, **58**, 399 (1968).
392. *Scholz C. H.*, *Fitch T. J.*, Strain accumulation along the San Andreas fault, *J. Geophys. Res.*, **74**, 6649 (1969).
393. *Scholz C. H.*, *Fitch T. J.*, Strain and creep in central California, *J. Geophys. Res.*, **75**, 4447 (1970).
394. *Scholz C. H.*, *Sykes L. R.*, *Aggarwal Y. P.*, Earthquake prediction: a physical basis, *Science*, **181**, 803 (1973).
395. *Schuster A.*, On lunar and solar periodicities of earthquakes, *Proc. R. Soc. Lond.*, Ser. A, **61**, 455 (1897).
396. *Sekiya H.*, On the seismic activity in the southern part of Kanto, *Q. J. Seismol.*, Japan Meteorol. Agency, **36**, 13 (1971).
397. *Sekiya H.*, *Tokunaga K.*, On the seismicity near the sea of Enshu, *Rep. Coord. Comm. Earthquake Prediction*, **11**, 96 (1974) (in Japanese).
398. *Семенов А. Н.*, Изменение отношения времен пробега поперечных и продольных волн перед сильными землетрясениями, *Изв. АН СССР, Физика Земли*, № 4, 72 (1969).

399. *Shakal A. F., Willis D. E.*, Estimated earthquake probabilities in the North Circum-Pacific area, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, **62**, 1397 (1972).
400. *Shamsi S., Stacey F. D.*, Dislocation models and seismomagnetic calculations for California 1906 and Alaska 1964 earthquakes, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, **59**, 1435 (1969).
401. *Sheng C. K., Chang C. H., Chen H. C., Li T. C., Huang L. S., Wan T. C., Yan C. J., Lo H. H.*, Earthquakes induced by reservoir impounding and their effect on the Hsinfengkiang dam, Paper presented at the 11th Congress on Large Dams, Madrid, 1973.
402. *Shichi R.*, Continuous observation of crustal movement: development of research and its possible improvement, *Proc. Symp. on Earthquake Prediction*, December 12, 1972, Seismol. Society of Japan, Tokyo, 1973 (in Japanese).
403. *Shimazaki K.*, Periodicity of earthquake occurrence, *Kagaku*, **41**, 688 (1971), (in Japanese).
404. *Shimazaki K.*, Unusually low seismic activity in the focal region of the great Kanto earthquake of 1923, *Tectonophysics*, **11**, 305 (1971).
405. *Shimazaki K.*, Where should we set up a new crustal-deformation observatory in Japan? *Tectonophysics*, **15**, 255 (1972).
406. *Shimazaki K.*, Focal mechanism of a shock at the northwestern boundary of the Pacific Plate: extensional feature of the oceanic lithosphere and compressional feature of the continental lithosphere, *Phys. Earth Planet. Inter.*, **6**, 397 (1972).
407. *Shimazaki K.*, Hidden periodicities of destructive earthquakes at Tokyo, *Zisin (J. Seismol. Soc. Japan)*, Ser. 2, **25**, 24 (1972) (in Japanese).
408. *Shimazaki K.*, Preseismic crustal deformation caused by an underthrusting oceanic plate in eastern Hokkaido, Japan, *Phys. Earth Planet. Inter.*, **8**, 148 (1974).
409. *Shimazaki K.*, Nemuro-oki earthquake of June 17, 1973: a lithospheric rebound at the upper half of the interface, *Phys. Earth Planet. Inter.*, **9**, 314 (1974).
410. *Симбирева И. Г.*, Механизм очагов слабых землетрясений бассейна реки Нарын. Сб. «Экспериментальная сейсмология», отв. ред. акад. М. А. Садовский, М., «Наука», 1971.
411. *Сковородкин Ю. П., Безуглая Л. С., Вадковский В. Н.*, Магнитные исследования в эпицентральной зоне. Сб. «Экспериментальная сейсмология», отв. ред. акад. М. А. Садовский, М., «Наука», 1971.
412. *Small J. B.*, Vertical displacements determined by surveys after the Alaskan earthquake of March 1964. In: *The Prince William Sound, Alaska, Earthquake of 1964 and Aftershocks*, Vol. 3, Environmental Science Services Administration, U. S. Government Printing Office, Washington, D. C., 1969, pp. 21-33.
413. *Smith B. E., Johnston M. J. S., Myren G. D.*, Results from a differential magnetometer array along the San Andreas fault in Central California, *EOS (Trans. Am. Geophys. Union)*, **56**, 1113 (1974).
414. *Smith P. J.*, Earthquakes predicted, *Nature*, **252**, 9 (1974).
415. *Соболев Г. А.*, Перспективы оперативного прогноза землетрясений по электротеллурическим наблюдениям. Сб. «Предвестники землетрясений», Деп. № 5498-73, М., 1973.
416. *Соболев Г. А., Морозов В. Н.*, Локальные возмущения электрического поля на Камчатке и их связь с землетрясениями. Сб. «Физические основания поисков методов прогноза землетрясений», отв. ред. акад. М. А. Садовский, М., «Наука», 1970.
417. *Stacey F. D.*, Seismo-magnetic effect and the possibility of forecasting earthquakes, *Nature*, **200**, 1083 (1963).
418. *Stacey F. D.*, The seismo-magnetic effect, *Pure Appl. Geophys.*, **58**, 5 (1964).

