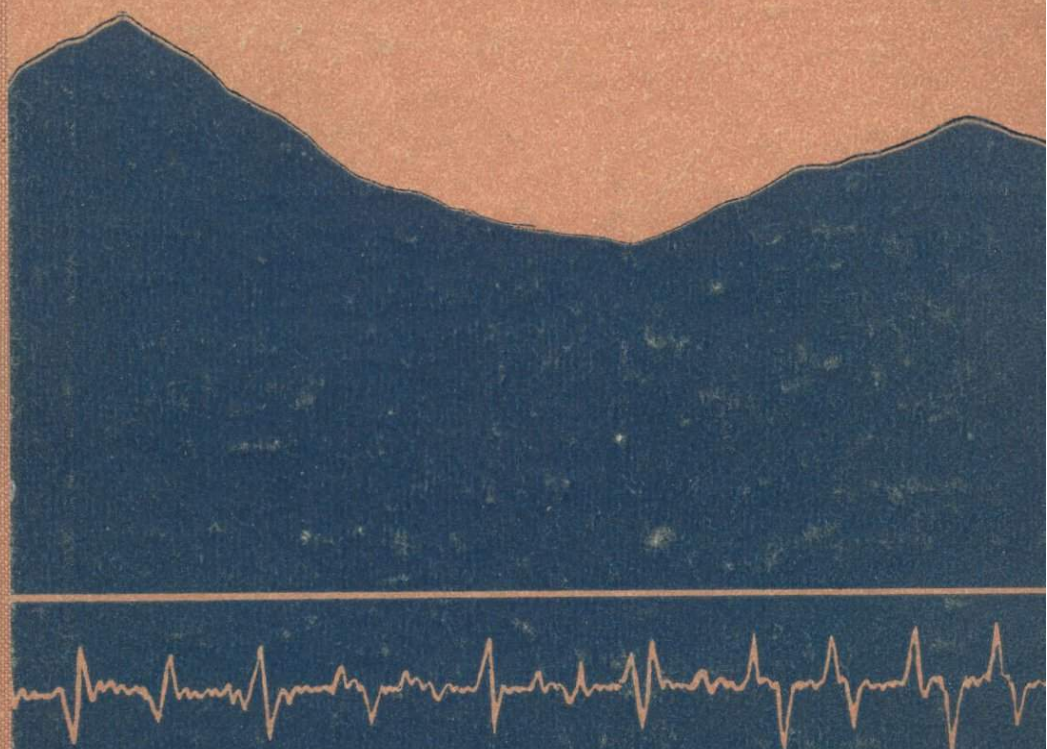


ГИДРОГЕОСЕЙСМОЛОГИЧЕСКИЕ  
ПРЕДВЕСТНИКИ  
ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ



АКАДЕМИЯ НАУК УЗБЕКСКОЙ ССР  
ИНСТИТУТ СЕЙСМОЛОГИИ

# ГИДРОГЕОСЕЙСМОЛОГИЧЕСКИЕ ПРЕДВЕСТНИКИ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

Под редакцией  
академика АН УзССР Г. А. МАВЛЯНОВА

4003

ТАШКЕНТ. ИЗДАТЕЛЬСТВО «ФАН» УЗБЕКСКОЙ ССР. 1983



УДК 550.343: (550.83+550.84)

**Гидрогеосейсмологические предвестники землетрясений.** Коллектив.  
Ташкент. Изд-во «Фан» УзССР, 1983.

В монографии изложены сведения о гидрогеосейсмологических (химический и газовый состав, изотопы отдельных элементов, радиоактивность, физические параметры) предвестниках землетрясений, закономерностях их режима во времени. Особое внимание уделяется выявлению связи гидрогеосейсмологических аномалий с сеймотектонической деятельностью региона. На примере ряда сильных землетрясений, возникших на территории Средней Азии, показаны возможности использования гидрогеосейсмологических параметров для прогноза места и времени землетрясения. Приведены некоторые методы интерпретации и математической обработки полученных результатов с целью выявления корреляционной зависимости отдельных элементов от параметров землетрясений.

Для гидрогеологов, сейсмологов, геофизиков, занимающихся вопросами прогнозирования землетрясений.

Лит. 174 назв., ил. 36, табл. 5

Рецензенты:

докт. геол.-мин. наук *В. А. Кудряков*,  
канд. геол.-мин. наук *Е. Е. Егембердиев*

Г  $\frac{1903020000-2120}{М 355 (04)-83}$  158-83

© Ташкент, Изд-во «Фан» УзССР, 1983 г.

## ВВЕДЕНИЕ

В течение 1975—1980 гг. на территории Средней Азии произошли довольно сильные землетрясения, такие как Газлийское (апрель—май 1976 г.), Исфара-Баткенское (январь 1977 г.), Таваксайское (декабрь 1977 г.), Алайское (ноябрь 1978 г.) и др., накануне которых наряду с геофизическими, сейсмологическими, геодинамическими отмечались значительные гидрогеохимические и гидродинамические аномалии. Комплекс параметров, включающих газы и их изотопы, макро-и микрокомпоненты, радиоактивные элементы и гидродинамические показатели подземных вод, в содержании которых проявляются аномалии в периоды, предшествующие и сопутствующие землетрясениям, мы назвали гидрогеосейсмологическими предвестниками землетрясений.

Современный этап развития комплексных исследований по поискам предвестников и прогнозу землетрясений ознаменовался признанием гидрогеосейсмологического метода и широким его использованием во многих сейсмоактивных районах земного шара. Это новое направление основано на достижениях в области применения гидрогеологических методов исследования, данных геологии и геофизики о развитии геотектонических процессов в земной коре и результатах изотопных и ядерно-физических методов исследования.

В монографии приведены результаты исследований, являющихся логическим продолжением и развитием на более высоком качественном уровне гидрогеосейсмологических работ, начатых в Узбекистане еще до землетрясения 1966 г.

В работе содержатся новые данные об особенностях проявления гидрогеосейсмологических аномалий перед различными землетрясениями. Сделана первая попытка количественной оценки и выявления корреляционных зависимостей между наблюдаемыми аномалиями и параметрами землетрясений, а также проведена математическая обработка многолетних разнохарактерных сведений о предвестниках землетрясений.

Монография написана, в основном, по результатам исследований отдела гидрогеосейсмологии на Ташкентском геодинамичес-

ком полигоне. Кроме того, приведены материалы по Кызылкумскому полигону, Иссыккульскому артезианскому бассейну. Систематические режимные наблюдения за изменением гидрогеосейсмологических параметров, отбор проб, их анализ выполняли сотрудники отдела, а со второй половины 1979 г. — работники Комплексной опытно-методической партии по поиску предвестников землетрясений. Полевые и лабораторные эксперименты проведены Т. Закировым, Р. Зиявуддиновым, Н. Умарходжаевой, М. Захидовой, Ш. Алиевой, Ш. Юсуповым, С. С. Сидиковым, М. Ташмухамедовым.

Разделы и главы монографии написаны А. Н. Султанходжаевым (введение, краткий обзор, гл. 1—7— статистическая обработка, заключение), С. У. Латиповым (введение, гл. 3, 4, статистическая обработка, заключение), И. Г. Черновым (гл. 5, 6, 7, статистическая обработка, заключение), Ф. Г. Зиган (введение, краткий обзор, гл. 1, статистическая обработка, заключение), Л. А. Хасановой (введение, гл. 2, заключение) при участии Т. З. Закирова (гл. 4), М. Г. Ташмухамедова (гл. 3), С. Сидикова (гл. 5, 6), В. Ф. Писаренко, А. Ф. Кушнера, С. Л. Цванга, Т. С. Желанкиной (статистическая обработка). Авторы выражают признательность коллективу сотрудников отдела гидрогеосейсмологии Института сейсмологии АН УзССР за их активное участие в проведении исследований.

## КРАТКИЙ ОБЗОР СОВРЕМЕННОГО СОСТОЯНИЯ ИЗУЧЕННОСТИ ГИДРОГЕОСЕЙСМОЛОГИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ПОИСКА ПРЕДВЕСТНИКОВ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

Обзор современного состояния изученности проблемы прогнозирования землетрясений различными методами дан в трудах М. А. Садовского, Е. Ф. Саваренского, В. Л. Барсукова, Т. Рикитаке, В. И. Мячкина и др. (1—8). Мы ограничимся изложением зарождения и развития гидрогеосейсмологических методов поиска предвестников землетрясений.

Разрушительные землетрясения, наносящие большой ущерб человечеству, издавна привлекали внимание естествоиспытателей. В печати появлялись отдельные сообщения об изменении температур и уровней воды в скважинах и колодцах, фонтанировании гейзеров и исчезновении источников, случаях внезапной дегазации в результате проявления землетрясений. Однако в этих работах сообщалось об эпизодических изменениях гидродинамических или просто гидравлических показателей нередко в момент и после проявления землетрясений. Никаких достоверных данных об изменении газохимического и изотопного состава подземных вод в периоды, предшествующие землетрясениям, не было известно.

В 1966 г. благодаря работам сотрудников ГИДРОИНГЕО МГ УзССР, проводившим систематические еженедельные наблюдения за режимом газохимического и изотопного состава подземных вод Приташкентского артезианского бассейна с 1965 г., представилась возможность установить неизвестное ранее явление — изменение газохимического и изотопного состава подземных вод в периоды, предшествующие и сопутствующие землетрясениям. Ташкентское землетрясение послужило объектом интересных и комплексных исследований и явилось, по существу, толчком к проведению систематических гидрогеосейсмологических работ.

Впервые удалось показать значение гидрогеохимических данных для изучения современных тектонических процессов, выявлено изменение химического и газового состава подземных вод в периоды, предшествующие и сопутствующие землетрясению, и тем самым проложен путь к его предсказанию.

В настоящее время эти исследования получили широкое признание и дальнейшее развитие не только у нас в стране, но и за

рубежом. Гидрогеохимические исследования по поиску предвестников землетрясений проводятся сейчас во всех сейсмоактивных зонах Советского Союза.

На примере Ташкентского и Ферганского геодинамических полигонов установлено, что гидрогеохимические аномалии прослеживаются по широкому спектру элементов-индикаторов, включая углекислый газ, водород, кислород, азот, химически нейтральные радиогенные газы — гелий, аргон и радон, а также такие компоненты подземных вод, как фтор, хлор, бор, ртуть, показатель концентрации водородных ионов (рН), величину окислительно-восстановительного потенциала (Еh), затрубное и пластовое давление, температуру и расход. Проявляются эти изменения периодически и коррелируют с активностью глубинных тектонических процессов. Анализ материалов систематических наблюдений за изменениями химического и газового составов подземных вод показал, что гидрогеохимические аномалии прослеживаются как в эпицентральных зонах землетрясений, так и при «транзитных» землетрясениях. Результаты работ, начатых в Узбекистане, показали перспективность подобных исследований и в других районах Советского Союза, и за рубежом.

В настоящее время комплекс гидрогеохимических исследований проводят ИСССАН Таджикской ССР в содружестве с ГЕОХИ АН СССР и ВИМСом на разных участках вдоль крупного глубинного Гиссаро-Кокшаальского разлома и его оперений в Оби-Гарме, Ходжа-Оби-Гарме, Яврозе и на других участках. На скважинах установлена аппаратура для непрерывного автоматического замера содержания радона в подземных водах, а также их дебитов и температуры. Систематически обрабатывается гидрогеохимическая информация. Установлена определенная зависимость величины изменения содержания газов с удалением эпицентра от регистрирующей станции, энергии землетрясений и других факторов (8). В соответствии с решением советско-американской комиссии по сотрудничеству в области охраны окружающей среды объектом совместных сейсмических наблюдений выбраны Душанбино-Гармский сейсмоактивный регион и район разлома Сан-Андреас. Это открывает новые перспективы на пути решения одного из труднейших вопросов — прогноза времени возникновения землетрясения различными методами, в том числе гидрогеохимическими.

Геохимические исследования в комплексе с геофизическими, геологическими, геодезическими и др. осуществляются в Институте сейсмологии АН КазССР. Предусматривается изучение изменения концентрации газового (гелий, радон) и химического состава подземных вод.

Гидрогеосейсмологические исследования проводятся в Институте сейсмологии АН ТуркмССР совместно с сотрудниками Управления геологии СМ Туркменской ССР. Гидрогеологи Южно-Қарақумской экспедиции осуществляют систематические ре-

жимные наблюдения за изменением химического состава и температуры минеральных вод на Ашхабадском месторождении. Отмечены определенные закономерности в изменении химического состава и повышения температуры накануне землетрясений.

Институт сейсмологии АН КиргССР приступил к организации гидрогеохимических исследований, направленных на поиски предвестников землетрясений. Изучение влияния местных землетрясений на изменение газохимического состава подземных вод курорта Джеты-Огуз показало, что наиболее информативными параметрами часто являются радон, в меньшей степени — углекислый газ, гидрокарбонаты, хлор, кальций, температура, иногда концентрация водородных ионов.

В Институте геологических наук АрмССР с 1973 г. проводятся гидрогеосейсмологические исследования на Зангезурском и Приереванском участках, где осуществляются режимные наблюдения за поведением химического состава минеральных вод, особенно газовой составляющей (He, Rn, CO<sub>2</sub>). Ученые разработали программу дальнейших исследований, рассчитанных на 8—10 лет. Получены первые обнадеживающие результаты (9).

Многолетние исследования ученых по данной проблеме на территории Северного Кавказа, в том числе Дагестана, привели к успешному оперативному прогнозу ряда Дагестанских землетрясений 1974—1976 гг. Установлено, что каждый водопункт имеет набор информативных компонентов для поисков гидрогеохимических предвестников землетрясений. Ученые Дагестана пришли к выводу, что наилучшие индикаторы — макрокомпоненты и среди них универсальный гидрогеохимический показатель — содержание хлора в подземных водах (10, 11). Выявлено изменение химического состава при местных землетрясениях с  $K \geq 8$ ; по радиусу ореолов геохимических аномалий определяется место землетрясения, по площади — его сила. В зависимости от силы формирующегося землетрясения и расстояния от очага до пункта наблюдения, гидрогеохимические аномалии возникают за 2—10 суток до толчка. Интересны исследования, проводимые в Дагестане С. С. Сардаровым, который разработал способ предсказания времени возникновения землетрясения в сейсмоактивном районе, заключающийся в периодическом измерении в местах разрыва сплошности горных пород в газообразной и жидкой фазе концентрации радиогенных газов с последующим определением величины отношений He/Ar<sup>40</sup> (12). Для повышения точности и надежности способа одновременно измеряется величина теплового потока и по резкому изменению хода периодичности определяемых величин (примерно за 30 часов до первого толчка) устанавливается время возникновения землетрясения.

В результате изучения влияния наиболее сильных землетрясений на физико-химические показатели подземных вод Северного Кавказа установлено, что большинству из них предшествовали и сопровождали их геодинамические эффекты, выразившиеся в

сильном изменении дебитов воды по скважинам и источникам не только в эпицентральных зонах (100—300 км от эпицентра), но и далеко за их пределами. Определенный интерес представляют исследования на нефтепромыслах Чечено-Ингушетии и Ставрополя по выявлению влияния землетрясения на добычу нефти и изменение пластовых и забойных давлений в эксплуатационных скважинах.

В настоящее время проводятся систематические гидрогеосейсмологические наблюдения за режимом термальных вод вулкана Менделеева на острове Кунашир (13), изучаются метеоусловия, сезонные колебания температуры, морские и упругие приливы и т. д. для установления нормального геохимического фона. Ученые СахКНИИ работают в тесном контакте с учеными Узбекистана. Результаты наблюдений за поведением таких компонентов, как хлор, сульфаты, радон и др. показывают, что продолжение подобных исследований позволит установить критерии надежного выделения гидрогеохимических предвестников, которые в комплексе с геофизическими методами значительно повысят возможности научного прогнозирования времени и места сильных землетрясений.

Большое значение придается изучению гидродинамического режима. Изменение состава подземных вод в периоды, предшествующие и сопутствующие землетрясениям, известно с глубокой древности. Отмечались резкие изменения дебита различных источников вплоть до их полного исчезновения или появления нового, неизвестного ранее восходящего ключа. Об этом упоминал в своем трактате о природе самоизливающихся колодцев еще Абу Райхан Беруни. Подобные явления позднее прослеживались в различных районах земного шара. Влияние землетрясений на режим минеральных вод описал академик Б. Б. Голицын еще в 1912 г. (14). В результате Лиссабонского землетрясения 1755 г. существенно нарушился режим источников подземных вод в Чехословакии и Франции. Ахалкалакское землетрясение 1899 г. изменило дебит источника в Боржоме. Заметные изменения уровня подземных вод от землетрясения 1938 г. в г. Ташкенте были отмечены Г. В. Поповым (15). Б. М. Родославов (16) сообщает о нарушении расхода источников в бассейне р. Марица в периоды, предшествующие и сопутствующие землетрясению 1928 г.

Изменение пластового давления и уровня подземных вод с целью поиска предвестников землетрясений систематически наблюдается в ряде районов Советского Союза. Например, весьма интересные работы проводятся на Кунаширском полигоне с автоматической непрерывной регистрацией уровня подземных вод (17) и на Ташкентском и Ферганском геодинамических полигонах с дискретной ежесуточной регистрацией гидрогеодинамических параметров (18, 19).

Жители Исландии давно заметили изменение периодичности извержения гейзеров перед землетрясениями. Профессор Колорадского университета J. S. Rinehart (20), внимательно анализировавший изменение частоты извержения гейзеров Исландии и Йеллоустонского национального парка, пришел к выводу о наличии непосредственной связи между частотой извержения гейзеров и тектоническими землетрясениями. На примере изучения режима Олд-Фейтфул-Гейзера он показал изменение частоты извержения гейзера перед Гебженлейкским (1959) и Аляскинским (1964) землетрясениями. Однако в его работах не рассматривались вопросы вариаций газохимического состава подземных вод.

Гидрогеосейсмологические исследования по поиску предвестников землетрясений начаты в США с 1974 г. Эти работы проводит в океанографическом институте штата Калифорния в Сан-Диего профессор Х. Крейг, изучающий изотопный состав ряда элементов (21), в геологической службе США в Менлопарке — доктор Чи. Ю. Кинг, исследующий содержание радона в почвенно-воздухе (22).

Профессор Стенфордского университета Роберт Ковач и др. (23) провели интересные наблюдения за изменением уровня грунтовых вод в зоне разлома Сан-Андреас южнее г. Сан-Франциско. Установлена тесная связь между изменениями порового давления и землетрясениями, вызванными подвижками по разлому.

С 1974 г. начаты гидрогеосейсмологические исследования в Японии и к настоящему времени широко развиваются под руководством проф. Х. Вакита (24, 25) из Токийского университета. Они включают наблюдения за химическим и газовым составом подземных вод. Ученые Японии установили изменение уровня подземных вод в периоды, предшествующие и сопутствующие землетрясениям. Показаны некоторые особенности повышения уровня подземных вод перед и во время землетрясения.

В последние годы начаты гидрогеосейсмологические исследования в Италии под руководством проф. Карапеция, в Югославии — доктора Д. Ходжиевского, в Австрии — доктора Х. Фридман, во Франции — доктора М. Моннэна, а также в Болгарии и других странах.

Таким образом, гидрогеосейсмологическим методом, основанном на изучении гидродинамического режима, химического, газового и изотопного состава подземных вод в связи с проявлением сейсмической активности в определенных геотектонических условиях, доказана перспективность и возможность прогнозирования времени возникновения землетрясения. Мировое признание и широкое использование этого метода в комплексе с другими для прогноза землетрясений способствовали получению первых обнадеживающих результатов.

Однако вопросы разработки теоретических основ механизма образования гидрогеохимических, радиохимических и гидрогеоди-

намических аномалий пока остаются открытыми. Высказываются лишь некоторые гипотезы и представления о причинах возникновения тех или иных аномалий в составе подземных вод в период подготовки землетрясений. Для решения этой проблемы и создания достоверного комплекса гидрогеосейсмологических предвестников для прогноза землетрясений в первую очередь требуются научно обоснованный подход к выбору полигонов и объектов исследования, а также унификация методов измерения и анализа изучаемых параметров, разработка комплекса измерительной и аналитической аппаратуры, создание автоматизированных систем, обеспечивающих получение оперативной информации об изменении параметров во времени.