419. *Stacey F. D., Westcott P.*, Seismomagnetic effect — limit of observability imposed by local variations in geomagnetic disturbances, *Nature*, **206**, 1209 (1965).
420. *Steinbrugge K. V., Zacher E. G.*, Creep on the San Andrea fault — fault creep and property damage, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, **50**, 389 (1960).
421. *Stewart G. S.*, Prediction of the Pt. Mugu earthquake by two methods. In: *Kovach R. L., Nur A.* (editors), Proceedings of the Conference on Tectonic Problems on the San Andreas Fault System, Stanford Univ. Publ., *Geol. Sci.*, **13**, 473 (1973).
422. *Stuart W. D.*, Diffusionless dilatancy model for earthquake precursors, *Geophys. Res. Lett.*, **1**, 261 (1974).
423. *Sugimura A., Matsuda T.*, Atera fault and its displacement vectors, *Geol. Soc. Am. Bull.*, **76**, 509 (1965).
424. *Sugimura A., Naruse Y.*, Changes in sea level, seismic upheavals, and coastal terraces in the southern Kanto region, Japan, *1*, *Japan. J. Geol. Geogr.*, **24**, 101 (1954).
425. *Sugimura A., Naruse Y.*, Changes in sea level, seismic upheavals, and coastal terraces in the southern Kanto region, Japan, *2*, *Japan. J. Geol. Geogr.*, **25**, 165 (1955).
426. *Suh J. H.*, The Influence of Site Characteristics on the Measurement of Tidal Strain, Thesis, Colorado School of Mines, Golden, Colo. (personal communication by J. C. Harrison), 1973.
427. *Sutton D. J.*, A fall in P-wave velocity before the Gisborne, New Zealand, earthquake of 1966, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, **64**, 1501 (1974).
428. *Suyehiro S.*, Difference between aftershocks and foreshocks in the relationship of magnitude to frequency of occurrence for the great Chilean earthquake of 1960, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, **56**, 185 (1966).
429. *Suyehiro S.*, Difference in the relationship of magnitude to frequency of occurrence between aftershocks and foreshocks of an earthquake of magnitude 5.1 in central Japan, *Papers Meteorol. Geophys.*, **20**, 175 (1969).
430. *Suyehiro S., Sekiya H.*, Foreshocks and earthquake prediction, *Tectonophysics*, **14**, 219 (1972).
431. *Suyehiro S., Asada T., Ohtake M.*, Foreshocks and aftershocks accompanying a perceptible earthquake in Central Japan, *Papers Meteorol. Geophys.*, **15**, 71 (1964).
432. *Suyehiro Y.*, Some observations on the unusual behaviour of fishes prior to an earthquake, *Bull. Earthquake Res. Inst., Univ. Tokyo, Suppl.*, **1**, 228 (1934).
433. *Sykes L. R.*, Mechanism of earthquakes and nature of faulting on the mid-ocean ridges, *J. Geophys. Res.*, **72**, 2131 (1967).
434. *Sykes L. R.*, Aftershock zones of great earthquakes, seismicity gaps, and earthquake prediction for Alaska and the Aleutians, *J. Geophys. Res.*, **76**, 8021 (1971).
435. *Sylvester A. G., Pollard D. D.*, Observation of crustal tilt preceding an aftershock at San Fernando, California, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, **62**, 927 (1972).
436. *Takada M.*, On the crustal strain accompanied by a great earthquake, *Bull. Disas. Prev. Res. Inst., Kyoto Univ.*, **27**, 29 (1959).
437. *Takahashi H.*, Water injection experiments — deep drilling at Matsushiro (3rd report), *Rep. Coord. Comm. Earthquake Prediction*, **3**, 43 (1970) (in Japanese).
438. *Takahashi H., Hamada K.*, Deep bore-hole observation of the earth's crust activities around Tokyo — introduction of the Iwatsuki Observatory, *Pure Appl. Geophys.*, **113**, № 1/2, 311 (1975).
439. *Takemoto S.*, Strain steps and the dislocation fault model, *Bull. Disas. Prev. Res. Inst., Kyoto Univ.*, **20**, 1 (1970).