Кроме того, судить конкретно о месте и силе возможного землетрясения по данным наблюдений в пределах одного участка, не имея опорной сети наблюдательных пунктов, невозможно. Поэтому назрела потребность в организации специализированной гидрогеосейсмологической службы в сейсмоопасных районах.

## ГИДРОГЕОХИМИЧЕСКИЕ ПРЕДВЕСТНИКИ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

Вопросы формирования химического, газового, микрокомпонентного, радиоактивного и изотопного составов природных вод всегда были и остаются актуальными, ибо с ними связано решение важнейших геологических, геохимических, гидрогеологических, а в последнее десятилетие и гидрогеоэсейсмологических задач.

Гидрогеологические исследования ташкентских термоминеральных вод, начатые задолго до Ташкентского землетрясения 1966 г., и систематические гидрогеоэсейсмологические наблюдения, проводимые нами с 1972 г., свидетельствуют о том, что один из наиболее перспективных методов наблюдения за ростом упругих напряжений и характером деформаций горных пород — постоянное изучение вариаций газохимического состава подземных вод.

Экспериментальный материал, накопленный с 1965 г., подтверждает, что наблюдаемые газохимические аномалии являются предвестниками сильных землетрясений. Однако до настоящего времени не определены наиболее информативные индикаторы, не произведена количественная оценка изменения тех или иных компонентов подземных вод в связи с сейсмичностью, научно не обоснован механизм возникновения гидрогеохимических, в том числе газогеохимических, аномалий, возникающих при подготовке сильных землетрясений. Поэтому перед исследователями стоят следующие задачи:

- 1) дальнейшие систематические режимные наблюдения за изменением газохимического состава подземных вод с выявлением наиболее информативных газогидрохимических параметров как возможных предвестников землетрясений для конкретных районов и пунктов наблюдения;

- 2) расширение наблюдений на территории Узбекистана путем создания сети комплексных опорных гидрогеоэсейсмологических станций с проведением на них аналогичных исследований по поиску предвестников землетрясений;

- 3) проведение экспериментальных работ для проверки точности и достоверности получаемых результатов при аналитических работах;

4) усовершенствование измерительной аппаратуры и создание автоматизированных и телеметрических устройств по получению и передаче информации с пунктов наблюдения в центр обработки;

5) поиски корреляционных связей вариаций содержания отдельных газохимических параметров между собой для выяснения природы геохимических аномалий;

6) статистическая обработка гидрогеохимической информации с помощью ЭВМ для установления связи аномальных проявлений с сейсмичностью;

7) разработка методических рекомендаций к ведению гидро-геосейсмологических исследований.

Мы уже отмечали (26), что основа дальнейшего развития гидрогеосейсмологических исследований — организация гидрогеосейсмологической службы путем создания комплексных станций. На территории Узбекистана несколько таких станций функционирует с 1980 г. Поэтому район исследований расширился, и наряду с продолжением наблюдений на Ташкентском и Андижанском геодинамических полигонах начаты режимные наблюдения за изменением газохимического состава подземных вод на Кызылкумской, Ленин-Юльской, Хаватагской, Чимионской, Чартакской станциях.

## Глава I

### ВАРИАЦИИ ГАЗОХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА ПОДЗЕМНЫХ ВОД ГЛУБОКИХ ВОДОНОСНЫХ ГОРИЗОНТОВ ТАШКЕНТСКОГО ГЕОДИНАМИЧЕСКОГО ПОЛИГОНА

Для выполнения поставленных задач были продолжены систематические режимные наблюдения за изменением газовых параметров и таких показателей среды, как окислительно-восстановительный потенциал  $Eh$  и концентрация водородных ионов  $pH$  глубоких водоносных горизонтов Ташкентского геодинамического полигона. В комплекс исследований включены наблюдения за такими газами, как гелий, аргон, углекислый газ, молекулярный водород, азот, кислород. В процессе эксперимента совершенствовалась методика отбора и анализа проб воды и газа, проводилось обучение сотрудников лаборатории работе на приборах и осуществлялось их участие в создании автоматизированных систем регистрации отдельных газохимических параметров.

Мы неоднократно освещали вопросы, касающиеся выбора и обоснования изучаемых параметров, методики их измерения, отбора проб воды и газа (26, 27, 28), теперь отметим те дополнения и изменения, которые появились за последние годы. В области газовой хроматографии в отделе гидрогеогеологии ИС АН УзССР под руководством и при непосредственном участии специалистов Москвы и Дагестана (В. С. Лебедев, М. Мирзалиев), а также КОМППЗ (Я. Якубов) произведена наладка и пробный пуск автоматической системы регистрации вариаций газового сос-

тава подземных вод на базе промышленного хроматографа марки ХП-499. Сотрудники отдела сконструировали и опробовали установку непрерывного измерения концентрации водородных ионов изучаемых подземных вод. Только при автоматической регистрации тех или иных параметров можно получить регулярные короткопериодичные измерения.

Автоматизация регистрации вариаций газохимического состава подземных вод будет содействовать получению наиболее точных и объективных данных о закономерностях изменения газовых и химических компонентов во времени и установлению характера их поведения в периоды подготовки землетрясений.

Прежде чем подойти к анализу характера распределения растворенных газов подземных вод исследуемого полигона и выявлению особенностей изменения газохимических параметров во времени, остановимся на разборе возможных факторов, обуславливающих формирование газохимических аномалий в периоды, предшествующие и сопутствующие сильным землетрясениям.

#### **Физико-химические условия возникновения газохимических аномалий в периоды сейсмической активизации**

Изучение природы вариаций газового состава во времени заслуживает особого внимания ввиду простоты регистрации изучаемых параметров, а также получения интересной информации о глубинных тектонических процессах, участвующих в подготовке землетрясений. Процесс подготовки землетрясения, по мнению В. И. Мячкика и др. (29), изменяет эффективные физико-механические свойства среды, поскольку характеризуется специфическим пространственно-временным ходом выделения сейсмической энергии и служит основой возможности прогноза места, времени и силы землетрясения. Предшествующие землетрясениям газохимические аномалии, как и другие, обусловлены величиной и скоростью деформаций горных пород, участвующих в подготовке землетрясений.

Во всех геохимических зонах Земли, включая подземную гидросферу, распространены газообразные элементы и их соединения, причем потенциальная газоемкость подземной гидросферы вдвое больше объема земной атмосферы. Именно эта особенность определила важную роль подземной гидросферы в улавливании всех газов. На протяжении всей геологической истории подземная гидросфера служила регулятором дегазации Земли. Результатами исследований в пределах 5 км глубины с температурой 100—200°С и давлением до 750 кг/см<sup>2</sup> (30) установлен дефицит газонасыщения глубоких водоносных горизонтов. С глубиной он растет как следствие опережающего влияния высоких температур, повышающих растворимость газов, по сравнению с влиянием минерализации. Различная геохимическая история, активность и роль газов в отдельных зонах земной коры и мантии обусловлены

свойствами самих газов и особенностями их миграции. В земной коре продвижение газов по тектоническим нарушениям, трещинам и порам из недр Земли в верхние зоны идет при участии сложного комплекса различных факторов — тектонических движений, нагрузки вышележащих толщ, зонного плавления, присутствия свободных газов и т. д. (31). Снятие части нагрузок с определенных объемов пород за счет сколов, сдвигов, деформаций кристаллических решеток, дробления и других нарушений сплошности пород приводит к образованию зон пониженных давлений, что нарушает природное равновесие горные породы — летучие компоненты и сопровождается десорбцией газов и увеличением их миграционной способности.

В результате натуральных наблюдений естественной напряженности горных пород (32) установлено, что причина большинства тектонических землетрясений Евразийской плиты заключается в раздвижении тангенциально сжатой коры. При разрыве блоков остаточного сжатия в верхние водоносные горизонты поступают определенные объемы высоконапорных минерализованных газонасыщенных термальных вод, находящихся до этого в условиях упругозамкнутого режима и высокого давления в трещинах и порах сжатых пород. Даже при отсутствии резкого изменения термобарических условий при попадании растворов из микропористой среды земных недр в зону дробления с макроскопическими размерами трещин и пустот создаются условия, определяющие структурный скачок, аналогично ситуации, характерной для геохимических барьеров (33). Не исключено также возникновение так называемого механо-химического эффекта (34), суть которого заключается в появлении новых физико-химических свойств, вследствие возникновения мелкодисперсных частиц, обладающих повышенной энергией, что сопровождается смещением химического и физического равновесия в зонах дробления.

А. П. Виноградов, занимаясь вопросами химической эволюции земли, писал, что «химические процессы, идущие на поверхности Земли, в зоне выветривания, в водах гидросферы — это слабое отражение процессов, идущих на больших глубинах земного шара и распространяющихся радиально» (35).

В свете современных представлений (36, 37) в периоды увеличения сейсмической активности интенсивность газового потока возрастает не только за счет нарушения подвижного равновесия между воднорастворенными газами и вмещающими их породами, но и так называемого «ювенильного газового дыхания». Поэтому газы представляют смесь в различных пропорциях ювенильных, первичных газов и тех компонентов, которые мобилизованы в земной коре или имеют поверхностное происхождение. Изменение состава газов из недр зависит от глубины слоев — источников газов, от процессов взаимодействия их с водами и породами, через которые они мигрируют, а также от процессов кинематической дифференциации газа при миграции в силу разных размеров,

веса и химических особенностей молекул газов. Среди физико-химических процессов, обеспечивающих изменение газохимического состава подземных вод в зонах подготовки землетрясений, некоторые авторы отмечают также акустические (38) и ультразвуковые эффекты (39). В зоне подготовки сильных землетрясений накопление напряжения сопровождается образованием густой сети трещин, при этом генерируются колебания разной частоты. Энергия этих колебаний рассеивается в окружающей среде, изменяя ее состояние и в первую очередь состояние кристаллических решеток. Возникающие при растрескивании и трещинообразовании горных пород под давлением ультразвуковые колебания также способны обогатить подземные воды глубоких горизонтов различными газовыми компонентами. Под действием упругих колебаний с частотой до 30 кгц процесс диффузии ускоряется в 40—50 раз. Экспериментальными исследованиями (40) установлено, что распространение ультразвуковых колебаний по образцам горных пород приводит к выделению из них «связанных» газов, в том числе радиоактивных, и переходу их в свободное состояние.

Все вышеперечисленные физико-химические процессы происходят в очагах тектонических землетрясений и хорошо согласуются с существующими гипотезами о процессах подготовки землетрясений. Гипотеза советских ученых (29) ЛНТ — лавинно-неустойчивого трещинообразования — базируется на основных положениях механики разрушения и связывает предвестники с образованием трещин и других структурных изменений в породах. Гипотеза американских ученых (41, 42) — дилатансионно-диффузионная — объясняет ход предвестников землетрясений процессами диффузии воды в делятирующей пористой среде. Многочисленные публикации последних лет и многолетний опыт наших систематических гидрогеоэсейсмологических наблюдений свидетельствуют о том, что предвестники регистрируются далеко за пределами области очага. Участники конференции «Прогресс в предсказании землетрясений в глобальном масштабе», состоявшейся в 1976 г. в Денверском университете США, пришли к выводу, что «существует глобальный механизм генерации землетрясений (напряжений), который способен быстро передавать энергию на большие расстояния» (43). Очевидно поэтому в период подготовки сильных землетрясений в объеме горных пород, значительно превышающем размеры очага готовящегося толчка, происходят деформации, выражающиеся в резком изменении проницаемости, поступлении поровых растворов водосодержащих пород и газовых эманаций из недр Земли.

Таким образом, можно предположить, что газохимические аномалии, отмеченные нами в связи с сейсмическими событиями в пределах исследуемого региона, а также сильными «транзитными» землетрясениями, отражают некоторый интегральный эффект различных физико-химических процессов в объеме пород, испытывающих упругие деформации.

## Характер распределения растворенных газов подземных вод во времени и в пространстве и некоторые сведения по их геохимии

В соответствии с основным законом геохимии, утверждающим принцип всеобщего рассеяния химических элементов в земном веществе, газообразные элементы и их соединения распространены во всех зонах и оболочках Земли. Подземная гидросфера занимает особое место. Основоположник геохимического изучения природных газов подземной гидросферы В. И. Вернадский писал: «В окружающей природе мы нигде не имеем газа, не связанного с водой, водного раствора, не заключающего газ».

Исследуемый Ташкентский геодинамический полигон в гидрогеологическом отношении представляет артезианский бассейн предгорного прогиба со сравнительно неглубоким залеганием палеозойского фундамента и характеризуется инверсионной гидрогеохимической зональностью. Она проявляется в том, что ниже лежащие водоносные горизонты содержат менее минерализованные воды по сравнению с вышележащими. Так, верхнемеловой водоносный комплекс, вскрытый большинством наблюдательных скважин, несмотря на значительную глубину залегания (до 2500 м) характеризуется развитием пресных, гидрокарбонатно-натриевого состава азотных терм. Это обусловлено наличием близкорасположенных областей питания (Приташкентские чули), где породы чанакской свиты верхнего мела выходят на поверхность земли, благоприятным литолого-минералогическим составом водовмещающих пород (песчано-гравийные отложения), хорошо промытых за истекший со времени их образования геологический период за счет значительного гидравлического уклона от области питания до базиса разгрузки (Аральское море). В газовом составе в зависимости от местоположения скважин содержание азота меняется от 65 до 95, кислорода — от 0,1 до 20, углекислого газа — от 1 до 25, гелия от десятых долей до 3, аргона — до 2 об. %.

В то же время в палеогеновых отложениях, вскрытых скважиной в колхозе им. Свердлова, мы имеем дело с сульфатно-натриевыми слабосолоноватыми водами с минерализацией до 3 г/л. По газовому составу они почти не отличаются от верхнемеловых, т. е. преобладает азот, присутствуют кислород, углекислый газ, водород и инертные газы.

Обследовались также водоносные горизонты верхней раздробленной части палеозойских отложений, вскрытых скважиной на структуре Хаватаг, к югу от Ташкента. Это азотные воды с высоким (до 40 об. % содержанием углекислоты).

В связи с тем, что в 1976 г. на территории Кызылкумов произошло два сильных землетрясения, в очаговой зоне Газлийских землетрясений мы также наблюдали изменение геохимического состава подземных вод палеозойских пород. По химическому составу воды сульфатно-хлоридные, натриево-кальциевые с минерализацией 1,5 г/л. В составе газов преобладает азот. Содержа-

ние углекислого газа не превышает 2 об. %, а инертных — сотые и тысячные доли процента.

Содержание газохимических компонентов варьирует в широком диапазоне как по площади (в пределах одного водоносного горизонта), так и в вертикальном разрезе (табл. 1). Это обусловлено в первую очередь геолого-структурными, литолого-фациальными и палеогидрогеологическими условиями залегания водоносных горизонтов, а также различными геохимическими свойствами самих газов, особенностями их растворения, миграции и сорбции во взаимодействии с вмещающими их породами и водными растворами. Но не всегда представляется возможным решить, какой из этих факторов влияет на формирование газового состава, поскольку каждый из них может быть ведущим в определенных гидрогеологических, геолого-тектонических условиях региона.

4003  
Как мы уже писали, в газовом составе преобладает азот (до 95 об. %). При обычных термодинамических условиях это инертный газ. Однако в условиях высоких температур и давлений, а также под влиянием радиогенных процессов он становится реакционно способным и участвует в реакциях присоединения. Благодаря большой прочности и относительной химической нейтральности молекул азот в различных пропорциях повсеместно распространен в подземных водах. В его распределении ученые (44) отмечают две тенденции: 1) уменьшение массы связанного азота с увеличением степени метаморфизма пород осадочного чехла; 2) поступление в воду больших масс азота с изверженными породами (базальтами). Последнее, очевидно, указывает на участие азота в обмене между веществом верхней мантии и литосферы. На генезис азота нет единой точки зрения. Многие исследователи (31, 44, 45) придерживаются мнения, что азот имеет воздушный, биохимический и смешанный генезис, его источником может быть также химически связанный азот минералов пород, однако он не связан с процессами глубинной дегазации. Однако еще В. И. Вернадский писал: «Азот есть тот газ, который может быть поступает в биосферу в водах (газовых струях) из очень глубоких частей земной коры» Это подтвердилось новейшими геохимическими исследованиями. В водах глубоких горизонтов азот встречается в больших количествах и имеет давление, в десятки и сотни раз превышающее атмосферное. Кроме того, о глубинном генезисе свидетельствует частое присутствие азота в кристаллической решетке алмазов, привнесенных из мантии (37). Была сделана также попытка объяснить происхождение «избыточного»  $N_2$  (по  $N^2/Ar_{атм}$ ) в природных газах дегазацией из глубины (46). Эту точку зрения разделяет чешский исследователь Я. Крайча (47). Происхождение азота в подземных водах очень трудно установить по концентрации сопровождающих его редких газов, так как это связано с характером сорбции. Часть азота образуется абиогенным путем из магматических пород, о чем свидетельствует изотопный состав. Химическим путем азот возникает при темпера-

турном (65—80° С) разложении нитратов подземных вод любой минерализации. В гипертермальных водах он встречается в больших количествах и часто вместе с углекислым газом, причем их соотношение варьирует в широких пределах. Для верхнемелового водоносного горизонта района наших исследований количество азота изменяется от 60 до 95 об.%. Причем, наиболее высокие содержания отмечаются по скв. 9 и 16, т. е. в пунктах, заложенных в

### Газохимическая характеристика

Местоположение скважин	Номер скв.	Интервал опробования, м	Возраст водоносного горизонта	Тип воды	Минерализация, г/л	pH	Eh
Победа	2	1737—1861	K <sub>2</sub>	C—S—Na	0,59	7,99	180
Дворец водного спорта (ДВС)	3	2088—2210	K <sub>2</sub>	C—Na	0,71	7,98	179
Луначарское	8	1700—1824	K <sub>2</sub>	C—Na	0,85	7,75	183
Улугбек	9	1662—1817	K <sub>2</sub>	Cl—C—Na	1,3	7,58	180
Ботаника	10	2034—2206	K <sub>2</sub>	C—Cl—Na	0,9	7,44	285
Черняевка	14	900—1240	K <sub>2</sub>	C—S—Na	0,6	8,23	196
Чинабад	7	1325—1462	K <sub>2</sub>	C—S—Na	0,6	7,96	240
Ташминводы	5	1224—1325	K <sub>2</sub>	C—Na	0,6	8,0	184
Ин-т овощ.-бахч. культур	4	1810—1940	K <sub>2</sub>	C—Cl—Na	0,85	7,90	230
Янги-Юль	12	1480—1570	K <sub>2</sub>	C—Cl—Na	1,0	8,25	257
Текстилькомб.	22	1800	K <sub>2</sub>	Cl—C—Na	1,5	—	—
К-з Свердлова	11	—	P	S—Na	2,9	—	—
Ин-т Шредера	13	2230—2340	K <sub>2</sub>	C—S—Na	0,70	7,8	227
Келес	6	1833—2040	K <sub>2</sub>	C—S—Na	0,6	7,89	224
Ленин-Юли II горизонт	16б	1942—2082	K <sub>2</sub>	Cl—C—Na	1,4	7,78	114
Ленин-Юли I горизонт	16а	2241—2293	K <sub>1</sub>	Cl—Na	15,7	7,12	58
Хаватаг	—	1800—2000	Pz	Cl—C—Na	4	7,37	70
Джангельды	—	150—200	Pz	S—Cl—Na—Ca	1,5	7,56	—

зоне пересечения глубинных разломов, хотя глубина вскрытия водоносного горизонта значительно меньше, чем на скважинах 8, 3, 10. Для палеозойского водоносного горизонта (скв.Хаватаг) содержание азота не превышает 70 об.%. Количество азота с глубиной не увеличивается, но явно прослеживается связь высоких содержания этого компонента с геолого-тектоническими нарушениями в пределах изучаемого региона.