440. *Tanaka T., Kato M.*, On the change of crustal elasticity and earth tides, *J. Geod. Soc. Japan*, **20**, 125 (1974).
441. *Tanaka Y.*, On the stages of anomalous crustal movements accompanied with earthquake, *Annual Rep. Disas. Prev. Res. Inst., Kyoto Univ.*, **8**, 91 (1965) (in Japanese).
442. *Tanakadate A., Nagaoka H.*, The disturbance of isomagnetism attending the Mino-Owari earthquake of 1891, *J. College Sci., Imperial Univ., Japan*, **5**, 149 (1893).
443. *Tazima M.*, Accuracy of recent magnetic survey and a locally anomalous behavior of the geomagnetic secular variation in Japan, *Bull. Geogr. Surv. Inst.*, **13**, 1 (1968).
444. *Terada T.*, On luminous phenomena accompanying earthquakes, *Bull. Earthquake Res. Inst., Univ. Tokyo*, **9**, 225 (1931).
445. *Terada T.*, On some probable influence of earthquakes upon fisheries, *Bull. Earthquake Res. Inst., Univ. Tokyo*, **10**, 393 (1932).
446. *Terada T., Miyabe N.*, Deformation of the earth crust in Kwansei districts and its relation to the orographic feature, *Bull. Earthquake Res. Inst., Univ. Tokyo*, **7**, 223 (1929).
447. *Tocher D.*, Creep on the San Andreas fault — creep rate and related measurements at Vineyard, California, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, **50**, 396 (1960).
448. *Tsuboi C.*, Investigation on the deformation of the earth's crust in the Tango district connected with the Tango earthquake of 1927, **4**, *Bull. Earthquake Res. Inst., Univ. Tokyo*, **10**, 411 (1932).
449. *Tsuboi C.*, Investigation on the deformation of the earth's crust found by precise geodetic means, *Jap. J. Astron. Geophys.*, **10**, 93 (1933).
450. *Tsuboi C.*, On seismic activities in and near Japan. In: Benioff H., Ewing M., Howell B. F., Press F. (editors), *Contributions in Geophysics, in Honor of Beno Gutenberg*, Pergamon Press, London, 1958, pp. 87—112.
451. *Tsuboi C.*, Time rate of energy release by earthquakes in and near Japan — Its general uniformity and variability, *J. Phys. Earth*, **12**, 25 (1964).
452. *Tsuboi C., Wadati K., Hagiwara T.*, Prediction of Earthquakes — Progress to Date and Plans for further Development, *Rep. Earthquake Prediction Res. Group Japan, Earthquake Research Institute, Univ. of Tokyo, Tokyo*, 1962.
453. *Tsubokawa I.*, On relation between duration of crustal movement and magnitude of earthquake expected, *J. Geod. Soc. Japan*, **15**, 75 (1969) (in Japanese).
454. *Tsubokawa I.*, On relation between duration of precursory geophysical phenomena and duration of crustal movement before earthquake, *J. Geod. Soc. Japan*, **19**, 116 (1973) (in Japanese).
455. *Tsubokawa I., Ogawa Y., Hayashi T.*, Crustal movements before and after the Niigata earthquake, *J. Geod. Soc. Japan*, **10**, 165 (1964).
456. *Tsumura K.*, Investigation of mean sea level and its variation along the coast of Japan, 1. Regional distribution of sea level variation, *J. Geod. Soc. Japan*, **9**, 40 (1963) (in Japanese).
457. *Tsumura K.*, Investigation of mean sea level and its variation along the coast of Japan, 2. Changes in ground level at various places in Japan as deduced from tidal data and earthquake prediction, *J. Geod. Soc. Japan*, **16**, 239 (1970).
458. *Tsumura K.*, Microearthquake observation and earthquake prediction, *Proc. Symp. Earthquake Prediction, December 12, 1972, Seismol. Society of Japan, Tokyo*, 1973 (in Japanese).
459. *Уломов В. И.*, На пути к прогнозу землетрясений, *Земля и Вселенная*, № 3, 23 (1968).
460. *Ундзенков В. А., Шапиро В. А.*, Сейсмомагнитный эффект на месторождении магнетита, *Изв. АН СССР, Физика Земли*, № 1, 121 (1967).