Второй по содержанию компонент в газах — кислород, содержание которого для района исследований значительно колеблется как по площади, так и в вертикальном разрезе от десятых долей до количеств, соответствующих содержанию воздушного кислорода. Кислород имеет в основном атмосферное

происхождение и обычно содержится в подземных водах зоны аэрации, т. е. на глубинах, не превышающих 500 м. Условия питания, транзита и разгрузки водоносного горизонта, о которых мы писали выше, обуславливают наличие такого содержания кислорода в водах даже на глубинах более 1500 м. Наличие кислорода в пробах воды объясняется поступлением его из атмосферы в результате контаминации воздухом. В атмосфере 0,0001% кислорода от

Таблица 1

### объектов исследования

Содержание газов, об. %						Содержание микрокомпонентов, мг/л			
He	Ar	H <sub>2</sub> ·л·10 <sup>-4</sup>	N <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>	F	Cl	B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Hg·л <sup>-10-9</sup>
0,16	0,77	7	76,3	1,93	20	0,56	74,7	1,69	2,25
0,30	1,23	6	79,5	4,56	11	0,81	85,4	2,23	2,37
0,66	1,53	6	77,4	13,9	3,5	1,64	83,3	3,31	2,27
1,60	1,46	12	87,1	5,75	0,5	1,32	441,2	3,18	2,37
1,33	1,12	9	72,4	11,53	11,6	1,12	148,3	2,43	1,30
0,21	0,94	78	78,05	1,13	1,13	0,86	72,4	1,74	—
0,15	0,63	9	75,92	4,32	17,7	0,74	76,6	1,74	1,30
0,085	1,75	81	78,45	4,04	11	0,66	61,3	1,39	1,30
0,15	1,44	52	94,55	1,16	—	2,16	160,4	4,86	—
0,28	0,17	Нет	89,61	8,95	9,3	2,60	213,0	3,82	—
0,32	—	10	78,91	4,81	6,3	—	—	—	—
0,13	0,62	146	80,36	4,92	8,7	2,88	64,0	0,69	—
0,22	0,17	16	78,1	2,24	17,7	1,84	86,5	2,45	—
0,20	1,25	5	84,99	3,05	7,1	2,12	68	2,43	—
0,83	1,71	22	92,5	2,33	0,5	3,48	495	3,74	—
1,32	0,80	170	94,4	0,43	0,5	0,28	8166	10,94	—
1,10	0,46	104	74,51	18,7	1,57	2,4	1300	9,04	—
0,04	—	15	84,5	1,17	9,3	1,72	454	1,39	—

общего количества на Земле, а кора его поглощает постоянно. Откуда? Ученые (48) пришли к выводу, что он постоянно возобновляется из воды пород, которая разлагается под воздействием солнечной радиации. Кругооборот кислорода с ростом окислительной оболочки наряду с диссоциацией водорода, ролью глубинных флюидов — продуктов дыхания Земли, рассматривается как один из ведущих геохимических процессов. Попав в подземные воды, кислород в силу химической активности быстро соединяется с любыми растворенными в воде веществами, обладающими переменной валентностью, окисляет органические вещества и минеральные восстановители. Его количество в подземных водах осадочных пород определяет окислительно-восстановительный потенциал.

Теоретически кислород может присутствовать даже в высокотермальных водах (31), так как при высоких температурах происходит термическая диссоциация воды с поглощением большого количества тепла. Необходимо отметить, что низкие содержания кислорода (десятые доли процента) также отмечаются в пунктах, расположенных в зонах разломов, где окислительные процессы подавляются очевидно, за счет поступления по разломам и другим тектоническим нарушениям газов и растворов из более глубоких горизонтов.

Углекислый газ также распространен достаточно широко и хорошо ассоциирует с содержанием азота. Максимальные количества углекислоты отмечаются в водах палеозоя Хаватагско<sup>й</sup> скважины, где ее содержание достигает 40 мг/л. Содержание этого компонента в верхнемеловом водоносном горизонте варьирует от единиц до 30 об.%. Связи между количеством  $\text{CO}_2$  и глубиной залегания водного горизонта не прослеживается. Наибольшими значениями характеризовались воды скв. 8, 10. Интересно, что по скв. 9, где содержание  $\text{CO}_2$  такое же (15—20 об.%), после 1976 г., когда скважина была освобождена от эксплуатации и переведена на крановый режим с малым расходом, температура воды на устье снизилась от 60 до 23°C, содержание углекислого газа резко упало и в дальнейшем редко превышало 10—15 об.%. Здесь явно проявилась зависимость содержания этого компонента от изменения термобарических условий. В общем для всего горизонта отмечается увеличение содержания углекислоты в воде с ростом температуры и минерализации и уменьшением величины затрубного давления. Некоторые отклонения от этой зависимости, очевидно, обусловлены литолого-фациальным составом пород, а также геолого-структурными особенностями вскрытия данного горизонта той или иной скважиной. В водах палеогеновых отложений содержание растворенной углекислоты изменяется от 2,0 до 8,0 об.%.

Углекислый газ относится к химически активным и представляет собой конечный продукт окисления углерода. В земной коре находится большое количество связанной углекислоты, которая благодаря химической активности при благоприятных условиях способна перейти в газообразное состояние. Геохимии углекислого газа, его генезису и особенностям поведения при изменении термодинамических условий посвящено много работ (31, 47, 49—55). Большинство исследователей считают, что преобладает углекислота неорганического происхождения.

В подземные воды углекислый газ может поступать из зоны окислительных процессов и путем термодиффузии газов атмосферы. Но основная его масса возникает при метаморфизации в основном карбонатных пород, составляющих около 50% всех осадочных, при их разогреве под высоким давлением. Процесс насыщения вод газом подчиняется законам термодиффузии, особенно при свободном сообщении с водоносным горизонтом. В связи с

ростом растворимости углекислоты пропорционально давлению на больших глубинах накапливаются ее большие запасы. При этом основная масса мигрирует в водном растворе, и растворенный газ, поднимаясь к поверхности, при снижении давления выделяется из водной фазы. Большое внимание уделяется глубинным процессам метаморфизма, обусловливающим поступление  $\text{CO}_2$  в чехол по разломам. Выявлению генезиса углекислого газа помогает изучение изотопного состава подземных вод. В них, кроме азота, кислорода и углекислого газа, присутствуют гелий и аргон.

Геохимии инертных газов, их генезису, распределению, характеристике свойств и возможности практического использования посвящены многочисленные работы (31, 47, 49, 56—59). В целом гидросфера по содержанию этих газов беднее земной коры. В подземных водах зоны окисления они имеют преимущественно атмосферное происхождение, а на больших глубинах — радиогенное. Мигрируют газы в осадочном чехле не через твердые породы, а через насыщающие их флюиды.

Гелий — единственный элемент, который не участвует в «круговороте в природе». Причинами высоких концентраций гелия в водах В. П. Якуцени (58) считает вертикальную миграцию глубинных флюидов по разрывным нарушениям, повышенную радиоактивность пород, наличие углеводородных скоплений. Однако обнаружены минералы (древние бериллы, титановые минералы, роговые обманки и калиевые минералы осадочного происхождения), в которых содержание гелия настолько велико, что не может быть объяснено радиоактивным распадом. Такой гелий принято называть «реликтовым». Существует несколько гипотез возникновения «избыточного гелия» (56). К факторам, способствующим накоплению гелия, Д. Н. Финкельштейн относит: 1) близость мощных источников альфа-излучения (граниты и продукты их разрушения); 2) наличие устойчивых с древнейших времен пород; 3) процесс разложения углеводородов в древних газовых скоплениях. Один из важнейших факторов накопления и сохранности гелия — длительность контакта подземных вод с породами, продуцирующими гелий. Особоудившись из разрушенных минералов химическим или механохимическим путем, гелиевые пузырьки, растворенные в водах, мигрируют по нарушениям в верхние части. Часто его высокие концентрации характерны для азотных вод, что обусловлено химической инертностью и особенностями дифференциации газов при миграции (31). Содержание гелия в азотных термах Ташкентского геодинамического полигона составляет 0,1—2,7 об. %. Максимальные значения, характерные для вод скв. 9, подтверждают, что гелиевые аномалии контролируют зоны глубинных разломов. Именно в данном пункте наблюдения для того же водносоного горизонта чанакской свиты верхнего мела отмечаются более высокие минерализация, содержание хлора и водорода. Разгрузка потока гелия по глубинным разло-

мам установлена около 10 лет назад. Ученые обнаружили (60), что преимущественно восходящее движение по зонам повышенной проницаемости тектонической и фашиально-литологической природы определяется градиентом избыточного давления как функции глубины. В. И. Вернадский назвал процесс непрерывного поступления гелия в воздух из Земли и водных толщ «гелиевым дыханием». С неменьшим правом можно говорить и о ее «аргоновом дыхании». Аргон растворяется в подземных водах лучше, чем азот и представляет собой смесь воздушного аргона (определенного изотопного состава) и  $^{40}\text{Ar}$ , продуцированного породами (61).

Соотношение азота и аргона или гелия не остается постоянным, так как азот и гелий при миграции сорбируются различными породами. В. В. Чердынцев, Е. М. Колесников (62) доказали, что образцы пород из районов высокой тектонической активности полностью теряют радиогенный аргон. В водах исследуемого региона содержание аргона составляет от десятых долей до 2,0 об%. Максимальные значения аргона так же, как и гелия характерны для вод скважины Улугбек.

В подземных водах исследуемого региона отмечается и водород, правда содержание его невелико и обычно составляет десятитысячные и тысячные доли процента, что вполне соответствует условиям залегания исследуемых водоносных горизонтов. Как и кислород, водород в силу своей активности в водных растворах играет важную роль в физико-химических процессах. Образуется он в результате различных радиационно-химических процессов, а также процессов термokatалитического разложения воды в условиях высоких температур на больших глубинах. Благодаря исключительной подвижности и аномально высокой теплоемкости, водород мигрирует через решетки минералов по микропорам, трещинам, обуславливая его повсеместное взаимодействие с компонентами пород. Миграцию глубинного водорода называют стержнем дегазации (37), так как, обладая, как и гелий, наибольшей скоростью подъема, водород взаимодействует с минеральными компонентами литосферы, обуславливая процессы метаморфизма и метасоматизма, и появление в верхних горизонтах земной коры воды, а также различных углеводородных и кислых газов.

Касаясь распределения газовых компонентов в подземных водах, нельзя не остановиться на характеристике среды их нахождения, определяемой комплексом показателей, среди которых главная роль принадлежит температуре, давлению и таким показателям, как концентрация водородных ионов и окислительно-восстановительный потенциал. Термодинамическим особенностям подземных вод исследуемого региона посвящен раздел монографии «Гидрогеофизические предвестники землетрясений», мы остановимся на характере распределения рН и Eh среды. Значение этих показателей в процессе формирования геохимических обста-

новок определено многими исследователями (31, 47, 49, 63). В зоне распространения кислородно-азотных вод доминирует окислительная среда, обусловленная наличием свободного кислорода атмосферного происхождения. Эта среда определяется значениями Eh от +100 до +650 мв и рН от 3 до 9,5. В составе газов преобладают азот, кислород, углекислота, характерно отсутствие сероводорода. По данным многолетних исследований, А. В. Щербаков (49) установил прямую пропорциональную зависимость величины

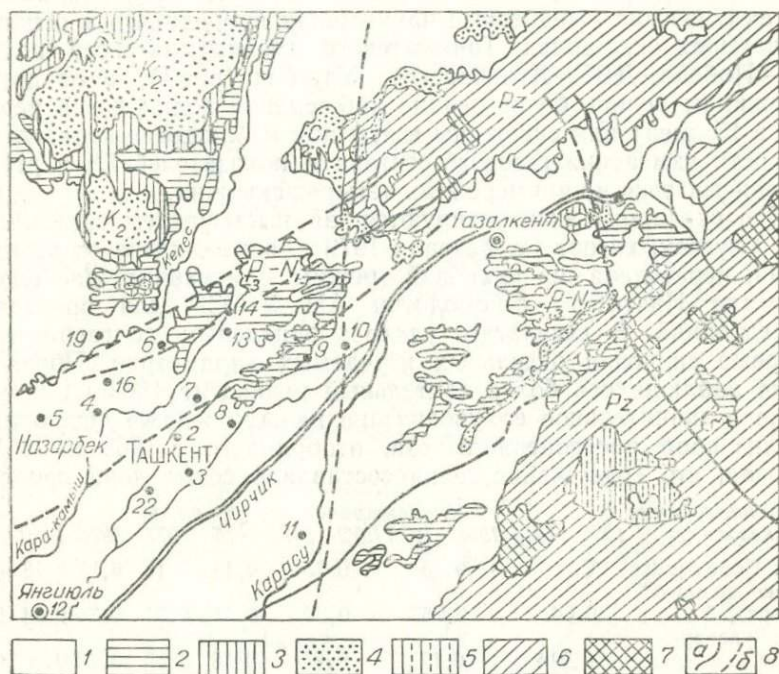


Рис. 1. Схематическая геологическая карта центральной части Приташкентского района.

1—четвертичные отложения, 2—олигоцен-миоценовые, 3—палеогеновые, 4—меловые, 5—триасовые, 6—палеозойские осадочные, 7—палеозойские интрузивные, 8—линии тектонических нарушений; а—достоверные, б—предполагаемые. Цифры на рис.—скважины полигона (см. табл. 1).

Eh от содержания свободного кислорода. Активность водородных ионов и окислительно-восстановительный потенциал — наиболее чувствительные показатели состояния равновесия в природных водах. Оба они — функции температуры и давления, поэтому служат индикатором гидрохимических и термодинамических процессов, протекающих в водной среде. Для района наших исследований значения окислительно-восстановительного потенциала меняются от +100 до +250 мв для основного верхнемелового водоносного горизонта и от -50 до +90 для вод палеозойских

отложений. Снижение этих величин и появление отрицательных значений для верхнемелового горизонта отмечалось только в периоды, предшествующие тектонической активизации в пределах изучаемого региона. Для вод меловых и палеозойских отложений характерна слабощелочная среда, по классификации А. Н. Перельмана. Величина рН изменяется от 7,2 до 8,4.

Результаты обработки данных наблюдений за изменением газохимического состава подземных вод свидетельствуют о значительных его флуктуациях во времени. Поскольку многолетние систематические ежедневные наблюдения проводились в основном на четырех скважинах Ташкентского геодинамического полигона — Победа, ДВС, Луначарское, Улугбек (рис.1), а по другим скважинам велись более редкие наблюдения (один раз в неделю или в 15 дней) или скважины взяты под наблюдение недавно, особенности изменения газового состава и показателей Eh и рН будут описываться на примере этих четырех скважин.

Все скважины эксплуатируются, за исключением скважины в пос. Улугбек, которая с февраля 1976 г. освобождена от эксплуатации, переведена на крановой режим с меньшим расходом и передана Институту сейсмологии АН УзССР для проведения исследований. В результате удалось определить долговременные фоновые значения отдельных изучаемых параметров. Поведение гелия наблюдалось более длительный период (с 1963 г.) и установлено значительное его увеличение на один и даже два порядка. Анализ проб растворенного газа, отобранного с 1963 по 1965 г., показал, что содержание гелия составляло сотые доли процента.

Местоположение скважины	Концентрация гелия об. %								
	1963—1965	1966—1972	1972—1975	1976	1977	1978	1979	1980	
Парк Победы, 2	0,034	0,13	0,15	0,14	0,15	0,18	0,18	0,19	
Дворец водного спорта, 3	0,041	0,065	0,26	0,31	0,31	0,34	0,34	0,36	
Пос. Луначар- ское, 8	0,014	0,17	0,60	0,68	0,65	0,70	0,70	0,69	
Пос. Улугбек, 9	0,025	0,28	1,28	1,56	1,67	1,87	1,93	2,05	

Накануне Ташкентского землетрясения 1966 г. содержание гелия в подземных водах скважин, расположенных близко к эпицентру и особенно в зонах разломов (скв. 2, 9), увеличилось в 10 раз. В последующие периоды изменения не столь резкие, однако отчетливо прослеживается тенденция к постепенному увеличению содержания гелия по всем наблюдаемым скважинам Ташкентского полигона с конца 1977 г., т. е. после очередного сильного землетрясения (Таваксай).

В целом по полигону самые низкие содержания гелия с 1972 г. зафиксированы во второй половине 1975 и в середине 1977 г. г. и иногда составляли сотые доли процентов, максимальные значения зафиксированы в декабре 1979 — январе 1980 г. г. и во второй половине 1980 г. Путем математической обработки данных ежедневных наблюдений за изменением содержания гелия в подзем-

ных водах за период с 1972 по 1980 г. выявлены достаточно надежные (0,6—0,8) корреляционные связи поведения этого параметра по результатам исследований на скв. 2, 3, 8, 9, хотя абсолютные содержания гелия в них отличаются. В связи с нерав-

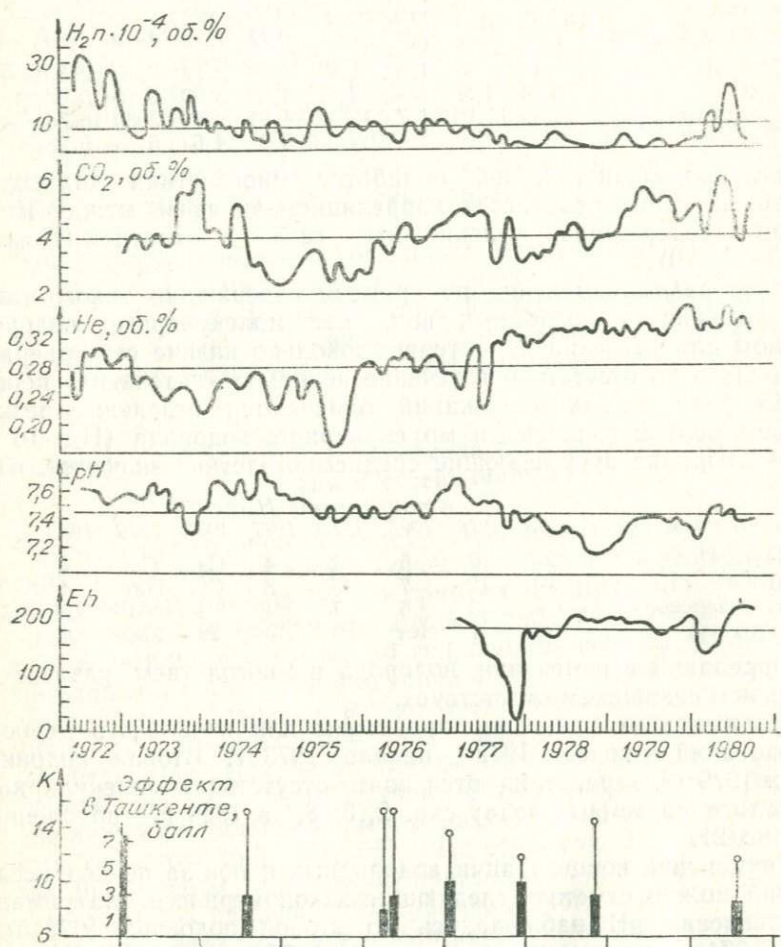


Рис. 2. Изменение газохимического состава подземных вод Ташкентского геодинамического полигона (приведенные данные) за период 1972—1980 гг.

нозначными абсолютными значениями гелия по разным скважинам, мы произвели предварительную нормировку значений по полигону, а затем подсчитали среднемесячные величины (рис. 2).

Наблюдения за изменением содержания углекислого газа во времени начали в 1973 г. В целом по полигону за этот период

минимальные его значения зафиксированы в 1975 г., а максимальные — в конце 1973—начале 1974 г., а также со второй половины 1979 до середины 1980 г. (рис. 2). Многолетние вариации углекислого газа по отдельным скважинам приведены ниже (об. %):

Скважина	Концентрация $CO_2$ , об. %							
	1973	1974	1975	1976	1977	1978	1979	1980
Парк Победы	1.44	1.87	1.02	1.83	2.16	2.29	2.39	2.39
ДВС	5.24	4.88	3.43	4.02	4.69	3.99	5.16	5.07
Луначарское	15.44	14.23	11.7	15.52	14.91	9.62	15.80	16.84
Улугбек	—	—	—	7.36	5.45	4.50	5.13	6.23

Согласно статистической обработке многолетних данных, в подземных водах отмечается корреляционная связь между изменением содержания углекислого газа и азота ( $K_{кор.} = -0,50 \div -70$ ).

Своеобразны изменения во времени содержания такого газового компонента подземных вод, как молекулярный водород. В целом для бассейна характерны довольно низкие его содержания, вплоть до отсутствия в течение довольно длительного периода. На фоне низких содержаний отмечаются отдельные резкие выбросы больших количеств молекулярного водорода ( $H_{2п} \cdot 10^{-4}$ ), на 1—2 порядка превышающие среднемноголетние значения.

Скважина	Концентрация $H_{2п} \cdot 10^{-4}$							
	1973	1974	1975	1976	1977	1978	1979	1980
Парк Победы	21	12	5	12	4	Сл.	Сл.	4
ДВС	10	12	7	5	8	Сл.	Нет	4
Луначарское	Сл.	3	6	7	4	4	3	12
Улугбек	Нет	4	Нет	20	10	29	15	24

Корреляция в изменении водорода в многолетнем разрезе по отдельным скважинам отсутствует.

Максимальные значения характерны для начального периода исследований — конец 1972 — начало 1973 г. Вторая половина 1978 и 1979 гг. характеризуются почти отсутствием молекулярного водорода в подземных водах скв. 2, 3, 8, а 1980 г. — появлением его (рис. 2).

В изменении концентрации водородных ионов за период исследований можно отметить следующие закономерности. Максимальные значения рН наблюдались во второй половине 1973 и в конце 1974 г., минимальные — в конце 1976 г. (рис. 2).

В целом в 1978—1979 гг. все наблюдаемые скважины Ташкентского геодинамического полигона характеризуются низкими величинами концентрации водородных ионов.

Скважина	Величина рН							
	1973	1974	1975	1976	1977	1978	1979	1980
Парк Победы	8.05	8.32	8.13	8.10	8.14	7.65	7.16	7.92
ДВС	8.08	8.26	8.04	8.02	8.07	7.64	7.78	7.87
Луначарское	7.99	8.11	7.72	7.67	7.81	7.39	7.56	7.55
Улугбек	8.10	7.91	7.57	7.41	7.5	7.17	7.39	7.32

Коэффициент корреляции изменения этого параметра по отдельным скважинам достаточно высок (0,57—0,82).

За изменением другого показателя среды — окислительно-восстановительного потенциала (Еh) — наблюдения проводятся с марта 1977 г. За это время лишь дважды отмечалось значительное снижение указанного параметра по сравнению с его средне-многолетними значениями (165—175 отн. ед.). В конце 1977 г. по всем наблюдаемым скважинам исследуемого региона значения Еh упали до минусовых ( $-20 \div -40$ ).

Второе снижение значений Еh по наблюдаемым скважинам относится к началу 1980 г., правда интенсивность его меньше, чем в 1977 г. и только в скв. 9 фиксировались отрицательные значения ( $-20$ ).

Рассмотрев поведение отдельных компонентов газохимического состава подземных вод во времени, можно с уверенностью сказать, что на фоне многолетних флуктуаций четко прослеживаются аномальные вариации тех или иных параметров, а чаще их совокупности, связанные с активизацией сейсмических процессов.

#### **Особенности вариаций газохимического состава подземных вод в связи с сейсмичностью**

Предсказание землетрясений гидрогеохимическими методами основано на данных систематических режимных наблюдений и закономерных изменениях во времени концентрации газов и других компонентов подземных вод в период подготовки землетрясений. Участники совещания по гидрогеохимическим предвестникам, состоявшегося в Москве в декабре 1979 г., отметили, что на современном этапе доказана возможность использования гидрогеохимических предвестников для прогноза времени и силы землетрясения. Исходя из опыта обработки гидрогеохимической информации и в соответствии с рекомендациями по выбору сейсмических событий с учетом размера области подготовки сильных землетрясений (64, 65), мы отобрали землетрясения, эпицентры которых удалены от пунктов наблюдения на расстояния, в 10 и 30 раз превышающие размеры очага (табл.2). Кроме того, в перечень включены все землетрясения с  $K \geq 9$ , происшедшие на территории Ташкентского геодинамического полигона, т. е. в радиусе до 100 км.

Мы проанализировали поведение отдельных газовых компонентов и осуществили поиск корреляции обнаруженных газохимических аномалий с такими крупными землетрясениями, как Газлийское 1976 г. (66), Исфара-Баткенское и Таваксайское 1977 г. (67), Алайское 1978 г., а также серией сейсмических событий июня-июля 1980 г. (рис. 2).

За 8—8,5 месяцев до первого сильного землетрясения в Кызылкумах по всем наблюдаемым скважинам Ташкентского

## Основные параметры землетрясений за период с 1976 по 1980 г.

Дата	Время в очаге, по Гринвичу	Район	Магнитуда	Расстояние до точки набл., км	Глубина очага, км	Сила землетрясения в точке набл., балл
16.I.1976	10-44-49	Южный Тянь-Шань	4 8/12	25	5	3
8.IV	02-40-26	Кызылкумы	7,0±0,2/17	465	30±5	4
8.IV	02-59-04	Кызылкумы	6,3±0,5/16	490	30±10	3
17.V	02-58-42	Кызылкумы	7,3±0,2/17	485	30±5	5
10.VII	07-49-00	Южный Тянь-Шань	5,3	250	з/к	3
16.VII	07-49-52	Ташкент	2,8/9	7-8	з/к	5
27.XI	21-42-12	Гиндукуш	6,6±0,2/15	520	190±20	3-4
2.XII	17-24-41	Приташкентский район	-/9,7	40	з/к	
31.I.1977	14-26-12	Южный Тянь-Шань	6,3/16	210	20-30	6
13.II	15-33-16	Система Чаткальских хребтов	3,9/10,5	80	5	2-3
15.III	14-07-11	Система Чаткальских хребтов	4,0/11	80	3 к	
3.VI	01-05-22	Южный Тянь-Шань	5,2/13	245	3 к	4
3.VI	02-31-08	Гиндукуш	6,0-6 3/15	500	220	3
6.XII	10-52-52	Система Чаткальских хребтов	5,3/13 5	44	15±2	6
22.XII	20-02-11	Система Чаткальских хребтов	-/9,3	40	15±2	
19.I.1978	11-02-37	Система Чаткальских хребтов	3,1/9,6	80	3 к	
9.IV	13-27-28	Приташкентский район	3,8/11	100	5-10	
4.VI	15-20-17	Система Чаткальских хребтов	3,2/9,9	60	з/к	
4.VI	19-30-18	Кызылкумы	5,8-6,44/15	485	30	3
24.X	15-17-37	Приташкентский район	3,3/10	55	з/к	
1.XI	19-48-28	Северный Памир	6,8/16	350	20-25	4-5
4.XI	19-20-07	Система Чаткальских хребтов	/9,6	70	з/к	
21.XII.1978	10-50-42	Система Чаткальских хребтов	2,8/9,2	80	з/к	
26.II.1979	15-27-22	Приташкентский район	4,1/11,5	35	з/к	3-4
19.IV.1979	11-13-46	Система Чаткальских хребтов	3,0/9,4	95	з/к	
25.IV.1980	13-57-51	Система Чаткальских хребтов	3,3/10	38	10	
6.V	12-43-52	Приташкентский район	3,1/9,7	40	3 к	
28.V	09-37-02	Система Чаткальских хребтов	2,8/9	45	3 к	

Дата	Время в очаге, по Гринвичу	Район	Магнитуда	Расстояние до точки набл., км	Глубина очага, км	Сила землетрясения в точке набл., бала
16.IV.1980	15—20—32	Приташкентский район	3.0/9,5	50	15	
18.VI	08—18—24	Система Чаткальских хребтов	3.6/10,5	37	3 к	
23.VI	20—06—42	Приташкентский район	4.0/11,2	45	3 к	2—3
11.VII	11—47—23	Ферганская долина	5,3/13,5	165	3 к	4—5
26.VIII	10—12—53	Система Чаткальских хребтов	3.3/10	50	3 к	

геодинамического полигона содержание гелия в подземных водах стало резко снижаться, достигнув минимальных значений в сентябре—ноябре 1975 г. При этом содержание гелия упало в два раза. Восстановление до среднесноголетнего уровня произошло довольно быстро. Начало 1976 г. характеризуется некоторой стабилизацией вариаций гелия во времени на более высоком уровне, чем за весь предыдущий (с 1972 г.) период наблюдения. Проводимый в это время эксперимент на скважине Улугбек, когда пробы отбирались и анализировались через каждые 4 часа, помог выявить короткопериодные аномальные вариации в содержании гелия и углекислого газа накануне основного Газлийского землетрясения 8 апреля 1976 г. (рис. 3). В конце марта содержание гелия резко снизилось до его среднесноголетних значений, затем последовал дальнейший спад. Минимальное содержание гелия — 0,82 об.‰ зафиксировано уже после момента землетрясения 10 апреля, после чего в течение двух дней его содержание достигло среднесноголетних значений. Среднеквадратичные отклонения наблюдаемых значений составляли  $\pm 0,02$ ,  $\pm 0,05$ , т. е. не превышали 3% от среднемесячной величины. В изменении содержания углекислоты также отмечается тенденция к формированию бухты пониженных значений в 1975 г. Минимальные содержания отмечались за месяц до основного Газлийского землетрясения 8 апреля 1976 г. (рис. 2). В конце марта по всем наблюдаемым скважинам содержание  $\text{CO}_2$  в подземных водах возросло вдвое. По отдельным скважинам величина амплитуды аномальных вариаций увеличилась в 2—3 раза накануне и в период Газлийских землетрясений и их многочисленных афтершоков. Перед землетрясением 17 мая на фоне высоких содержаний гелия и углекислого газа, обусловленных первым толчком и его афтершоками, отмечается некоторый спад в содержании этих компонен-

тов, но менее выраженный, по сравнению с реакцией на толчок 8 апреля (рис. 4).

На момент Газлийских землетрясений в подземных водах всех наблюдаемых скважин водород присутствовал, хотя до середины

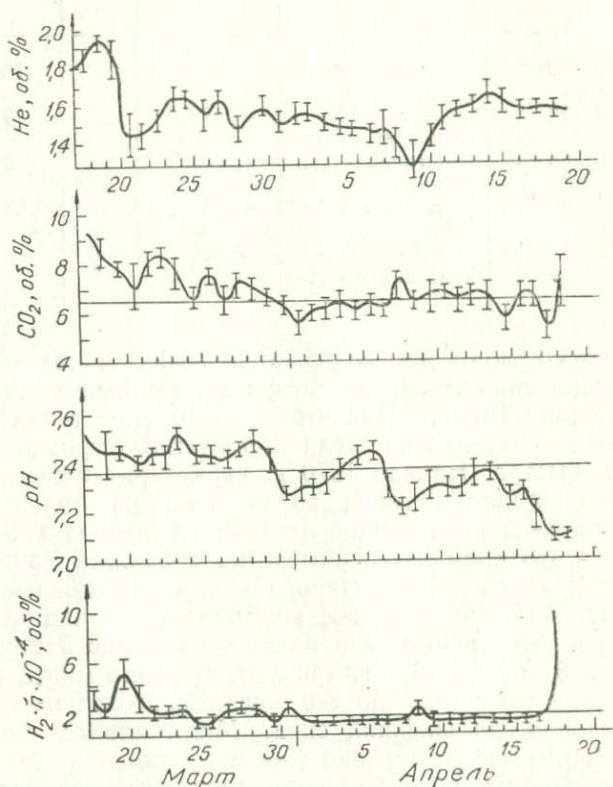


Рис. 3. Среднесуточные изменения концентрации газов по данным эксперимента накануне Газлийского землетрясения 1976 г.

1975 г. его в водах не было или отмечались лишь следы. Максимальные значения фиксировались за 8—9 месяцев до основного толчка, т. е. тогда, когда содержание гелия упало до минимума.

На фоне многолетних флуктуаций отчетливо регистрируется значительное снижение величины рН с июня 1975 г. (рис. 2). Низкие значения по всем скважинам приходятся на момент Газлийских основных толчков и их сильных афтершоков. В то же время, как мы уже отмечали, Газлийское землетрясение 8 апреля обусловило сравнительно высокое (относительно фона) содержание углекислого газа и гелия с середины марта до конца апреля

1976 г. Резкое увеличение газа в подземных водах не могло не отразиться на кислотности среды, поскольку в подземных водах, как и вообще в природных водах, концентрация водородных ионов зависит не столько от диссоциации воды, сколько от соотношения количества угольной кислоты и ионов  $\text{HCO}_3$  и  $\text{CO}_3$ , и в меньшей степени от других ионов. В результате нарушения карбонатного равновесия при выделении кислоты вода становится

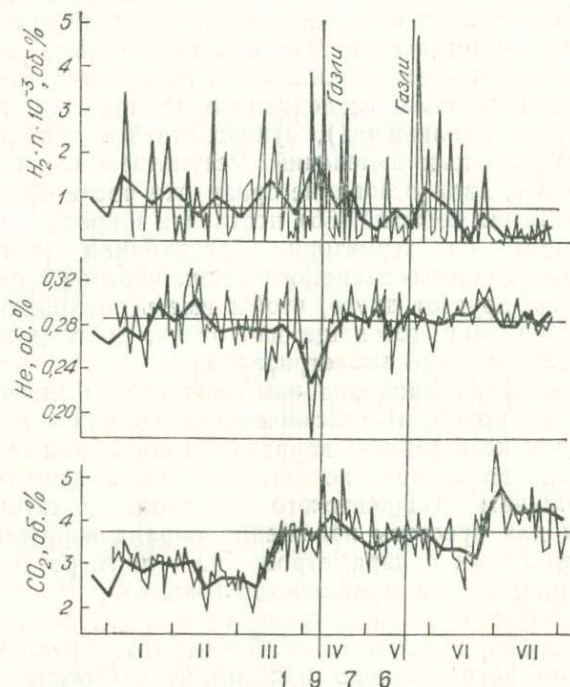


Рис. 4. Изменение газового состава подземных вод Ташкентского геодинамического полигона на период Газлийских землетрясений 1976 г. (приведенные данные).

более щелочной, при ее поглощении — кислой. В связи с этим изменение концентрации водородных ионов находится в обратной зависимости от изменения количества растворенного углекислого газа. Непосредственно перед толчком и к моменту толчка величина рН резко снижается до минимальных значений. Аналогичное поведение этого параметра в период подготовки землетрясений отмечали и другие авторы (68, 69). Амплитуда аномальных вариаций рН составляет 0,2—0,6 отн. ед., тогда как в сейсмически спокойные периоды не превышает 0,1 ед.

Полученная информация о газовых аномалиях (по результатам наблюдения ряда скважин) сопоставлена с результатами

изотопных исследований и наблюдениями за изменением таких параметров, как давление, температура вод, содержание радона, отдельных микрокомпонентов (фтор, бор), а также аномальным изменением рН. Выявленные короткопериодные аномальные изменения в составе газов в ходе месячного эксперимента и аномалии по радону и микрокомпонентам дали нам основание предположить возможность возникновения сильного землетрясения. Правда, располагая данными изменения газохимического состава только на одном полигоне, мы не могли конкретизировать район очага будущих землетрясений. Но исходя из опыта предыдущих исследований, мы высказали суждение о подготовке сильного землетрясения за пределами исследуемого региона (в радиусе до 500 км от пункта наблюдений), руководствуясь длительностью и характером аномальных изменений. Результаты наших наблюдений уже в 1976 г. дали основание сразу же после обработки материалов Газлийских событий (66) поставить вопрос о необходимости организации на территории республики единой сети наблюдательных гидрогеосейсмологических пунктов с расстоянием не более 100 км друг от друга, чтобы иметь возможность точнее судить о направлении готовящегося очага, а, следовательно, о месте, и силе возможного землетрясения.

Рассмотрим дальнейший ход изменения газохимических параметров в связи с крупными сейсмическими событиями 1977 г.

Учитывая, что коэффициент корреляции поведения газохимических компонентов во времени по четырем систематически наблюдаемым скважинам Ташкентского полигона достаточно высок (0,6—0,8), мы для простоты изложения проанализируем характер вариаций отдельных параметров на примере скважин в пос. Улубек (рис. 5, 7) и Луначарское (рис. 6).

После Газлийского землетрясения 1976 г. содержание гелия в подземных водах составляло 1,6 об. % (рис. 5). Среднеквадратичное отклонение не превышало 0,22 об. %. Со второй половины октября 1976 г. концентрация гелия, растворенного в подземных водах, стала резко варьировать с амплитудой 0,5—1,0 об. % с одновременным общим снижением концентрации гелия до 1,3 об. % в конце ноября — начале декабря 1976 г., т. е. за 2 месяца до сильного подземного толчка. После землетрясения содержание гелия стабилизировалось на среднефоновых значениях вплоть до июня 1977 г. Амплитуда вариаций не превышала величины среднеквадратичного отклонения. С июня 1977 г. характер вариаций резко меняется, амплитуда их составляет 1,0—1,3 об. %. Такой характер изменения сохраняется вплоть до момента Таваксайского землетрясения (табл. 2). Минимальные содержания гелия отмечались в июне, после чего начиная с августа и до середины ноября, концентрация его стала увеличиваться, достигнув 2—2,3 об. %. На момент Таваксайского землетрясения 6.XII.77 г. концентрация гелия, как и перед Исфаринским толчком, имела тенденцию к

некоторому спаду после достижения наиболее высоких концентраций.

В изменении содержания углекислого газа в рассматриваемый период можно отметить следующие закономерности. После Газлийского землетрясения 1976 г. оно постепенно увеличивалось по всем скважинам до сентября. В октябре — ноябре концентрации его снизились до фоновых значений (6 об. %), после чего характер вариаций резко изменился с общей тенденцией к повышению.

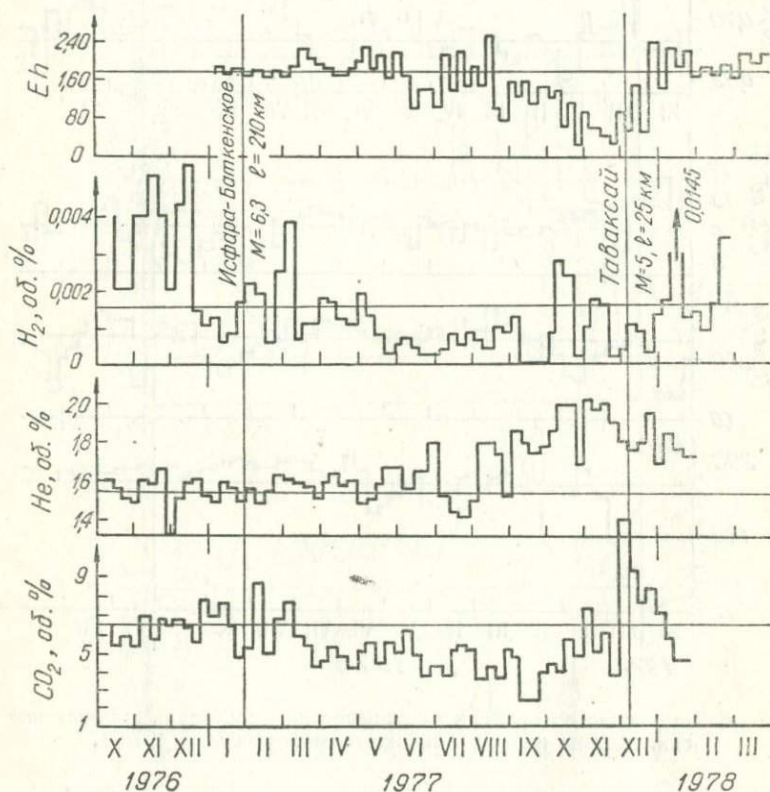


Рис. 5. Изменение во времени газохимического состава подземных вод скв. 9 на период Исфара-Баткенского и Таваксайского землетрясений 1977 г.