461. *Usami T.* (editor), *Rikanenpyo* (Science Calendar, Tokyo Astronomical Observatory), Maruzen, Tokyo, 1975 (in Japanese).
462. *Usami T., Hisamoto S.*, Future probability of a coming earthquake with intensity V or more in the Tokyo area, *Bull. Earthquake Res. Inst., Univ. Tokyo*, **48**, 331 (1970) (in Japanese).
463. *Usami T., Hisamoto S.*, Future probability of a coming earthquake with intensity V or more in the Kyoto area, *Bull. Earthquake Res. Inst., Univ. Tokyo*, **49**, 115 (1971) (in Japanese).
464. *Utsu T.*, Aftershocks and earthquake statistics, I, *J. Fac. Sci., Hokkaido Univ.*, Ser. 7, **3**, 129 (1969).
465. *Utsu T.*, Aftershocks and earthquake statistics, III, *J. Fac. Sci., Hokkaido Univ.*, Ser. 7, **3**, 380 (1971).
466. *Utsu T.*, Large earthquakes near Hokkaido and the expectancy of the occurrence of a large earthquake off Nemuro, *Rep. Coord. Comm. Earthquake Prediction*, **7**, 7 (1972) (in Japanese).
467. *Utsu T.*, Aftershocks and earthquake statistics, IV, *J. Fac. Sci., Hokkaido Univ.*, Ser. 7, **4**, 1 (1972).
468. *Utsu T.*, Temporal variations in travel time residuals of P waves from Nevada sources, *J. Phys. Earth*, **21**, 475 (1973).
469. *Utsu T.*, Space-time pattern of large earthquakes occurring off the Pacific coast of the Japanese Islands, *J. Phys. Earth*, **22**, 325 (1974).
470. *Utsu T., Hirota T.*, A note on the statistical nature of energy and strain release in earthquake sequences, *J. Fac. Sci., Hokkaido Univ.*, Ser. 7, **3**, 49 (1968).
471. *Utsu T., Seki A.*, Relation between the area of aftershock region and the energy of the main shock, *Zisin (J. Seismol. Soc. Japan)*, Ser. 2, **7**, 233 (1955) (in Japanese).
472. *Uyeda S.*, *A New Picture of the Earth*, Iwanami Shoten, Tokyo, 1971 (in Japanese).
473. *Vacquier V.*, *Geomagnetism in Marine Geology*, Elsevier, Amsterdam, 1972.
474. *Vine F. J., Matthews D. H.*, Magnetic anomalies over oceanic ridges, *Nature*, **199**, 947 (1963).
475. *Wakita H.*, Water well as a possible indicator of tectonic strain, *Science*, **189**, № 4202, 553 (1975).
476. *Wallace R. E.*, Goals, strategy and task of the earthquake hazard reduction program, *U. S. Geol. Surv. Circ. No. 701*, 1974.
477. *Wang C. Y.*, Earthquake prediction and oriented microcracks in rocks, *Nature*, **251**, 405 (1974).
478. *Watanabe H.*, Variation of seismic velocities before the earthquake of the central part of Kyoto Prefecture, Aug. 18, 1968, as derived from the data of the routine observations of microearthquakes, *Rep. Coord. Comm. Earthquake Prediction*, **11**, 112 (1974) (in Japanese).
479. *Weibull W.*, A statistical distribution function of wide application, *J. Appl. Mech.*, **18**, 293 (1951).
480. *Whitcomb J. H., Garmany J. D., Anderson D. L.*, Earthquake prediction: variation of seismic velocities before the San Fernando earthquake, *Science*, **180**, 632 (1973).
481. *Whitcomb J. H., Kanamori H., Hadley D.*, Earthquake prediction: variation of seismic velocities in Southern California, *EOS (Trans. Am. Geophys. Union)*, **55**, 355 (1974).
482. *Whitten C. A.*, Measurements of earth movements in California, *Calif. Dept. Natural Resources, Div. of Mines Bull.*, **171**, 75 (1955).
483. *Whitten C. A.*, Crustal movement in California and Nevada, *Trans. Am. Geophys. Union*, **37**, 393 (1956).
484. *Whitten C. A.*, Geodetic measurements in the Dixie Valley area, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, **47**, 321 (1957).

485. *Wideman C. J., Major M. W.*, Strain steps associated with earthquakes, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, **57**, 1429 (1967).
486. *Wilson J. T.*, A new class of faults and their bearing on continental drift, *Nature*, **207**, 343 (1965).
487. *Wilson J. T.*, Mao's almanac: 3,000 years of killer earthquakes, *Saturday Rev. Sci.*, February 19, 60 (1972).
488. *Wood M. D.*, Time dependent tilt response to ocean loading for sites across the San Andreas fault. In: *Kovach R. L., Nur A.* (editors), Proceedings of the Conference on Tectonic Problems on the San Andreas Fault System, Stanford Univ. Publ., Geol. Sci., **13**, 124 (1973).
489. *Wood M. D., Allen R. V.*, Anomalous microtilt preceding a local earthquake, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, **61**, 1801 (1971).
490. *Wyss M.*, Will there be a large earthquake in Central California during the next two decades? *Nature*, **251**, 126 (1974).
491. *Wyss M.*, Sea level, magnetic field and P-residuals before the Sitka earthquake of 1972, *Pure Appl. Geophys.*, **113**, № 1/2, 297, (1975).
492. *Wyss M.*, Precursors to the Garm earthquake of March 1969, *J. Geophys. Res.*, **80**, № 20, 2926 (1975).
493. *Wyss M., Holcomb D. J.*, Earthquake prediction based on station residuals, *Nature*, **245**, 139 (1973).
494. *Wyss M., Johnston A. C.*, A search for teleseismic P residual changes before large earthquakes in New Zealand, *J. Geophys. Res.*, **79**, 3283 (1974).
495. *Wyss M., Lee W. H. K.*, Time variations of the average earthquake magnitude in Central California. In: *Kovach R. L., Nur A.* (editors), Proceedings of the Conference on Tectonic Problems on the San Andreas Fault System, Stanford Univ. Publ., Geol. Sci., **13**, 24 (1973).
496. *Yamada J.*, A water-tube tiltmeter and its applications to crustal movement studies, *Spec. Bull. Earthquake Res. Inst., Univ. Tokyo*, **10**, 1 (1973) (in Japanese).
497. *Yamaguti S.*, Deformation of the earth's crust in Idu Peninsula in connection with the destructive Idu earthquake of Nov. 26, 1930, *Bull. Earthquake Res. Inst., Univ. Tokyo*, **15**, 899 (1937).
498. *Yamazaki Y.*, Electrical conductivity of strained rocks (1st paper), Laboratory experiments on sedimentary rocks, *Bull. Earthquake Res. Inst., Univ. Tokyo*, **44**, 783 (1965).
499. *Yamazaki Y.*, Electrical conductivity of strained rocks (2nd paper), Further experiments on sedimentary rocks, *Bull. Earthquake Res. Inst., Univ. Tokyo*, **44**, 1553 (1966).
500. *Yamazaki Y.*, Electrical conductivity of strained rocks (3rd paper), A resistivity variometer, *Bull. Earthquake Res. Inst., Univ. Tokyo*, **45**, 849 (1967).
501. *Yamazaki Y.*, Electrical conductivity of strained rocks (4th paper), Improvement of the resistivity variometer, *Bull. Earthquake Res. Inst., Univ. Tokyo*, **46**, 957 (1968).
502. *Yamazaki Y.*, Coseismic resistivity steps, *Tectonophysics*, **22**, 159 (1974).
503. *Yamazaki Y.*, Precursors and coseismic resistivity changes, *Pure Appl. Geophys.*, **113**, № 1/2, 219 (1975).
504. *Yamazaki Y., Rikitake T.*, Local anomalous changes in the geomagnetic field at Matsushiro, *Bull. Earthquake Res. Inst., Univ. Tokyo*, **48**, 637 (1970).
505. *Yanagihara K.*, Geomagnetic changes associated with the Matsushiro earthquakes. In: *Nagata T.* (editor), Proc. Symp. Geomagnetic Changes Associated with Earthquakes and Volcanic Activities, Geophys. Institute, Univ. of Tokyo, 1966, pp. 22—24 (in Japanese).
506. *Yanagihara K.*, Secular variation of the electrical conductivity anomaly in the Kanto district, *Rep. Coord. Comm. Earthquake Prediction*, **8**, 37 (1972) (in Japanese).