Амплитуда вариаций возросла в три раза (среднеквадратичные отклонения не превышают 2—3 об. %). На момент Исфаринского землетрясения приходится некоторый спад концентрации углекислоты. После землетрясения резкие вариации сохраняются еще в течение двух месяцев. Аналогично поведение углекислоты в воде исследуемого горизонта и накануне Таваксайского землетрясе-

ния. Однако аномальные вариации носят более выраженный характер, чем перед Исфаринским толчком. В октябре концентрация  $\text{CO}_2$  при резких вариациях имеет тенденцию к снижению, однако за неделю до толчка содержание углекислоты возрастает до 10—15 об.%, т.е. в 2—3 раза выше фоновых значений. Спустя месяц характер вариаций восстанавливается, а содержание угле-

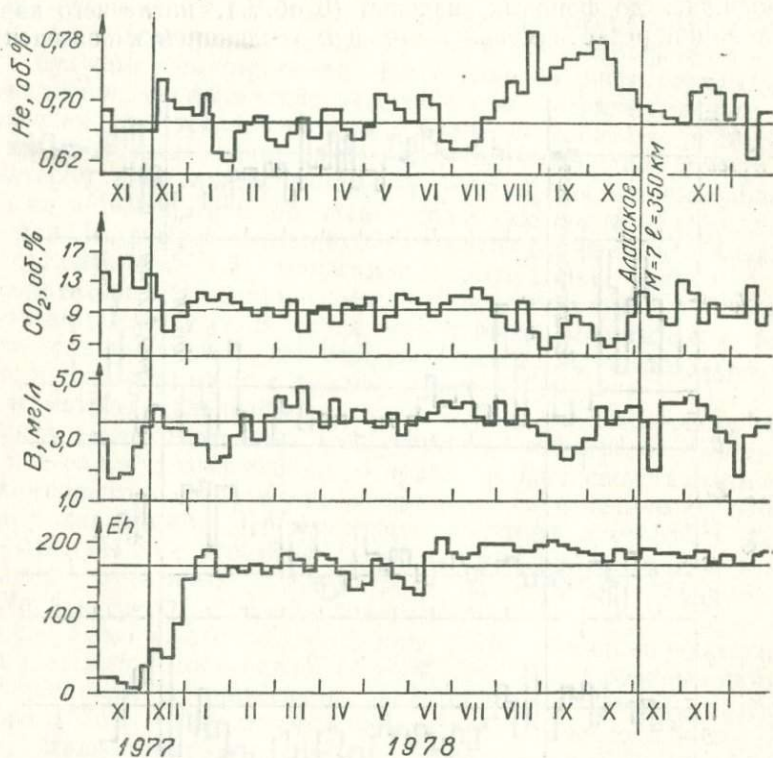


Рис. 6. Изменение во времени газохимического состава подземных вод скв. № 8 на период Алайского землетрясения 1978 г.

кислого газа сохраняет тенденцию к постепенному спаду. Аномальный ход изменения содержания растворенного углекислого газа подтверждается и результатами изотопных исследований.

Анализируя ход изменения кривых содержания молекулярного водорода, можно отметить следующие особенности его поведения в периоды, предшествующие сильным землетрясениям 1977 г. Нормальный фон содержания этого компонента в подземных водах (см. рис. 5) — отсутствие — десятитысячные доли об. процента — был нарушен Газлийскими толчками и их афтершоками 1976 г., когда в содержании водорода отмечались резкие вариации до сотых долей об. процента, т.е. количество его стало почти на два

порядка выше. К концу года амплитуда вариаций концентрации водорода несколько снизилась. За два месяца до сильного толчка, вплоть до июня 1977 г., вариации вновь становятся резкими. Вос-

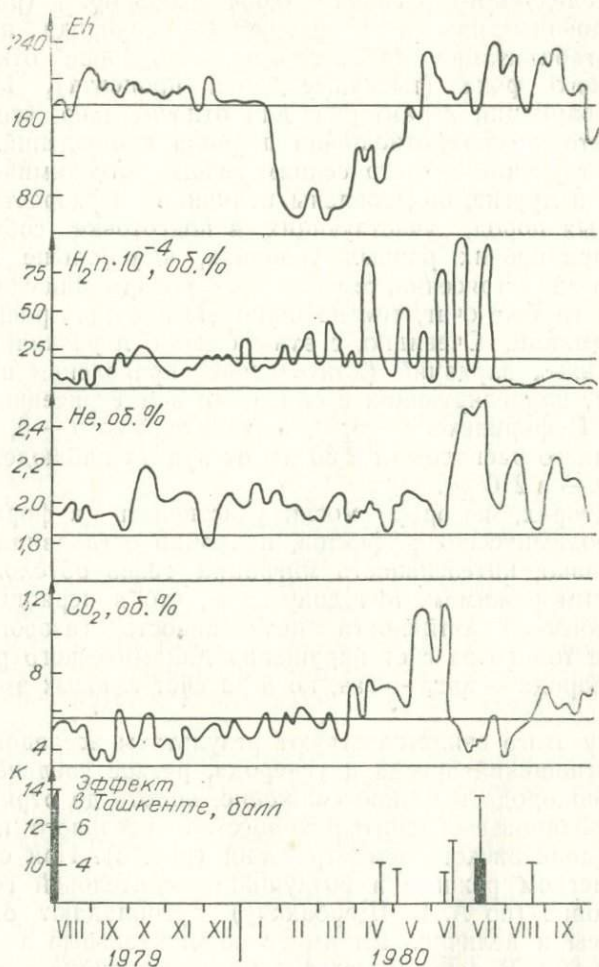


Рис. 7. Изменение газохимического состава подземных вод скв. 9 в период активизации сейсмических процессов на территории исследуемого региона.

становившийся с мая нормальный геохимический фон данного компонента сохраняется до конца года. Только в октябре — ноябре на этом фоне отмечается ряд всплесков в содержании молекулярного водорода, достигающих сотых долей процента. На момент землетрясения водород в пробах отсутствует, как при Алайском толчке 1974 и Газлийских 1976 г. (66). После Таваксайского

землетрясения в течение двух месяцев вариации водорода ярко выражены. В середине января зафиксированы самые высокие его концентрации в водах не только скв. 9, но и других наблюдаемых скважин исследуемого региона — 0,034—0,058 об.% (рис. 5). Со второй половины января в содержании водорода наметилась некоторая стабилизация на более высоком уровне относительно геохимического фона (тысячные доли процента). Небольшая амплитуда вариаций характерна для относительно «спокойного» в сейсмотектоническом отношении периода наблюдений.

Предшествующие землетрясениям газогидрогеохимические аномалии, как и другие, обусловлены величиной и скоростью деформаций горных пород, участвующих в подготовке событий. Как известно, при прочих равных условиях, чем больше магнитуда ожидаемого землетрясения, тем больших деформаций следует ожидать, а чем глубже очаг, тем на большую площадь распространяются деформации. Очевидно, с этим связан и различный характер аномальных вариаций (длительность проявления и величина амплитуды), коррелирующих с сильными землетрясениями 1977 г. Магнитуда Исфаринского — 6, 3, а Таваксайского — 5, 0, однако очаг последнего расположен в 30 км от пункта наблюдения, а Исфаринского — в 210 км.

На факторах, которые могли участвовать в формировании газогидрогеохимических эффектов, подробно останавливались выше. Безусловно, интенсивность миграции газов обусловлена геотектоническим режимом. Мы допускаем, что в периоды увеличения сейсмической активности интенсивность газового потока возросла не только за счет нарушения динамического равновесия в системе порода — вода — газ, но и за счет газовых эманаций из глубины.

В пользу этого свидетельствуют результаты исследований изотопных соотношений аргона и углерода, резкое увеличение молекулярного водорода и резкое снижение, вплоть до отрицательных значений, величины окислительно-восстановительного потенциала накануне Таваксайского землетрясения (рис. 5). При стабильном геотектоническом режиме в воздушно-окислительной геохимической обстановке (по А. В. Щербакову) преобладают окислительные процессы и величина  $Eh$  имеет положительные значения порядка 100—200. В случае восстановительных процессов величина  $Eh$  резко снижается до отрицательных значений (31). Одним из сильных восстановителей, как известно, является водород, проявления которого в верхних частях геологических разрезов большинство исследователей рассматривают как результат миграции из глубоких оболочек Земли. Возможными путями такого подтока водорода и других газов могут быть разломы, в зоне которых и расположена скв. 9, по которой получены наиболее отчетливо выраженные аномалии в поведении углекислого газа, гелия, молекулярного водорода.

Следующее сильное землетрясение на территории Средней Азии, эффект которого в Ташкенте составил 4—5 баллов — Алайское 1978 г.

Оно также предварялось гаммой аномальных проявлений в поведении отдельных газохимических компонентов. Со второй половины июня 1978 г. (т. е. за 3 месяца до землетрясения) содержание гелия, и до того имевшее некоторую тенденцию к увеличению, после Таваксайского землетрясения еще более возросло и в среднем составило 0,77—0,78 об.‰ при среднем многолетнем 0,64 об.‰. Накануне самого события в содержании гелия наметился спад (рис. 6).

По-иному изменяется содержание углекислого газа. С августа по октябрь 1978 г. количество растворенной углекислоты упало. Так, по скв. 8 в этот период оно составило 5—7 об.‰, что в 2 раза ниже среднегодового значения и почти в 3 среднемноголетнего (13, 9 об.‰). Восстановились фоновые значения сразу же после Алайского землетрясения.

Как и в предыдущих случаях, величина pH изменялась в противофазе к поведению углекислоты.

В изменении другого показателя, характеризующего состояние среды, в которой протекают различные физико-химические процессы, в величине окислительно-восстановительного потенциала никаких аномальных проявлений не обнаружено (см. рис. 6). Анализ поведения этого параметра, наблюдения за вариациями которого начаты с середины 1977 г., позволил нам высказать предположение, что изменяется он только перед землетрясениями, очаг которых располагается в пределах наблюдаемого геодинамического полигона, т. е. в радиусе не более 100 км от пунктов наблюдения.

В течение последующего периода в изменении газохимических параметров подземных вод на территории Ташкентского геодинамического полигона никаких особых аномалий не наблюдалось, за исключением очень высокого содержания  $\text{CO}_2$  по скв. 8 со второй половины 1979 г. до середины 1980 г. С начала 1980 г. аномальные изменения наметились у многих параметров. В феврале по всем скважинам полигона понизился окислительно-восстановительный потенциал. Минимальные значения зафиксированы по скв. 9, которые в среднем составляли 50 отн. ед. (рис. 7), с апреля значительно возросло содержание молекулярного водорода и углекислого газа. С середины 1980 г. в подземных водах резко увеличилась концентрация гелия. Наблюдались такие высокие содержания гелия (2,5—2,6 об.‰), какие не зарегистрированы за весь период наблюдения (с 1972 г.), причем они не были единичными и продержались около месяца, затем количество гелия снизилось, однако по всем скважинам исследуемого региона до октября 1980 г. продолжало оставаться на несколько более высоком уровне по сравнению со среднемноголетними значениями. Все эти газохимические аномальные проявления, под-

твержденные аномальными изменениями в микрокомпонентном составе подземных вод, дали нам основание уже с середины 1979 г., а более уверенно — с начала 1980 г. предполагать возможность подготовки землетрясений, о чем неоднократно сообщалось на прогнозной комиссии Института сейсмологии. Аномальные проявления молекулярного водорода, изменения величины  $E_h$ , микрокомпонентного состава свидетельствовали о подготовке местного или не очень далекого, но сильного землетрясения. Как видно из перечня землетрясений (см. табл. 2), с конца апреля 1980 г. в сеймотектоническом режиме исследуемого региона отмечается активизация, выразившаяся серией местных землетрясений с  $K=9-11,2$  в радиусе до 80 км от пунктов наблюдения. В середине июля 1980 г. произошло землетрясение в Ферганской долине с  $K=13,5$  на расстоянии 165 км от пунктов наблюдения, эффект которого в Ташкенте составил 4—5 баллов. Можно предположить, что газохимические аномалии 1980 г. характеризовали подготовку сейсмически активного периода 1980 г. Однако, исходя из опыта многолетних гидрогеосейсмологических исследований, можно сделать вывод, что амплитуда и продолжительность аномалий в газохимическом составе подземных вод в 1980 г. свидетельствуют о накоплении достаточно высоких напряжений, которые вряд ли были сняты серией этих частых, но довольно слабых местных землетрясений.

В связи с тем, что к настоящему времени накопилось достаточно большое количество систематических данных измерения газохимических параметров во времени и учитывая довольно сложный характер аномальных проявлений в газохимическом составе накануне землетрясений, возникла необходимость в статистической обработке полученной информации с помощью ЭВМ. Результаты изложены в специальном разделе данной монографии.

## Глава II

### ВАРИАЦИИ МАКРО- МИКРОКОМПОНЕНТНОГО СОСТАВА ПОДЗЕМНЫХ ВОД ТАШКЕНТСКОГО ГЕОДИНАМИЧЕСКОГО ПОЛИГОНА

Мы в течение многих лет изучали гидрогеохимические особенности термальных вод Ташкентского геодинамического полигона: общий химический (макрокомпонентный) состав, содержание хлор-иона, а также микрокомпонентов: фтора, бора и ртути. Детальное изучение вопроса привело к рассмотрению взаимосвязи между вариациями химического состава подземных вод и проявлением сейсмичности территории.

Анализировались водные пробы с определением в них концентраций фтора, бора, хлора в лаборатории отдела гидрогеосейсмологии ИС АН УзССР по общепринятым методикам, разработанным А. А. Резниковым (70), ртути — в Институте ядерной физики АН УзССР радиоактивационным методом (71).

Сокращенный химический анализ водных проб производился на договорных началах в гидрохимической лаборатории Голодно-степской режимной экспедиции объединения «Узбекгидрогеология» МГ УзССР.

Ташкентские минеральные воды — пресные, преимущественно гидрокарбонатно-натриевого состава с рН, превышающей 7,0 (табл.3).

Результаты режимных наблюдений свидетельствуют о том, что минерализация термоминеральных вод в многолетнем разрезе остается неизменной. Отдельные ее отклонения, зависящие от изменения некоторых макро- и микрокомпонентов, можно связать

Таблица 3

Общая характеристика химического состава термоминеральных вод Ташкентского геодинамического полигона

Сква- жи а	Период наблюдения	Содержание микрокомпонентов и минерализация, мг/л						
		НСО <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Сl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Na+K <sup>+</sup>	минерали- зация
2	1972—1975	264,18	74,556	115,979	1,996	9,126	205,83	594,458
	1976—1980	261,15	70,94	125,77	2,404	9,094	206,22	590,53
8	1972—1975	452,984	82,954	142,045	2,87	10,373	301,939	858,427
	1976—1980	440,55	79,955	155,51	2,94	9,41	306,95	844,78
3	1972—1975	336,49	82,224	128,45	1,65	9,036	247,677	714,273
	1976—1980	335,35	81,485	137,93	2,12	8,768	256,0	708,45
9	1972—1975	316,948	363,215	230,287	11,247	28,596	433,091	1318,29
	1976—1980	335,53	362,13	247,77	12,029	27,095	440,90	1309,3

с активизацией тектонических движений в периоды, предшествующие или сопутствующие землетрясениям. Реакция величины минерализации по скважинам неравнозначна. Так, по скв. 9 отмечено повышение минерализации от средней величины на протяжении 5—6 месяцев в период Газлийских землетрясений, когда максимальная величина минерализации составила 1360 мг/л (при средней 1310 мг/л). За 6 месяцев до Алайского землетрясения отмечено резкое снижение минерализации до 1265 мг/л. Небольшое ее снижение наблюдалось за 6 месяцев до Алайского землетрясения и после него в скв. 8. Скважина 3 характеризуется резким повышением минерализации после Исфара-Баткенского землетрясения спустя 2—3 месяца. Максимум величины составил 790 мг/л (при средней 738 мг/л).

Некоторые сведения о геохимии и особенностях вариации хлора в подземных водах Ташкентского геодинамического полигона

Из компонентов основного химического состава термоминеральных вод изучаемого полигона несомненный интерес представляет хлор. Широко распространенный в природных водах, этот

элемент тяготеет преимущественно к верхней части земной коры. Геохимия хлора почти полностью зависит от физико-химических условий миграции, растворимости солей и др. Ионы хлора обладают свободной миграцией. А. И. Перельман (72) считает миграцию хлора очень сильной (п. 10—п. 100). Свободная миграция ионов хлора обусловлена отсутствием барьеров растворимости и биохимического, а также способностью мигрировать в растворах самой различной концентрации в виде свободного иона  $Cl^-$ , нарушать структуру воды, что способствует высокой подвижности ионов хлора в водном растворе, и понижать структурное давление раствора, что способствует удерживанию хлора в растворе даже на больших глубинах (73).

Хлор обладает большой способностью к концентрации. Основным концентратом хлора служит Мировой океан. Здесь его содержание составляет 1,93%. Важнейшим источником хлора в изверженных породах является хлор-апатит. Самый распространенный минерал хлора в зоне гипергенеза — галит. В Мировом океане сконцентрирована главная масса хлора —  $3 \cdot 10^{22}$  г  $Cl^-$ . Основным источником поступления его в гидросферу является мантия. Известно, что хлор — неперенный компонент минералообразующих растворов и вулканических эксгаляций районов современной вулканической деятельности. В океан хлор в настоящее время поступает через кислые дымы подводных и надводных вулканических извержений, некоторая же часть его попадает в природные воды из горных пород. Не отрицая роли выщелачивания и растворения вмещающих пород в формировании общего химического состава подземных вод, очевидно, нельзя исключить наличие иных источников питания многими компонентами. Такими источниками могут быть глубинные воды и флюиды.

Работами некоторых исследователей (74) доказано, что хлор может выноситься эндогенным флюидом, в котором содержится вода, поступающая из нижних частей земной коры и привносящая галогены и многие летучие компоненты по глубинным разломам и трещинам. На возможность обогащения термальных вод хлором глубинного происхождения, например для Прибайкалья, указывали В. Г. Ткачук (75), И. С. Ломоносов (76) и др. Есть основания предполагать, что изменения, происшедшие в химическом составе подземных вод Ташкентского геодинамического полигона в результате Ташкентского землетрясения 1966 г., свидетельствуют о связи этих вод с наиболее глубинными зонами земной коры. Связь эта осуществляется, вероятно, по зонам, расположенным вблизи возрожденных разломов.

Показано (77), что вода скважины Улугбек, характеризующаяся до землетрясения гидрокарбонатно-хлоридно-натриевым составом, после землетрясения стала хлоридно-гидрокарбонатно-натриевой. При этом состав изменялся постепенно, в течение 3—4 месяцев за счет увеличения хлоридов, что способствовало повышению минерализации от 0,93 до 1,26 г/л.

В настоящее время состав воды продолжает оставаться хлоридно-гидрокарбонатно-натриевым с величиной минерализации 1,35 г/л. По-прежнему содержание хлора составляет 10—12 мг экв от анионной части, а иногда и более. Это свидетельствует о том, что источник поступления нижележащих палеозойских вод в верхний водоносный горизонт продолжает свое действие в зонах возрожденных Ташкентского и Бурджарского разломов. Объяснить это только результатом выщелачивания солей из вмещающих пород или миграцией хлора с отжимающими поровыми водами из осадочных толщ под действием высоких температур и геостатических давлений, по нашему мнению, недостаточно. Очевидно, указанные разломы выполняют роль не только проводников водных растворов, но и структур, в которые из блоков вмещающих пород, прилегающих к разлому, поступают растворы и газы, обогащенные различными химическими компонентами (хлор, фтор, бор, гелий, радон, углекислый газ и др.).

Режимные наблюдения за изменением хлора в подземных водах Ташкентского геодинамического полигона, проведенные с 1977 по 1980 г., свидетельствуют о значительных изменениях, происшедших в результате активизации тектонических процессов. Рассмотрим эти изменения. Приведенные данные позволяют высказать предположение об обогащении подземных вод сеномана ионами хлора из нижележащих горизонтов по зонам разломов. Результаты анализов проб воды свидетельствуют о том, что содержание хлора в подземных водах бассейна в многолетнем разрезе не изменяется, тем не менее в периоды, предшествующие землетрясениям, за 1,5—2 мес. до сейсмического события, заметно снижается содержание хлора.

В дальнейшем при характеристике вариаций микрокомпонентов будем ссылаться на землетрясения, перечисленные в табл. 2. Естественно, все эти тектонические движения не могли не сказаться на химизме подземных термоминеральных вод бассейна. Наглядно прослеживаются вариации по хлор-иону в периоды, предшествующие землетрясениям.

Мы проводим осредненные среднемесячные значения (рис. 8). Анализ кривых по скв. 9 Улугбек и 8 Луначарское за II полугодие 1977 г. свидетельствует об относительно завышенных значениях хлора по сравнению со среднемноголетними. Общее содержание хлора за весь период до Таваксайского землетрясения, т. е. за 6 мес., выше средних фоновых на 20—40 мг/л (при среднем значении 442 мг/л) по скв. 9 Улугбек и на 2—5 мг/л (при среднем 83,2) по скв. 8 Луначарское. Кривые по скважинам почти идентичны как по характеру вариаций, так и по амплитуде изменения. Значительный спад хлора отмечен за месяц до землетрясений, происшедших за пределами г. Ташкента, но имеющих значительный эффект (силой 4 балла). Почти за два месяца до Таваксайского землетрясения концентрация хлора в скважинах снизилась до значений, близких к средним и ниже средних, и

продолжалось это примерно в течение месяца, затем ионы хлора стали увеличиваться, достигнув значений, превышающих фоновые по скв. 9 Улугбек до 475 мг/л (при среднем 442 мг/л) и по скв. 8 Луначарское — до 87 мг/л (при среднем 83,2 мг/л). Затем последовал постепенный спад и через две недели после землетрясения по скв. 8 Луначарское достигли средних величин; по скв. 9 Улугбек это восстановление продолжалось около двух месяцев.

В 1978 г. произошли местные землетрясения с магнитудой, не превышающей 3,2—3,8. Лишь в июне и ноябре были ощутимые землетрясения в районе Газли с  $M=5,8-6,4$  с эффектом в Таш-

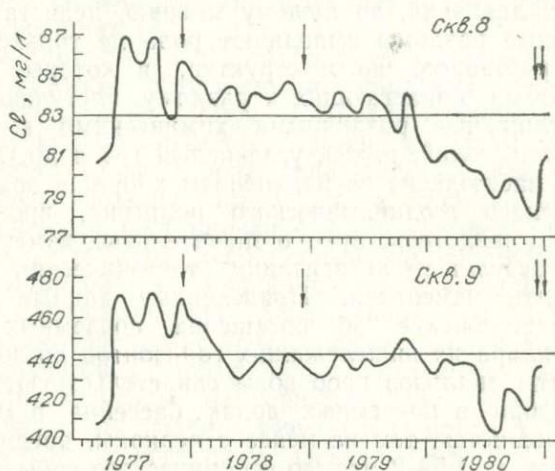


Рис. 8. Вариационные кривые изменения хлора в скважинах 8 и 9.

кенте в 3 балла, на Северном Памире (Алайское землетрясение) с  $M=6,8$  и эффектом в 4—5 баллов. Амплитуда колебания между максимальной и минимальной концентрацией хлора была незначительной: от 82,3 до 85,7 мг/л по скв. 8 Луначарское и от 425 до 447 мг/л по скв. 9 Улугбек.

Ряд мелких землетрясений местного характера существенно не повлиял на ход вариации хлора — он оставался в пределах средних значений.

1979 г. — относительно спокойный в сейсмическом отношении, характеризуется умеренными вариациями хлора в составе подземных вод полигона. 26. II. 79 г. произошло одно землетрясение местного характера в Приташкентском районе с  $M=4,2$  силой 3—4 балла. Концентрация хлора оставалась в пределах средней, тем не менее тенденция к некоторому снижению отмечается в течение двух месяцев до толчка.

Весна и лето 1980 г. характеризовались серией неглубоких ( $H=10-15$  км,  $M=$  от 3 до 4) землетрясений, происшедших в

пределах Ташкентского геодинамического полигона (в 40—50 км от Ташкента — район Таваксайского землетрясения) с эффектом 2—3 балла и одним землетрясением в Ферганской долине с  $M=5,3$  с эффектом в г. Ташкенте 4—5 баллов. Если обратимся к анализу кривых содержания хлора за этот период, то увидим, что с мая 1980 г. отмечается значительное снижение хлор-иона. Амплитуда снижения от среднего значения составляет 20—35 мг/л. Эта тенденция сохраняется в течение 6 месяцев. Можно предположить, что в процессе накопления упругих напряжений, сопровождающемся нарушением сплошности пород, создаются условия для открытия систем, по которым происходит отток наиболее летучих продуктов химических реакций (хлора, фтора, бора и др.), особенно интенсивно проходящих под действием повышающихся температур и давлений.

Такое длительное снижение хлора является, на наш взгляд, предвестником какого-то крупного сейсмического события.

В природных водах микрокомпоненты распространены и изучены неодинаково. Ниже рассматриваются те из них, которые представляют гидрогеохимический интерес с точки зрения использования результатов исследований и интерпретации их в применении к вопросам гидрогеосейсмологии.

#### **Некоторые сведения о геохимии и особенностях вариации бора в подземных водах Ташкентского геодинамического полигона**

К настоящему времени по геохимии бора накоплен большой фактический материал (78—82). Бор — весьма интересный элемент земной коры; пути его миграции и процессы концентрации очень своеобразны. Одна из важнейших задач геохимии — выявление особенностей поведения этого элемента в геологических процессах. Большой интерес представляет изучение особенностей поведения и закономерностей изменения концентрации бора в подземных водах сейсмоактивных районов. Весовой кларк для земной коры составляет по данным разных исследователей от 0,001 до 0,05 (80, 84). Наименьшие содержания бора характерны для осадочных пород, в кислых оно возрастает. Особенно богаты бором осадочные породы морского происхождения. Объяснить это можно легкой растворимостью соединений бора и способностью их накапливаться в морской воде. Наибольшее количество бора в осадочных породах, по Г. Хардеру (82), содержат глины и глинистые сланцы. Носителями бора в них являются слюды и тонкозернистые иллиты.

Бор — один из интереснейших химических элементов земной коры, характерный элемент гидросферы, поверхностных и подземных вод, магматических эксгаляций и газовой-жидких включений, пронизывающих всю толщу земной коры и являющихся показателями бороносности минералообразующих флюидов, которые формируются в глубинных зонах земной коры. Основные носители

бора — слюды и алюмосиликаты. Из несиликатных минералов носителями рассеянного бора можно назвать доломит, ангидрит, фосфориты и бокситы осадочного происхождения. Особенности распределения бора в магматических породах отражают его поведение в процессах дифференциации пород и дегазации вещества мантии. Бор накапливается в основном в силикатных расплавах, наиболее обогащенных главным образом водой и летучими компонентами, а отсюда мигрирует в верхние зоны литосферы. Бор — постоянная и важная составная часть летучей фракции на всех стадиях ее существования; формы же накопления бора в составе летучей фракции изменяются в зависимости от температуры.

По А. Ф. Горбову (81), летучая фракция служит носителем бора на всем пути ее миграции в земной коре, от области генерации в верхней мантии до поверхности Земли, и на всем пути концентрации летучих соединений бора в составе паров и газов находится на уровне их насыщения.

Термальные и минеральные воды, разгружающиеся по глубинным разломам, несут важнейшую информацию о характере продуктов дегазации и производных летучей фракции. Возможность выделения бора, например, из осадочных пород в виде летучих соединений доказана экспериментально. При образовании глубоких трещин и разломов давление значительно колеблется. Вследствие снижения давлений глубоко залегающие перегретые водные растворы переходят в парообразное состояние. Таким образом, при прохождении через борсодержащие осадочные отложения эти горячие пары, содержащие летучие соединения бора, дополнительно им обогащаются. Участки пересечения разломов испытывают наибольшие динамические нагрузки. Здесь породы интенсивно перемяты, раздроблены и представляют благоприятную среду для подъема с больших глубин газовой-жидкой флюиды. Установлено (78, 81, 82), что перегретые хлоридно-натриевые воды — продукт прямой конденсации флюида, который состоит из паров воды с растворенными в них галлоидами щелочей. Об этом свидетельствуют гидрогеохимические особенности бора и хлора. Это различные по химическим свойствам элементы, но одинаковые по растворимости в воде при низких температурах и летучести при высоких.

Говоря об участии различных типов пород в обогащении бором, следует подчеркнуть, что многие исследователи (78, 79) указывают на преимущественную роль осадочных, особенно глинистых пород. Однако анализ работ по геохимии бора в последние годы свидетельствует, что величины средних содержаний бора в глинистых осадках практически постоянны. И если раньше подчеркивалась особая роль адсорбции как главного фактора вхождения бора в глинистые минералы, то в настоящее время большинство исследователей отрицают роль поглощения бора глинистыми осадками. В результате экспериментов (82—84) установ-

лено, что глинистые минералы приобретают бор не в области отложения, а в области формирования осадков, в коре выветривания, наследуя его от материнских пород, а неодинаковые содержания бора объясняются различной степенью выветривания горных пород в области сноса. При этом количество бора в глинистых — элювиальных продуктах коры выветривания не зависит ни от степени, ни от характера изменения исходных пород, а определяется только уровнем его содержания в этих породах. Постоянные средние содержания бора в глинистых осадках можно объяснить большой прочностью связи бора в кристаллической решетке алюмосиликатов, в состав которых он входит. Немаловажную роль играет степень отсортированности глинистых минералов, а также наличие в составе осадков гидрослюд или глауконита. Содержание бора в песках и песчаниках зависит от минералогического состава песчаных зерен, химического состава цемента и других факторов. В песках и песчаниках с карбонатным цементом бора мало. Аркозовые и слюдистые глинистые пески и песчаники более обогащены бором за счет слюд, полевых шпатов, зерен плагиоклаза, глинистых минералов, наличием или примесью глауконита. Отложения сеноманского яруса (77), в которых заключены изучаемые нами термоминеральные воды, трансгрессивно залегают на нижнемеловых и к западу от центра города, срезая их, ложатся непосредственно на палеозойские образования. В нижней части разреза — тонкозернистые песчаники с гравием, кремнистые доломитизированные известняки, мергелистые и аргиллитоподобные глины, в средней и верхней частях преобладают аркозовые разнозернистые песчаники, плотные глины, мергели и известняки. Мощность свиты составляет 120—130 м. В глинах, перекрывающих сверху водосодержащий пласт песчаников, по данным Н. И. Гриднева и С. Бахриджинова (84), отмечается наличие гидроокиси железа окатышей слюды. Можно с уверенностью сказать, что величины средних содержаний бора в подземных водах изучаемого полигона в каждой скважине в многолетнем разрезе практически постоянны. Разницу в концентрации бора конкретно в той или иной скважине можно объяснить литологическим составом пород, наличием в них борсодержащих минералов, полевых шпатов и слюд. Аномальные же проявления в концентрациях бора — результат проникновения летучих соединений бора из глубоких горизонтов по трещинам и разломам под действием высоких температур и давлений.

Приводим характеристику боронности термоминеральных вод Ташкентского геодинамического полигона:

Скважина	Среднее содержание бора, мг/л				Среднее многолетнее, мг/л
	1977	1978	1979	1980	
8	3,27	3,68	3,31	3,16	3,33
9	2,84	3,50	3,11	3,11	3,13
3	2,18	2,41	2,34	2,01	2,23
2	1,58	1,66	1,85	1,74	1,68

Как видно, средние значения в многолетнем разрезе изменяются незначительно. Однако 1977 год характеризуется несколько заниженными величинами, хотя в отдельные периоды наблюдаются и аномальные значения, значительно превышающие фоновые.

Остановимся на характере изменения бора в скважинах в период Таваксайского землетрясения 1977 г. (рис. 9). Во всех скважинах полигона отмечается тенденция к снижению бора

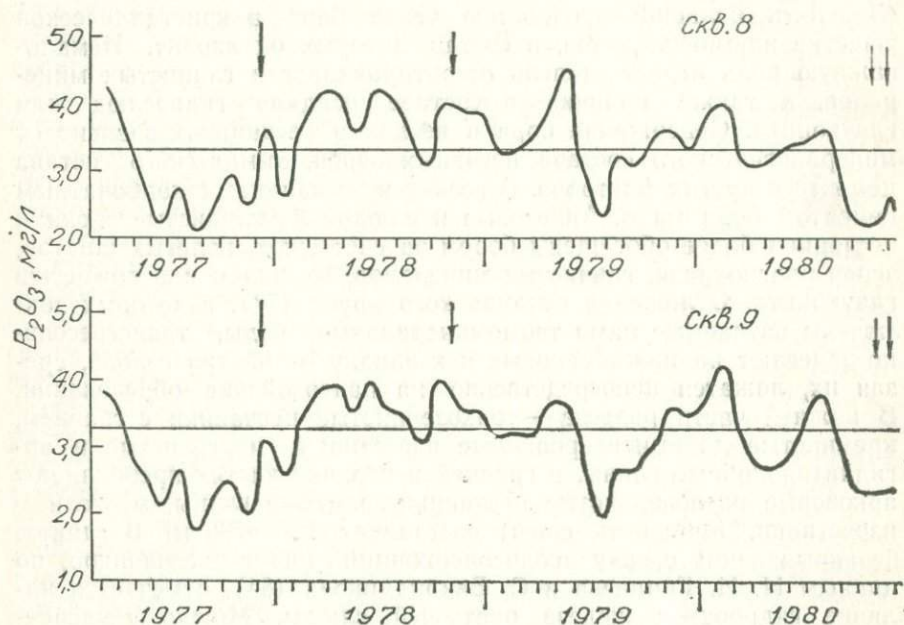


Рис. 9. Вариационные кривые изменения бора в скважинах 8 и 9.

в течение шести месяцев до землетрясения. Амплитуда колебания максимальных и минимальных концентраций составила 1,5—2,0 мг/л.

В течение 1978 г. повсеместно отмечается нормальный ход кривой, находящейся в пределах средней величины, хотя и были небольшие вариации в период Алайского землетрясения. Примерно за 1—1,5 месяца до землетрясения наблюдалось снижение содержания бора от средних значений, затем непродолжительное повышение. Амплитуда колебания от среднего фонового содержания составила 1,5—1,7 мг/л. Заметные изменения в содержаниях бора отмечены в середине 1979 г., когда почти во всех скважинах значения бора выросли до аномальных, превышающих средние. Эти значения сохранялись в течение месяца, затем резко упали до уровней, ниже средних фоновых. Восстановление уров-

ней происходит медленно. Эти изменения не сопровождались каким-либо значительным сейсмическим событием.

Существенные изменения в содержаниях бора зафиксированы по всем скважинам, начиная с августа 1980 г. Изменения эти равнозначны по величине, периоды спадов и подъемов смещены во времени. Во всех скважинах намечается тенденция к общему снижению концентрации бора. Минимум среднемесячных значений бора на сентябрь 1980 г. составил: скв. 8 — 2,19, 9 — 2,31, 3 — 1,00, 2 — 0,89 мг/л. Мы предполагаем, что такое длительное снижение объясняется действием больших давлений, создающих условия, при которых породы способны удерживать в водных растворах определенное количество летучих соединений, в том числе бора. А, возможно, это происходит за счет оттока наиболее летучих соединений (хлора, бора, фтора и др.) по открытым системам, возникающим в результате нарушения сплошности пород в период подготовки сильного землетрясения.

### Краткие сведения о геохимии и особенностях вариаций фтора в подземных водах изучаемой территории

Подробная геохимическая характеристика фтора описана ранее (27), поэтому в данном разделе будут даны краткие сведения о геохимии этого элемента. Распространение фтора в подземных водах зависит от ряда факторов, один из которых — взаимосвязь воды с горной породой. Главные носители фтора в породах — флюорит, апатит, роговая обманка, биотит и др. Известно (85,86), что фтор переходит в воду в результате растворения и гидратации его минералов. Важную роль в обогащении вод фтором играют фторсодержащие газово-жидкие включения в минералах: кварц, барит, карбонаты, флюорит, полевые шпаты, рудные и другие минералы. По данным Н. П. Ермакова (86), в газово-жидкие включения входят: HF, HCl, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, Fe, Cl<sub>2</sub> и др. Не менее важным моментом вовлечения фтора в сферу его миграции из породообразующих минералов (биотиты, роговая обманка, апатиты и др.) является реакция замещения хлор-иона и гидроокисной группы OH<sup>-</sup> на фтор-ион (OH<sup>-</sup> → F<sup>-</sup>, Cl<sup>-</sup> → F<sup>-</sup>). Влияние магматической деятельности на обогащение природных вод фтором изучено недостаточно, хотя существующий материал указывает на чрезвычайно важную роль этого фактора. С одной стороны, сами магмы — своеобразный источник поступления фтора в породы, с другой — воздействие магматических очагов на подземные воды, вызывающее значительное повышение температуры и давлений.

Как показали исследования Л. Н. Когарко (87) и И. Д. Рябичкова в зонах резкого снятия давления в процессах вулканизма наблюдается отделение водного флюида, содержащего фтор. Но главная масса фтора, как утверждают авторы, связана с гидролитическим разложением фторсодержащих минералов, частично закристаллизованных на глубине пород под действием циркулиру-

ющих нагретых метеорных вод. Главная форма отделения фтора в воднофлюидную фазу — HF. Фтороносность терм кристаллических пород, амплитуда колебания содержаний фтора в них значительна и зависит от химического состава, температуры и геохимических особенностей водовмещающих пород, влияющих на обогащение вод фтором джоков: во-первых, в условиях тектонической активности в зонах разломов создаются благоприятные условия для возникновения температуры и химического состава вод, наиболее благоприятных для накопления и миграции фтора; во-вторых, сами кристаллические породы, будучи обогащенными фтором, служат поставщиками его в раствор. В водоносных горизонтах осадочных толщ воды обогащаются фтором в результате выщелачивания растворами минералов, находящихся в породе, особенно в верхней зоне интенсивного водообмена.

Подземные воды пределах изучаемого геодинамического полигона содержат различные концентрации фтора, а среднегодовые значения (мг/л) за многолетний период по всем скважинам свидетельствуют о значительном их колебании:

Скважина	1972	1973	1974	1975	1976	1977	1978	1979	1980
Луначарское	1,10	1,33	1,43	1,40	1,47	1,60	1,66	1,68	1,62
Пищевик	0,61	0,62	0,66	0,66	0,71	0,78	0,82	0,81	0,81
Удугбек	0,61	0,78	0,92	1,02	1,03	1,26	1,30	1,34	1,27
Победа	0,60	0,52	0,54	0,52	0,51	0,50	0,5	0,59	0,56

Как видно, величина фтора за 1972—1980 гг. в целом по полигону увеличилась, причем увеличение отмечается с 1976 г. после Газлийских землетрясений и особенно сказывается в подземных водах скважин, расположенных вблизи зон разломов.

Газлийские землетрясения 8 апреля и 17 мая 1876 г. с эффектом в г. Ташкенте 4—5 баллов существенно повлияли на изменение геохимического состава термоминеральных вод в целом по бассейну, в том числе и на фтороносность. Характер происходящих изменений в содержании фтора по скважинам 8 Луначарское и 3 Пищевик за период с февраля по сентябрь 1976 г., т.е. за 3 месяца, предшествующих землетрясению 8 апреля, в период сильных толчков 17 мая и последующих афтершоков свидетельствует об идентичности их поведения (рис. 10). Концентрация фтора значительно изменяется. Разница между минимальными и максимальными значениями составляла в среднем до землетрясения в скв. 3 Пищевик 0,20—0,30, 8 Луначарское—0,40—0,60 мг/л, после землетрясения она стала значительно выше—0,30—0,48 и 0,60—0,77 мг/л соответственно. Среднемесячные значения, не превышающие 0,65—0,70 мг/л, возросли до 0,73—0,75 мг/л в скв. 3 Пищевик, от 1,35—1,43 до 1,50—1,58 мг/л в скв. 8 Луначарское.