507. *Yanagihara K.*, Secular variation of the electrical conductivity anomaly in the central part of Japan, *Mem. Kakioka Magn. Obs.*, **15**, 1 (1972).
508. *Yoshikawa T., Kaizuka S., Ota Y.*, Crustal movement in the late Quaternary revealed with coastal terraces on the southeast coast of Shikoku, southwestern Japan, *J. Geod. Soc. Japan*, **10**, 116 (1964).
509. *Yoshimatsu T.*, Universal earth-currents and their local characteristics, *Mem. Kakioka Obs., Suppl.*, **1**, 1 (1957).
510. *Yukutake T., Tachinaka H.*, Geomagnetic variation associated with stress change within a semi-infinite elastic earth caused by a cylindrical force source, *Bull. Earthquake Res. Inst., Univ. Tokyo*, **45**, 785 (1967).

## ПРЕДМЕТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ

- Аномальный отлив 146  
Афтершоки 201—202, 214, 280
- Вейбула распределение 306—309, 341  
Вероятность  
  «апостериорная» 295  
  «априорная» 295  
  кумулятивная 306, 309—311  
  общая 295, 297—302  
  предварительная 299, 310  
Вертикальные смещения 120—144,  
  146, 158, 212  
Время предвестника 174, 175, 195, 269,  
  312, 336—342, 344, 345  
  зависимость от магнитуды 175,  
  254, 312  
Высокочастотные сейсмические волны  
  207
- Геодиметр 56, 58, 106—118  
Геоманнитные измерения 62—63,  
  233—238, 241, 242, 255, 335  
Горизонтальные смещения 89—105,  
  108, 113—118  
Гутенберга—Рихтера формула 186
- Дамбары формула 144—145  
Дебит нефтяных скважин 270, 336  
Деформации земной коры 89—105,  
  108—112, 157, 160, 167, 172—173,  
  300, 304, 313, 336  
  изменение скорости деформаций  
  141, 143
- максимальные деформации сдви-  
  га 84, 89—106, 109, 110  
  несейсмические 145  
  предельные 17, 20, 85, 303—306,  
  310  
  скачок (деформаций) 155, 160—  
  163, 253  
Деформографы 153—155, 172  
Дилатансия 18, 177, 204, 249, 255, 266,  
  271, 275, 276, 312, 342, 343  
  модели 278—282
- Закачка жидкости в скважины 275,  
  348, 349, 351—353  
Землетрясения  
  Аляскинское 1964 г. 103, 132—133  
  Ашхабадское 1948 г. 134  
  Денверские (с 1962 г.) 274, 348—  
  349  
  Канто 1923 г. 28, 31, 45—46, 85—  
  86, 107, 122, 165, 198—200, 209,  
  215, 255, 310  
  Керн-Каунти 1952 г. 100—102,  
  131  
  Мекерингское 1968 г. 136—137,  
  267  
  Найкайское 1946 г. 93, 128, 267  
  Нобийское 1891 г. 27, 45, 83, 120  
  Санрику 1933 г. 28, 200  
  Сан-Франциско 1906 г. 96—99,  
  143, 208  
  Северный Идзу 1930 г. 88, 125,  
  310  
  Синтайское 1966 г. 34, 268  
  Танго 1927 г. 86—88, 123, 147  
  Ташкентское 1966 г. 141—142,  
  271  
  Форт-Техон 1857 г. 96, 194, 208,  
  311  
  Фукуйское 1948 г. 32, 94—96, 128,  
  161  
  Чилийское 1960 г. 133, 201  
  Эдо 1855 г. 30, 35, 41, 195, 217  
Земные токи *см.* Теллурические токи

- Значения  $b$  186, 201—202, 275, 280, 334
- Крип 19, 186, 257—262, 335, 342
- Магнитные аномалии в океане 180—181
- Магнитуда  
 прогноз 286—289, 294  
 связь с радиусом деформированной области 144—145, 296  
 связь с энергией 286
- Мареографические наблюдения 59, 147—150, 212
- Мацусирские землетрясения 42, 52, 129, 162—163, 197, 204, 215, 228, 232, 265, 349
- Механизм землетрясений 204, 273, 335
- Микроземлетрясения 60, 129, 186—194, 197, 204, 215, 216, 228, 334, 349
- Микротрещины 215, 272, 274—278
- Наклонометры 151—153
- Наклоны земной поверхности 157—160, 166—175, 313, 336  
 скачок (наклона) 160—163, 172
- Невязки времен  $P$ -волн 226—229
- Необычная погода 36—40
- Нивелирование 118—136, 138—141, 143, 149, 159, 304, 346
- Ориентация осей сжатия 204—207, 281, 335
- Остаточная намагниченность 244—245
- Оценка сейсмической опасности 300—303
- Поведение рыб и животных 25—36
- Подземные воды 40, 267—270, 335
- Предвестники  
 время см. Время предвестника  
 классификация 176, 313  
 тип А 338—342, 345  
 тип В 339, 342
- Прогноз  
 времени 289, 298, 310, 341, 344  
 использование предвестников 294—303
- магнитуды 293, 294—297, 312, 344  
 на основе модели дилатансии 311—312  
 статистический 283—294, 312, 343  
 типы 20  
 этапы 343
- Протонный магнитометр 62—63, 180, 233, 236—238, 240, 243
- Пьезостаточная намагниченность 244
- Рикитаке модель 235, 255  
 Рой землетрясений 124, 197—198
- Сейсмическое затишье 208—211, 213—215
- Сейсмомагнитный эффект 19, 230—232, 234, 238—240, 245
- Сила тяжести 19, 264—266
- Скорости сейсмических волн 220—229, 276—278  
 отношение  $V_p/V_s$  18, 221—226, 276—277, 280, 281, 335  
 поперечные волны 228—229, 276, 279, 335  
 продольные волны 18, 224, 226, 276, 279, 335
- Содержание радона 270—271, 280, 335
- Тектоника плит 110, 113, 178, 182—185, 198, 303
- Тектономагнетизм 244—246
- Теллурические токи 19, 26, 246—247, 335
- Триангуляция 80—119, 305
- Упругая отдача 184, 198, 263
- Форшоки 194—202, 275, 334, 336, 337
- Хубберта и Руби теория 274, 349
- Электрическое сопротивление 19, 63, 247—254, 277, 280, 281, 335
- Эффект полости 164

# ОГЛАВЛЕНИЕ

ОТ РЕДАКТОРА ПЕРЕВОДА	5
ПРЕДИСЛОВИЕ АВТОРА К РУССКОМУ ИЗДАНИЮ	9
ПРЕДИСЛОВИЕ	10
1. ВВОДНЫЕ ЗАМЕЧАНИЯ	13
2. ПРЕДВИДЕНИЕ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ — РАЗЛИЧНЫЕ ЛЕГЕНДЫ	24
2.1. Необычное поведение рыб и животных	24
2.2. Необычная погода	36
2.3. Подземные воды	40
2.4. Магнетизм	41
2.5. Расположение небесных тел	41
2.6. Сверхъестественная чувствительность	42
2.7. Другие индикаторы	43
3. ЗАРОЖДЕНИЕ НАУКИ О ПРЕДСКАЗАНИИ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ	44
3.1. Начало исследований землетрясений в Японии	44
3.2. Нобийское землетрясение 1891 г. и Императорский комитет по исследованию землетрясений	45
3.3. Землетрясение 1923 г. в Канто	45
3.4. Сейсмологический институт (ERI)	46
4. ПРОГРАММЫ ПРЕДСКАЗАНИЯ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ	49
4.1. «Проект исследований по предсказанию землетрясений»	49
4.2. Японская программа	51
4.3. Американско-японское сотрудничество	65
4.4. Американская программа	67
4.5. Советская программа	74
4.6. Программы других стран	75
4.7. Международная комиссия по предсказанию землетрясений	77
5. ДЕФОРМАЦИИ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ ПО ГЕОДЕЗИЧЕСКИМ ДАННЫМ	80
5.1. Исторические сведения о деформациях земной поверхности	80
5.2. Метод триангуляции	80
5.3. Измерения деформаций земной поверхности с помощью три- ангуляции	83
5.4. Метод геодеметрических измерений	106
5.5. Методы нивелирования	118
5.6. Определение деформаций земной поверхности методом ниве- лирования	119