Характерен значительный спад концентрации фтора незадолго до землетрясения. Если принять за среднюю фоновую величину за этот период среднегодовое значение фтора (0,70 мг/л—3 Пищевик, и 1,47—8 Луначарское), то общее снижение по скважинам

очевидно. Аномальные же значения приходятся на период Газлийских землетрясений и повторных толчков и сохраняются в течение четырех месяцев, составляя 0,86 мг/л по скв. Пищевик и 1,76 мг/л — по скв. 8 Луначарское. Затем в течение последующих трех месяцев по этим скважинам отмечается тенденция к снижению, продолжающаяся более месяца, и наибольшего значения концентрация фтора достигает к моменту Исфара-Баткентского

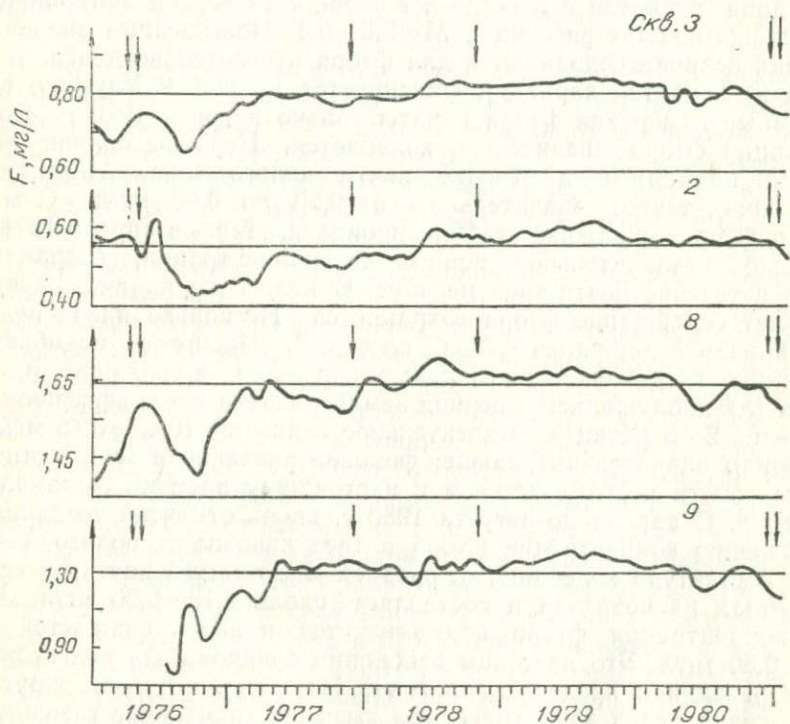


Рис. 10. Вариационные кривые содержания фтора в подземных водах Ташкентского геодинамического полигона (скв. 2, 3, 8, 9).

землетрясения и спустя два месяца после него, когда среднемесячные величины составили по скв. 8 Луначарское 1,65 мг/л, а по скв. 3 Пищевик—0,79. К моменту Таваксайского землетрясения концентрация фтора вновь снижается и достигает среднего фонового значения спустя 1,5—2 месяца после толчка. Анализ кривой содержания фтора по скв. 8 Луначарское при Таваксайском землетрясении (период с V—77 по VI—78 г.) показывает, что среднее содержание фтора (1,64 мг/л), характерное для скважины, нарушается аномально высокими и низкими значениями. Характер изменения различный как по амплитуде минимальных

и максимальных концентраций, так и по длительности периодов изменения.

Снижение концентрации фтора, начавшееся с середины сентября, достигло минимума в начале ноября (1,52 мг/л); затем оно начало возрастать, достигнув максимума (1,68 мг/л) в декабре 1977 г. Количество фтора после землетрясения возросло, превысив фоновое значение. Можно предположить, что это было следствием землетрясений, происходящих на территории Приташкентского района в апреле с  $M=3,8$  и в июне с  $M=3,2$  и афтершоком Газлийского землетрясения с  $M=5,8-6,4$ . Повышенные значения средних величин сохраняются для фтора относительно долго.

Иной характер вариаций фиксируется по скв. 9 Улугбек, где режимные измерения фтора начаты только в конце 1976 г. Концентрация фтора значительно колеблется. Периоды спадов сменяются подъемами в течение почти целого года. Амплитуда колебания также значительна — от 0,20 до 0,60 мг/л. С мая 1977 г. фтор в скважине стабилизировался. Лишь в апреле 1978 г. отмечено незначительное понижение концентрации, сохраняющееся в течение почти трех месяцев. В целом же на протяжении трех лет содержание фтора сохраняется. Несколько иначе ведет себя кривая содержания фтора по скв. 2. Несмотря на общую тенденцию к снижению аномальные значения в скважине (0,58, 0,62 мг/л) наблюдались в период землетрясений и его афтершоков в течение 2—3 месяцев. Относительное снижение (0,43—0,45 мг/л) наступило значительно раньше; фоновое значение в многолетнем разрезе почти не изменяется и к настоящему времени составляет 0,56 мг/л. С апреля до августа 1980 г. вновь отмечена тенденция к снижению концентрации фтора в трех скважинах полигона (9, 8, 3). Амплитуда колебания от средней многолетней почти во всех скважинах равнозначна и составляет около 0,15—0,20 мг/л. Затем концентрация фтора нормализуется и вновь снижается на 0,20—0,30 мг/л. Это дает нам основание предполагать подготовку землетрясения в пределах полигона. Известно, что рост упругих напряжений перед землетрясением вызывает изменение газохимического состава подземных вод, залегающих на больших глубинах. При образовании тектонических трещин и активизации разломов снижается давления, в результате чего глубоко залегающие перегретые водные растворы переходят в парообразное состояние. Горячие пары, насыщенные различными летучими соединениями, при прохождении через осадочные породы способствуют миграции в верхний водоносный горизонт газов самого разнообразного состава. Однако проникновение газов и водяных паров на разных участках будет неравномерным, о чем свидетельствует различный характер вариаций тех или иных газохимических параметров, особенно в периоды активизации тектонических процессов.

## Краткие сведения о геохимии ртути и характер вариаций в подземных водах Ташкентского геодинамического полигона

К настоящему времени накопилось достаточно данных по распределению ртути в различных природных объектах, что позволяет высказать некоторые суждения о поведении ее, рассеянии и концентрации.

Ртуть — продукт «глубинного дыхания Земли». Среднее содержание для земной коры, по А. А. Саукову (88), составляет  $7,7 \cdot 10^{-6}\%$ ; кларк ртути в гидросфере — около  $1 \cdot 10^{-6}\%$ . Вероятными источниками ртути и сопутствующих ей рудных компонентов различные исследователи считают интрузивные массивы разного состава, эффузивы кислого, щелочного и основного ряда, вмещающие породы разнообразного состава — от магматических до осадочных, в том числе карбонатные, терригенные и др. Большинство авторов склоняются к мысли о глубинном, может быть даже подкоровом, происхождении ртути. Некоторые исследователи (89) поддерживают предположение о глубинном происхождении значительной части ртути, о миграции паров ртути вдоль зон разломов глубокого заложения. В зонах глубинных разломов, перекрытых более молодыми осадками мощностью 1—3 км, пары ртути, проникая из глубины в верхние слои, создают в почвенном воздухе аномальные концентрации, которые генетически связаны с сейсмоактивными глубинными зонами разломов. Как указывает В. З. Фурсов (90), источником газовых потоков может быть ртуть, возгоняющаяся из пород при повышении температуры в процессе сдвига отдельных блоков. Она мигрирует к поверхности по зонам глубинных разломов как в форме свободных паров, так и в водных растворах. Анализ проведенных исследований в пределах Ташкентской эпицентральной зоны землетрясения 1966 г. позволил В. З. Фурсову (90) прийти к выводу о том, что аномальные концентрации паров ртути колеблются в соответствии с изменением сейсмической активности зон. Тектонические трещины и ослабленные зоны служат надежными каналами для фильтрации паров ртути к поверхности Земли. Как показывают исследования, распределение ртути в горных породах однородно как в твердой, так и в газовой фазе. Это обуславливает относительно малые флуктуации фона, что позволяет выделять аномалии даже небольшой интенсивности.

Результаты режимных наблюдений и работ, проведенных совместно с Институтом ядерной физики АН УзССР по изменению концентрации ртути в подземных водах Ташкентского геодинамического полигона подтвердили ранее высказанное предположение о наличии связи вариаций в содержаниях ртути с происходящими сейсмическими событиями в пределах изучаемого полигона. Среднее содержание ртути составляет по скв. 8 —  $2,27 \cdot 10^{-9}$ , 9 —  $2,42 \cdot 10^{-9}$ , 3 —  $2,31 \cdot 10^{-9}$ , 2 —  $1,28 \cdot 10^{-9}$  г/мл. Амплитуда колебаний в общем изменяется в незначительных пределах — от 0,1 до

$0,2 \cdot 10^{-9}$  г/мл. По большинству скважин аномально высокие значения приходятся на I декаду апреля и июля 1980 г. и составляют соответственно по скв. 8 —  $2,70$  и  $3,10 \cdot 10^{-9}$  г/мл, скв. 3 —  $2,60$  и  $2,70 \cdot 10^{-9}$  г/мл. Эти изменения мы связываем с серией мелких землетрясений местного характера с магнитудой от 3,2 до

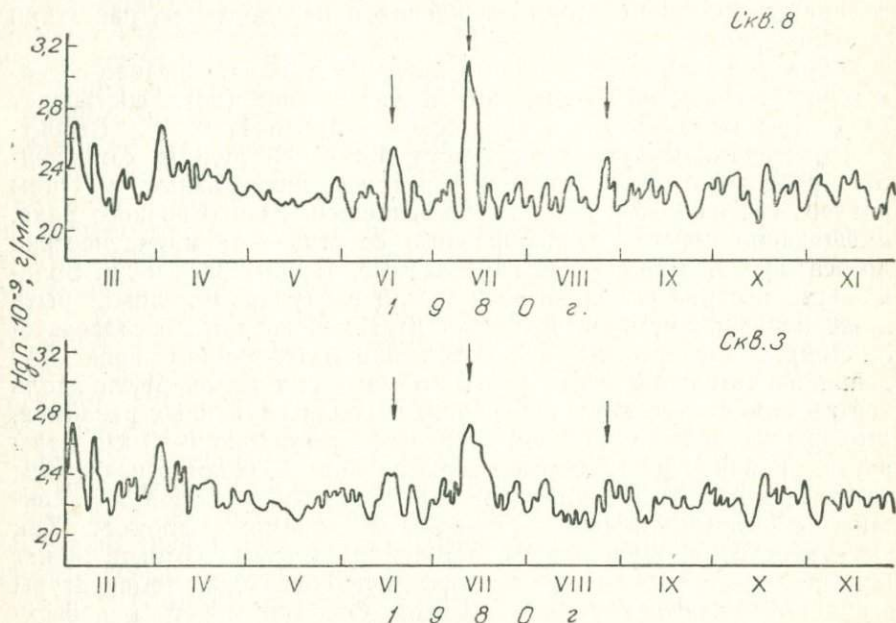


Рис. 11. Вариационные кривые содержания ртути в скв. № 3 и 8.

3,9, происшедших с апреля по июнь 1980 г. в пределах полигона а также с землетрясением в пределах Ферганской долины с магнитудой 5,3 с эффектом в г. Ташкенте 4—5 баллов (рис. 11).

Анализ данных позволяет подтвердить высказанное нами ранее предположение о том, что содержание ртути под влиянием «местных» землетрясений колеблется в зависимости от силы и расстояния землетрясения до эпицентра (27). Изменение максимальных и минимальных величин при «местных» землетрясениях, происшедших на незначительном расстоянии от эпицентра, даже при небольших энергетических классах более ощутимо, чем тех, которые происходят на относительном удалении примерно при тех же энергетических классах.

Таким образом, можно допустить, что поступление ртути в водоносный горизонт обусловлено рядом причин. Перечислим основные: а) взаимодействие ртутьсодержащих минералов и пород с водными растворами; б) интенсивность перехода ртути в раствор и физико-химические условия системы «вода — порода»; в) факторы, стимулирующие извлечение ртути и транспортировку ее

вдоль ослабленных зон разломов. Немаловажную роль играют также резкие перепады давлений в приразломных частях пород, разница температур вблизи разломов, интенсивность тектонических деформаций и другие.

Кратко изложим наши представления о процессах, влияющих на изменение химического состава подземных вод в связи с сейсмичностью. Вода, находящаяся на больших глубинах, играет одну из главных ролей в истории существования и преобразования Земли. В. И. Вернадский (9) неоднократно указывал на необходимость тщательного и глубокого исследования природных вод, изучения процессов, протекающих в земной коре, и связи химического и газового состава вод с физико-химическими процессами, происходящими в водосодержащих горных породах. Известно, что периоды тектонической активности земной коры нарушают установившиеся гидрогеохимические, гидрогеологические и другие виды природных равновесий в геологических структурах и создают благоприятные условия для миграции многих газовых и химических компонентов в водной среде. Изменения режима подземных вод, происходящие в результате накопления напряжений в области очага, развиваются в течение длительного времени. Рост упругих напряжений перед землетрясением сказывается на изменении физико-химического, в том числе микрокомпонентного, состава подземных вод, формирующихся на больших глубинах. Прежде всего, это изменение физико-химических процессов в гипоцентральной области и поступление по развивающимся трещинам под действием возрастающих давлений, насыщенных газами и обогащенных различными компонентами вод (флюидов). Эти процессы настолько интенсивны, что в некоторых случаях в водоносных горизонтах вместе с водой начинает двигаться и твердая фаза — песок, т. е. происходит перенос и переотложение породы в подземных условиях, а в таком состоянии породы могут находиться относительно длительное время.

Существенную роль при этом играет взвешивающее гидродинамическое давление воды на частицы породы (92).

Повышение давления и температуры в момент разрядки накопившихся упругих напряжений приводит к приобретению водой и водными растворами новых свойств — повышенной агрессивности по отношению к вмещающим породам, способности прочнее удерживать в своем составе растворенное вещество.

Исходя из представлений (93) о роли скачкообразных нарушений структурного состояния воды, можно предположить, что в период тектонической активности региона, когда произойдет наложение тектонических напряжений на гидростатическое давление, скачкообразно изменится структура воды, она из связанного состояния перейдет в свободное. Может случиться так, что тектонического напряжения будет недостаточно для перевода пород в пластическое состояние. При этом их трещиноватость возрастет, а отжатые частицы воды не смогут покинуть разрушающий мас-

сив. Очевидно, это произойдет при одностороннем сжатии массива. При неравномерном и всестороннем сжатии породы приобретает пластические свойства и тогда создаются благоприятные условия для возникновения в породах направленного потока вод. Глубина формирования направленных потоков зависит от мощности пород, температуры среды формирования потоков, глубины проявления тектонических усилий, которые создают всестороннее неравномерное сжатие.

Как отмечает А. М. Блох (93), из 1 км<sup>3</sup> пород с содержанием всего 2% связанной воды будет высвободиться 10 млн<sup>3</sup> воды, обладающей высокой агрессивной способностью. Воды эти обладают аномальными свойствами, приобретают способность к интенсивному выщелачиванию пород на путях ее движения и обогащению различными микроэлементами и газовыми составляющими. Эти глубинные воды, поднимаясь по ослабленным зонам в более высокие горизонты земной коры, смешиваются с пластовыми и в момент смешения, как указывает А. М. Блох (93), их структура претерпевает новый скачок, который будет сопровождаться появлением в составе других компонентов, ранее присутствовавших в пластовых водах.

Миграция водных растворов и газов обуславливается многими факторами. Главные из них (27): 1) интенсивная тектоническая нарушенность пород, в результате которой происходит вертикальная миграция водных растворов и газовых компонентов; 2) гидродинамический напор подземных вод, залегающих на больших глубинах; 3) упругие колебания, под действием которых из горных пород выделяются не только газы, но и химические элементы, входящие в состав горной породы. Степень же обогащения водной фазы тем или иным химическим элементом зависит от формы нахождения и характера распространения его в горной породе и в зависимости от характера связи (слабой или прочной) химических элементов с горной породой степень перехода их в водную фазу будет различной; 4) термодинамическая обстановка, определяющая переход многих микроэлементов в подземные воды. При этом температура влияет, во-первых, на растворяющую способность пород, содержащих комплекс микроэлементов, и поступление их в водный раствор, во-вторых, — на переход многих из них из жидкой фазы в газовую; 5) смешивание и разбавление подземных вод вышележащих водоносных горизонтов с водами глубокой циркуляции. Этот процесс происходит по зонам разломов и трещин, активизировавшихся в периоды, предшествующие и сопутствующие землетрясениям.

Таким образом, можно отметить, что накануне всех сильных землетрясений, происшедших на территории Средней Азии за период наблюдений, отмечались аномальные изменения в содержании таких газохимических компонентов, как гелий, углекислый газ, молекулярный водород, азот, фтор, бор, хлор и др., а также величины концентрации водородных ионов и окислительно-восста-

новительного потенциала. Обработка многолетних систематических режимных наблюдений за изменениями газохимического состава подземных вод подтверждает вывод, сделанный нами ранее (27), что период подготовки далеких «транзитных» землетрясений высокого энергетического класса (13—16) характеризуется длинно-периодными (до 0,5 года) скачкообразными вариациями в содержании гелия, углекислого газа, водорода и азота, фтора, хлора, бора, особенно если несколько сильных толчков следуют один за другим. Основная закономерность — возрастание времени проявления предвестников с ростом энергии землетрясения и снижением длительности аномальных изменений с увеличением эпицентрального расстояния. Кроме того, сильным местным землетрясениям (например Таваксайское 1977 г.) или серии слабых в течение короткого промежутка времени предшествуют более резко выраженные аномальные проявления и формирование бухтообразных пониженных или повышенных значений на фоне флуктуаций, обусловленных физико-химическими процессами насыщения вод газовыми и микрокомпонентами. Наиболее характерные предвестники местных землетрясений — это молекулярный водород, изменение величины окислительно-восстановительного потенциала и хлора.

Общий химический состав подземных вод (величина общей минерализации, анионный и катионный состав) в многолетнем разрезе почти не изменяется. Периоды подготовки сильных землетрясений характеризуются преимущественно длиннопериодными вариациями (почти 6 мес.).

Содержание хлора и минерализация подземных вод в многолетнем разрезе по скв. Улугбек также не изменяются, что свидетельствует о продолжающемся действии возродившихся в результате Ташкентского землетрясения 1966 г. разломов, по которым поступают нижележащие палеозойские, хлоридные по составу воды в вышележащий водоносный горизонт.

Проведенные многолетние исследования по изучению вариаций микрокомпонентов (фтор, бор, хлор и др.) в подземных водах сейсмоактивных районов позволяют сделать вывод о том, что периоды тектонической активности земной коры нарушают установившиеся гидродинамические, гидрогеохимические и другие виды природных равновесий в геологических структурах. Это, прежде всего, изменение физико-химических процессов в зоне подготовки землетрясения и поступление по развивающимся трещинам под действием возрастающих давлений насыщенных газами и обогащенных различными компонентами вод (флюидов). Особенно интенсивным будет выщелачивание пород, содержащих различные элементы, водами, перешедшими из связанного состояния в свободное.

Результаты статистической обработки изменения во времени газохимических параметров с применением спектрально-временного и дискриминантного анализа подтвердили отчетливую связь

низкочастотных изменений в концентрации газов с периодами повышенной сейсмичности. Обнаружена связь аномальных проявлений в газовом составе с отдельными землетрясениями. Качество предсказания оценивается величинами (0,53; 0,82; 0,097).

Систематические режимные наблюдения за вариациями газохимических параметров позволили установить связь выявленных аномалий с энергией землетрясений и обнаружить тесную зависимость времени их проявления от эпицентрального расстояния. Линейная зависимость, выраженная формулой  $\lg RT = 0,63 M + +0,15$  с коэффициентом корреляции 0,97, свидетельствует о том, что наблюдаемые аномалии тесно связаны с процессами подготовки землетрясений и при наличии режимной сети наблюдения на территории сейсмоактивных районов могут быть использованы для прогноза времени и силы землетрясений.

## ГИДРОГЕОФИЗИЧЕСКИЕ ПРЕДВЕСТНИКИ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

### Глава III

#### РЕЗУЛЬТАТЫ ГИДРОГЕОДИНАМИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ НА ТАШКЕНТСКОМ ГЕОДИНАМИЧЕСКОМ ПОЛИГОНЕ

Воздействие землетрясения на расход, температуру источников известно с давних времен. Один из великих ученых Востока Абу Райхан Беруни в своем трактате упоминал о природе самоизливающихся колодцев, связывая их с землетрясениями.

Во время многих сильных землетрясений наблюдались изменения расходов источников и колодцев, появление новых, прекращение действующих и т. д. (94).

В литературе (94, 26) имеются многочисленные ссылки на гидродинамические эффекты, обусловленные активизацией тектонических движений. Например, изменение уровней подземных вод при катастрофических землетрясениях на Аляске 27 марта 1969 г. отмечено на всей территории американского континента почти в 5 тыс. км от эпицентра.