5.7. Аномальное поднятие земной поверхности перед землетрясениями	137 ✓
5.8. Зависимость между магнитудой землетрясения и площадью поверхности, охваченной деформациями	144
5.9. Несейсмические деформации земной коры	145
<b>6. ДЕФОРМАЦИИ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ ОТНОСИТЕЛЬНО УРОВНЯ МОРЯ</b>	146
6.1. Аномальный морской отлив перед землетрясением	146
6.2. Уровнемерные наблюдения	147
<b>7. НЕПРЕРЫВНЫЕ НАБЛЮДЕНИЯ ДВИЖЕНИЙ ЗЕМНОЙ КОРЫ</b>	151
7.1. Наклономеры	151
7.2. Деформограф	153
7.3. Обсерватории для наблюдения за движениями земной коры	155
7.4. Вековые вариации наклонов и деформаций и их связь с региональными движениями земной коры	157
7.5. Скачок хода деформаций при землетрясениях	160
7.6. Влияние строения земли в точке наблюдения	163
7.7. Вариации наклонов и деформаций как предвестники землетрясений	164 ✓
7.8. Земные приливы	176
<b>8. СЕЙСМИЧЕСКАЯ АКТИВНОСТЬ</b>	178
8.1. Связь с тектоникой плит	178
8.2. Региональная сейсмичность и микроземлетрясения	186
8.3. Форшоки	194
8.4. Области сейсмического затишья	208
8.5. Наблюдения микроземлетрясений в глубоких скважинах	216
8.6. Подводная сейсмология	218
<b>9. ИЗМЕНЕНИЕ СКОРОСТЕЙ СЕЙСМИЧЕСКИХ ВОЛН</b>	220
9.1. Изменения отношения $V_p/V_s$	221
9.2. Изменения скоростей сейсмических волн и невязки времен пробега	226
9.3. Анизотропия $V_s$	228
<b>10. ГЕОМАГНИТНЫЕ И ГЕОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ</b>	230
10.1. Классические наблюдения изменений геомагнитного поля в связи с землетрясениями	230
10.2. Современные магнитометры и магнитная съемка в настоящее время	233
10.3. Проблемы подавления помех	234
10.4. Сейсмомагнитный эффект	238
10.5. Геомагнитные явления, связанные с заполнением водохранилищ и со взрывами	240
10.6. Изменение геомагнитного поля — предвестник землетрясения	241 ✓
10.7. Теория тектомагнетизма	244
10.8. Аномальные изменения земных токов	246
10.9. Изменения удельного электрического сопротивления пород	247
10.10. Изменения в геомагнитных вариациях	254

11. АКТИВНЫЕ РАЗЛОМЫ И СКЛАДЧАТОСТЬ	257
11.1. Медленные подвижки по разломам	257
11.2. Разломы, испытывавшие частые подвижки в прошлом	259
11.3. Современное складкообразование	262
11.4. Береговые террасы	263
12. ДРУГИЕ ДАННЫЕ, ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ДЛЯ ПРОГНОЗА ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ	264
12.1. Сила тяжести	264
12.2. Подземные воды	267✓
12.3. Дебит нефтяных скважин	270
12.4. Содержание радона	270✓
13. ЛАБОРАТОРНЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ	272
13.1. Опыты по разрушению пород	272
13.2. Физические свойства пород при больших напряжениях	275
14. МОДЕЛИ ДИЛАТАНСИИ	278
14.1. Влажная модель	278
14.2. Сухая модель	281
15. ТЕОРИЯ ПРЕДСКАЗАНИЯ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ	283
15.1. Статистический прогноз землетрясений	283
15.2. Эмпирический подход к прогнозу землетрясений, основанный на достоверных наблюдениях предвестников	294
15.3. Предельные деформации и вероятность возникновения землетрясения	303
15.4. Прогноз, основанный на модели дилатансии	311
15.5. Статистический анализ предвестников землетрясений	312
15.6. Четыре этапа прогноза землетрясения	343
15.7. Исследование операций применительно к прогнозу землетрясений	345
16. АКТИВНОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ НА ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ	348
16.1. Денверские землетрясения	348
16.2. Эксперименты с закачкой воды в Маусиро	349
16.3. Землетрясения и искусственные водохранилища	350
16.4. Эксперименты на нефтяных промыслах Рейнджли	351
16.5. Программа активного воздействия на землетрясения	352
17. КАК РЕАГИРОВАТЬ НА ПРЕДУПРЕЖДЕНИЕ О ЗЕМЛЕТРЯСЕНИИ?	354
17.1. Опыт Маусиро	355
17.2. Каким образом следует доводить до сведения населения предупреждение о землетрясении?	355
17.3. Социально-экономические и политические аспекты реакции людей на прогноз землетрясений	357
ЛИТЕРАТУРА	360
ПРЕДМЕТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ	384

## УВАЖАЕМЫЙ ЧИТАТЕЛЬ!

Ваши замечания о содержании книги, ее оформлении, качестве перевода и др. просим присылать по адресу: 129820, Москва, И-110, ГСП, 1-й Рижский пер., дом 2, изд-во «Мир».

Т. Рикитаке

## ПРЕДСКАЗАНИЕ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

Редактор В. А. Пантаева  
Мл. редактор Е. А. Буркова  
Художник К. О. Остольский  
Художественный редактор Л. Е. Безрученков  
Технический редактор Е. С. Потапенкова  
Корректор К. Л. Водяницкая

ИБ-1066

Сдано в набор 21.08.78.  
Подписано к печати 31.01.79.  
Формат 60×90<sup>1/16</sup>. Бумага типографская № 2.  
Гарнитура литературная. Печать высокая.  
Объем 12,25 бум. л. Усл. печ. л. 24,50.  
Уч.-изд. л. 24,15. Изд. № 27/9755.  
Тираж 4400 экз. Зак. 321. Цена 3 р. 30 к.

Издательство «Мир»  
129820, Москва, И-110, ГСП, 1-й Рижский пер., 2

Ленинградская типография № 8 ЛПО  
«Техническая книга» Союзполиграфпрома  
при Государственном комитете СССР по делам  
издательств, полиграфии и книжной торговли.  
190000, Ленинград, Прачечный пер., 6.

**В 1979 г. В ИЗДАТЕЛЬСТВЕ «МИР»**

**ВЫХОДИТ В СВЕТ КНИГА**

**Дж. Джекобс. ЗЕМНОЕ ЯДРО.** Пер. с англ., 18 л., цена 3 р.

В книге видного английского геофизика рассмотрены основные проблемы физики земного ядра, а также важнейшие свойства ряда оболочек Земли. Описаны физические свойства Земли, происхождение ядра, термическая история, состав, магнитное поле, а также проблема ядер других планет.

Рассчитана на геофизиков, геологов, астрономов — как специалистов, так и студентов.

План 1979 г., № 112

Эту книгу вы можете приобрести во всех магазинах, распространяющих научно-техническую литературу.

**В 1979 Г. В ИЗДАТЕЛЬСТВЕ «МИР»**

**ВЫХОДИТ В СВЕТ КНИГА**

**Х. Гупта, Б. Растоги. ПЛОТИНЫ И ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ.** Пер. с англ., 17 л., цена 2 р. 90 к.

Книга видных индийских специалистов посвящена обнаруженному в последние годы возрастанию сейсмической активности в районах крупных плотин и заполненных водохранилищ. Естественно, эта проблема имеет большое практическое значение; кроме того, она тесно связана с проблемой прогноза землетрясений.

Авторы дают обширную сводку «возбужденных» землетрясений, а также теоретическое объяснение их механизма.

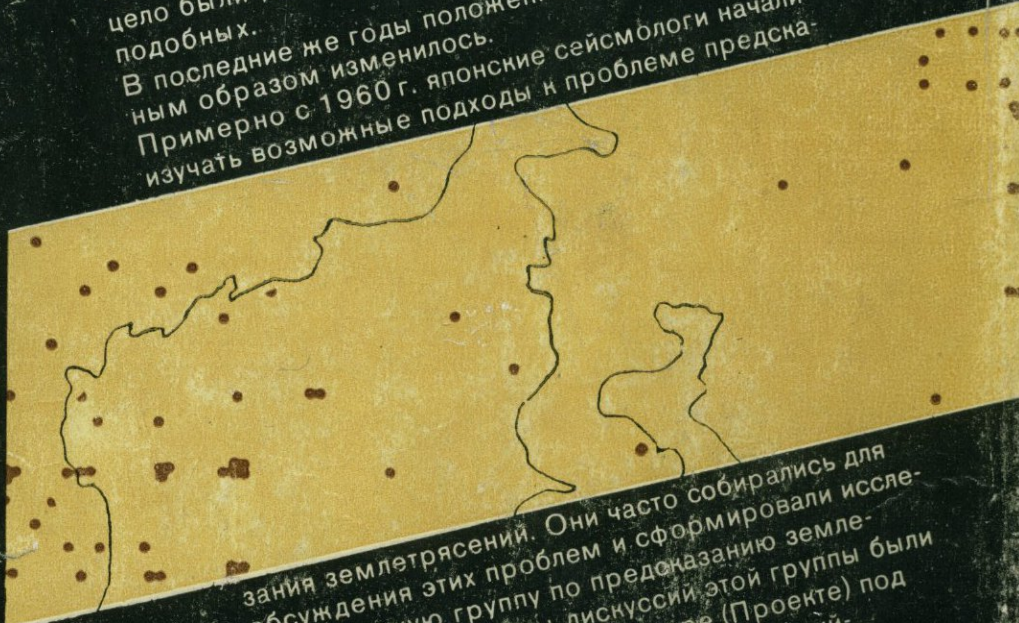
Книга представит большой интерес для широкого круга специалистов — геологов, геофизиков, инженеров-строителей и гидростроителей.

План 1979 г., № 111

Эту книгу вы можете приобрести во всех магазинах, распространяющих научно-техническую литературу.

Накопление фактов, наблюдаемых перед землетрясением, с течением времени позволило японским сейсмологам выявить возможные предвестники землетрясений. Всего каких-нибудь 20-30 лет тому назад для профессионального сейсмолога было еще непривычно говорить о предсказании землетрясений. Прогнозы такого рода всецело были уделом гадалок, астрологов и им подобных.

В последние же годы положение коренным образом изменилось. Примерно с 1960 г. японские сейсмологи начали изучать возможные подходы к проблеме предска-



зания землетрясений. Они часто собирались для обсуждения этих проблем и сформировали исследовательскую группу по предсказанию землетрясений. Результаты дискуссий этой группы были опубликованы в кратком обзоре (Проекте) под названием «Предсказание землетрясений — современные достижения и планы дальнейших исследований».

Проект отражает представления японских сейсмологов о путях решения проблемы прогноза землетрясений и является основой для составления конкретных программ по поиску предвестников землетрясений на ближайшие годы. В Проекте подчеркивается, что в первую очередь необходимо получить основные данные для возможного прогноза и не торопиться с конкретными предсказаниями. Там же дается анализ достоинств и недостатков отдельных направлений: геодезических работ, непрерывных наблюдений движений земной коры, сейсмической активности, скоростных и геоэлектрических явлений и т.п.