Изменение уровня воды в артезианских скважинах отмечено на значительных расстояниях от эпицентра Калифорнийского землетрясения. В результате Лиссабонского землетрясения 1755 г. существенно нарушился режим источников подземных вод в Чехословакии и Франции. Известны связи тектонических землетрясений с извержениями гейзеров (Исландия, США).

На территории СССР также наблюдались многочисленные эффекты. Например, во время Красноводского землетрясения 27 июня 1875 г. в большинстве источников увеличились дебиты, на одном месте (ст. Михайловское) образовались воронкообразные трещины, из которых вырывались насыщенные сероводородом горячие воды. При Андижанском землетрясении 3 декабря 1902 г. в кишлаках Паласан, Каракалкан, Ярчиарык вода фонтанировала из трещин, повышался ее уровень в арыках и т. д.

При таких катастрофических землетрясениях, как Хаитское (1949), Гоби-Алтайское (1957) отмечалось появление новых водоемов. После землетрясения 2 марта 1966 г. на Северо-Восточном Кавказе (с. Советское) возникли крупные источники, а южнее стали действовать сероводородно-радоновые (95).

Гидродинамическими эффектами сопровождалось известные Ташкентское (26 апреля 1966 г.), Дагестанское (14 мая 1970 г.), Газлийское (17 мая 1976 г.) землетрясения (96, 97).

В настоящее время в связи с расширением поисков предвестников землетрясений систематические наблюдения за уровнем подземных вод и изменением пластового давления проводятся в сейсмических районах Советского Союза. Интересные результаты получены в Сахалино-Курильском сейсмоактивном регионе (98, 99). Установлено, что гидродинамические эффекты генетически связаны с упругой деформацией земной коры, возникающей в результате роста напряжений в недрах земли накануне сейсмического толчка.

На Ташкентском полигоне гидродинамические наблюдения с целью поисков эффектов, связанных с землетрясениями, частично были начаты во время афтершоков Ташкентского землетрясения 26 апреля 1966 г. (100). Обнаружено некоторое изменение величины затрубного давления на скв. Парк Победы перед сильными афтершоками.

Систематические наблюдения за режимом пластового давления мелового водоносного горизонта Приташкентского артезианского бассейна нами ведутся с 1976 г. Этот бассейн приурочен к предгорной синклинали депрессии, ограниченной на востоке предгорьем Казыкурт, на севере (условно) — возвышенностями Боганали, Мансурата, Алимтау и Каратау, на западе — Кызылкумским артезианским бассейном, на юге — зоной выклинивания меловых отложений вблизи Мехнаткаш-Писталитауского кряжа.

Современные структуры Приташкентского артезианского бассейна — результат многофазных тектонических движений, но современный облик территории района создан альпийской складчатостью. Основные хребты — Кураминский, Чаткальский, Пскемский, Угамский, Каржантауский и их отроги представляют собой крупные антиклинальные структуры, сложенные в ядре палеозойскими образованиями, для многих из них характерны глыбовые структуры. Долины Ангрэн, Чирчик, Келес в верхнем и среднем течении являются крупными тектоническими межгорными синклинальными депрессиями, а их равнинная часть — огромной предгорной впадиной, сложенной мезо-кайнозойскими образованиями, покоящимися на палеозойском складчатом фундаменте. Местами эти структуры осложнены положительными антиклинальными складками типа Пскентской, Ишанкурганской и др. Иное тектоническое строение имеет район Приташкентских чулей, сложенный мощной толщей меловой и третичной системы, где образования палеозоя из-под этого покрова выступают лишь в виде отдельных островков, между которыми расположены синклинали структуры.

Многообразие тектонических структур района определяет разнообразие гидрогеологических условий. Главные антиклинальные структуры (горная зона) — преимущественно районы трещинных, трещинно-карстовых грунтовых вод палеозойских отложений. В синклинали-долинных и предгорных равнинных частях распространены пресные напорные воды в четвертичных отложениях,

преимущественно солоноватые и соленые воды в отложениях неогена, палеогена, нижнего мела и юры, а также пресные минеральные термальные воды в отложениях верхнего мела. Горизонт термально-минеральных вод в отложениях мела вскрыт в 1948 г. в районе Ишанкурганской структуры. Он приурочен к переслаивающимся толщам песчаников, песков и глин среднечанакской свиты сеномана.

Впоследствии термальная минеральная вода этого горизонта была вскрыта еще несколькими десятками скважин в интервале глубин 810—1250 м в долине Келес (Сарыагач, Ишанкурган, Капланбек, п. Черняевка и др.), до 1550—2400 м на территории г. Ташкента, пос. Кибрай и в других местах.

Физико-химические свойства воды этого горизонта изучены достаточно детально. Температура варьирует от 17 до 70°C, что обусловлено различной глубиной залегания напорных вод. Первоначальный пьезометрический уровень — 10—30 м над поверхностью земли в районе Чулей (область преимущественного формирования), в районе Сарыагач и Ишанкурган 129—175 м, в центральной части бассейна (г. Ташкент) он достигал максимума — 195 м.

Основная область питания меловых вод — выходы меловых отложений на дневную поверхность (северо-восточная часть бассейна). При этом следует учитывать значительную роль вод палеозойских образований, переливающихся в пески и песчаники мела, особенно в приразломных участках.

Гидрогеодинамические условия бассейна специально не исследовались. С помощью схемы гидроизопьез установлено (101) общее направление меловых вод для Приташкентского бассейна с северо-востока на юго-запад. В результате применения радиогидрогеологических и изотопных методов исследования определены скорости подземных вод мелового горизонта. В краевых частях бассейна скорость движения больше (до 10 см/год), чем в центре (территория г. Ташкента), где наблюдается самое низкое значение скорости движения воды (1 см/год), что говорит об очень замедленном здесь водообмене.

Гидродинамический режим подземных вод Приташкентского артезианского бассейна регулярно изучается на участках, где вода используется для тех или иных целей. Величину трубного и затрубного давлений (а также температуру, дебит) четырех скважин (скв. ДВС, парк Победы, Луначарское, Улугбек) с помощью установленных на устьях скважин образцовых манометров мы определяли ежедневно. Выявлено, что везде постепенно снижаются пьезометрические уровни (пластовое давление), обусловленные сработкой статических и упругих запасов водоносного горизонта в результате длительной эксплуатации. Одновременно значительное снижение наблюдается в дебите скважин. Ниже приводим изменение физических параметров во времени ташкентских минеральных вод. Величины затрубного давления и дебита со времени бурения скважин значительно (расход примерно в два раза) сни-

зились, что наблюдается по всему бассейну. Сказанное свидетельствует об ограниченном запасе термоминеральных вод, высокий темп эксплуатации может привести в ближайшее время к истощению их запасов, а также к ухудшению качества воды. Поэтому возникает необходимость строгого соблюдения рационального режима эксплуатации скважин.

Скважина	Начало эксплуата- ции	Затрубное давление		Дебит л/с		Температура, Т°	
		1965	1980	1965	1980	1965	1980
2 Победа	1956	11,6	4,54	3,6	2,27	51,2	46,3
5 Ташминводы	1961	9,05	3,78	5,30	3,48	57,3	55,2
7 Сан. Чинабад- ский	1963	10,3	2,96	4,5	2,14	54	50,8
9 Пос. Улугбек	1960	7,02	1,46	3,54	—	62	22,3
10 Санаторий „Ботаника“	1964	1,1	—	1,23	0,42	48,5	31,7

Примечание. Сква. 9 пос. Улугбек в 1975 г. законсервирована; наблюдения ведутся за напором.

Результаты анализа гидродинамических исследований показывают, что во всех эксплуатационных скважинах величина затрубного давления сильно колеблется, что обусловлено их эксплуатацией. На фоне этих колебаний невозможно выделить изменения, связанные с другими процессами.

Вариации величины затрубного давления, связанные с эксплуатацией подземных вод, частично исключены на скв. 9, пробуренной в 1960 г. Глубина водоносного горизонта — 1650÷1817 м. Установлено, что первоначальный максимальный дебит 5 л/сек, а величина затрубного давления 9 атм. Скважина до августа 1975 г. эксплуатировалась на полную мощность. К этому времени дебит снизился до 1,8 л/сек, а затрубное давление — до 2,5 атм. В августе 1975 г. скважина была передана Институту сейсмологии для гидрогеосейсмологических исследований и с этого момента находится в строго стабильном режиме. Несмотря на прекращение эксплуатации скважин, наблюдается постепенное снижение затрубного (избыточного) давления, что, видимо, связано с эксплуатацией водоносного горизонта по всему артезианскому бассейну. С 1976 г. начали тщательно измерять избыточное давление образцовым манометром. На фоне общего падения давления отмечены места резких отклонений, что более четко выражено в градиентах (скоростях изменения) давления (102). Как правило, наиболее резкие отклонения от нормального режима наблюдаются во время активизации тектонических движений, которые можно использовать в качестве предвестника землетрясений.

Еще Б. Голицын высказал мысль о существовании тесной связи между землетрясением и режимом источников и возможности использования этой связи для предсказания землетрясений.

Связь гидродинамических параметров (пластовое давление, уровень подземных вод) с землетрясением осуществляется через

деформацию земной коры (64) в процессе подготовки землетрясения. Очаг землетрясения — это область, от размеров которой зависит величина землетрясения. В период подготовки землетрясения очаговая область испытывает необратимую деформацию с величиной  $10^{-4}$  и более. Естественно, эта деформация распространяется в окружающие породы, затухает с удалением от очага и примерно на расстоянии, в 20 раз превышающем размер очага, становится соизмеримой с величиной деформации лунно-солнечных приливов, т. е.  $10^{-8}$ .

В работе (99) приведены результаты одновременной регистрации деформации земной коры и уровня подземных вод в скважинах

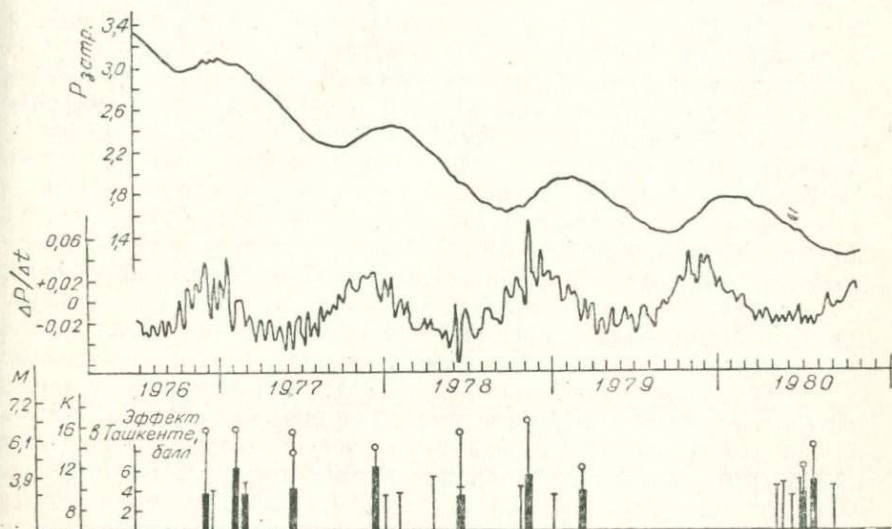


Рис. 12. График вариации значений затрубного давления и его градиента по скважине "Улугбек".

Сахалино-Курильского сейсмоактивного региона. Перед землетрясением наблюдаются резкие изменения деформации и колебания уровня воды в некоторых скважинах. Сопоставление двух величин свидетельствует об их генетической взаимосвязи.

Гидродинамические наблюдения на Ташкентском геодинамическом полигоне за прошедшие годы (1962—1975) показывают значительные колебания величины избыточного давления в результате интенсивной эксплуатации скважин. За 13 лет давление в затрубье скважины 9 снизилось на 4 атм, причем это снижение неравномерное. С 1976 г., когда скважина поставлена на строгий стабильный режим, в величинах затрубного давления резких колебаний не наблюдается (рис. 12). Прослеживается постепенное снижение с явно выраженным сезонным режимом. Для анализа

хода изменения величины давления целесообразно рассмотреть величину градиента давления, которая характеризует скорости вариации его во времени (102). В отдельные периоды, обычно во время сильных тектонических движений, скорость достигает максимальной величины (рис. 13, а). Кроме того, наблюдаются периодические сезонные колебания. Для выявления прогностических признаков в изменениях величины избыточного давления мы исключили периодические колебания. Периодические составляющие определены путем механического сглаживания. На рис. 13, б

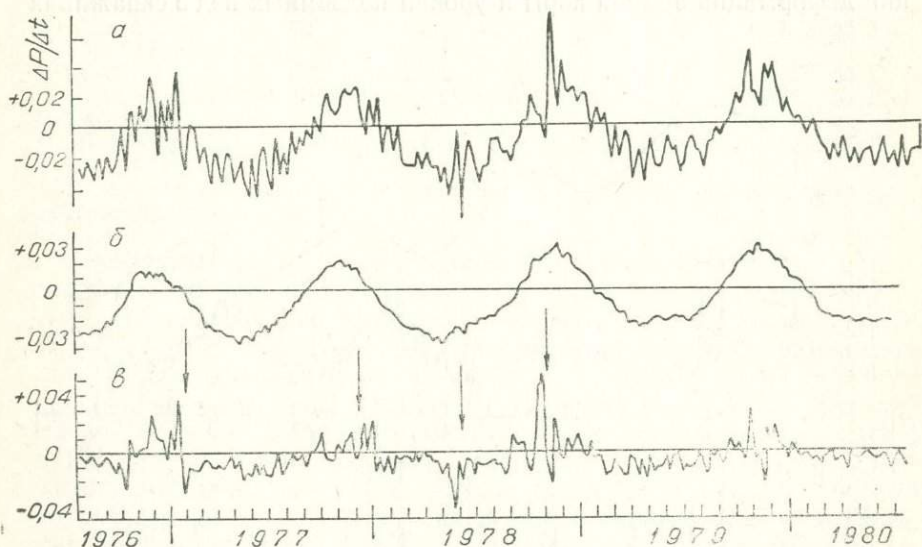


Рис. 13. Гидродинамические предвестники сильных землетрясений (скв. Улугбек).

приведены значения скользящего среднего значения градиента по 7 точкам (7 суток) с июня 1976 по октябрь 1980 г., которые характеризуют среднее значение колебания изучаемого параметра, а 13, в — данные вариации величины градиента давления с учетом сезонных колебаний.

Таким образом, наглядно представлены аномалии, которые связаны с подготовкой сильных землетрясений. В 1976—1980 гг. на территории Средней Азии произошло значительное количество землетрясений с различными эффектами на Ташкентском геодинамическом полигоне. Гидродинамические аномалии, наблюдаемые на скв. 9, обусловлены наиболее сильными из них. Это Исфара-Баткенское (1977), Таваксайское (1977), Газлийское (1976), Алайское (1978) землетрясения. Их магнитуды и эпицентральные расстояния позволяют предположить (64), что деформация земной

коры от напряжений, вызванных их подготовкой, может распространяться на территории, в пределах которой находятся наши наблюдательные пункты. Остальные землетрясения (рис. 12) или очень слабые, или произошли на значительном удалении от наблюдательных скважин, поэтому их эффекты на изучаемом параметре отсутствуют или заметны очень слабо.

Исфара-Баткенское землетрясение произошло 31 января 1977 г., магнитуда его 6,3, эпицентральное расстояние 210 км. В гидродинамической аномалии, связанной с подготовкой этого землетрясения, отмечено довольно значительное увеличение величины градиента давления накануне основного толчка. За 6—7 месяцев до землетрясения в значениях градиента давления наблюдались резкие колебания, считать их результатом подготовки только Исфара-Баткенского землетрясения нельзя, так как в это время в пределах региона ощущалось несколько слабых землетрясений и возможно их влияние на градиент давления.

Во время Таваксайского землетрясения в декабре 1977 г. наряду с другими гидрогеохимическими эффектами наблюдались и гидродинамические аномалии. Если в период Таваксайского землетрясения величина градиента несколько увеличилась, то накануне сейсмического толчка в Газлийском районе отмечалось значительное ее падение. Причина, видимо, в том, что действуют упругие колебания на водоносный горизонт на том участке, где расположена скважина. Вообще величина затрубного давления скважин, а также градиент должны повышаться, если водоносный горизонт подвергается действию сжимающих напряжений, и снижаться при воздействии растягивающих. То или иное действие, вероятно, зависит от геолого-тектонических и структурных условий расположения объектов исследований в отношении места готовящихся землетрясений, а также механизма очага. Классическим примером следствия растягивающихся сил может служить наблюдение в районе Букантауского горного массива, северо-восточные эпицентров Газлийских землетрясений (103). Во время опытных гидрогеологических работ в одной из пробуренных в этом районе скважин наблюдалось снижение уровня подземной воды, через некоторое время она исчезла. Это произошло за 12 часов до известного Газлийского землетрясения 17 мая 1976 г. с магнитудой 7,3 и эффектом в эпицентре 10 баллов. Примерно через 26 часов после основного толчка снова появилась вода и через двое суток уровень ее восстановился.

1 ноября 1978 г. в 01 час. 08 мин. на территории Алайской долины произошло сильное землетрясение. Оно ощущалось во всех городах Средней Азии, в том числе в Андижане силой 6 баллов, Ташкенте — 5—6. Магнитуда основного толчка около 7, сила в эпицентре 8—9 баллов, глубина очага 20—25 км.

Значительные гидрогеохимические, гидрогеофизические и геофизические эффекты, наблюдающиеся на Ферганском и Ташкентском геодинамических полигонах накануне основного толчка,

позволили предсказать примерное время и место возникновения этого землетрясения (104, 105).

Деформация горных пород, связанная с подготовкой Алайского землетрясения 2 ноября 1978 г. с магнитудой 7 и размером очага 30 км (64), вполне может быть причиной многочисленных гидрогеохимических аномалий на Ташкентском геодинамическом полигоне. Наряду с другими параметрами заметно изменились гидродинамические характеристики подземных вод. В период подготовки Алайского землетрясения в начале октября постепенно увеличилось давление, резко обострившееся за день до основных толчков. Рост величины затрубного давления после основного толчка, по видимому, — результат динамических волн этого землетрясения и его многочисленных афтершоков. Подобное явление отмечалось и после Ташкентского землетрясения 1966 г. (97).

Результаты проведенных исследований свидетельствуют о наличии тесной связи между гидродинамическими параметрами подземных вод и сейсмическими явлениями, которая объясняется и на основе современных предпосылок об очаге землетрясений.

Таким образом, система пластового давления и деформирование — чувткие индикаторы напряженного состояния горных пород. Амплитуда наблюдаемых аномалий в зависимости от дальности эпицентра и величины магнитуды может быть различной. Гидродинамические эффекты в свою очередь являются причиной геохимических аномалий, в том числе радоновых, так как изменение величины пластового давления может нарушать равновесие системы «порода — вода» и тем самым процессы выделения адсорбированных элементов из пород в воду. В условиях Ташкентского геодинамического полигона мы установили некоторую корреляционную связь между давлением в скважине и концентрацией эманации радона.

#### Глава IV

##### НЕКОТОРЫЕ КОЛИЧЕСТВЕННЫЕ ЗАВИСИМОСТИ ВАРИАЦИИ СОДЕРЖАНИЯ РАДОНА ОТ ПАРАМЕТРОВ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ РАДОН — ПРЕДВЕСТНИК ТЕКТОНИЧЕСКИХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

Одним из первых научных сообщений о возможности прогноза времени возникновения землетрясений явилось сообщение об изменениях содержания радона в периоды, предшествующие и сопутствующие сильным тектоническим землетрясениям (106). Изменение содержания радона обнаружено на скв. 2 Парк Победы, расположенной вблизи плейстосейстовой области Ташкентского землетрясения 26 апреля 1966 г. В последующем такие же эффекты наблюдались во время многих землетрясений в различных районах Средней Азии и других регионов.

Следует отметить, что аномалии в содержаниях радона в период подготовки землетрясений отмечались как непосредственно в эпицентральных районах, так и на значительных расстояниях

от очага землетрясений. Характер аномалий различный (рис. 14, 15). Амплитуда времени проявления аномалий зависит от параметров (магнитуда, эпицентрального расстояние и т. д.) землетря-

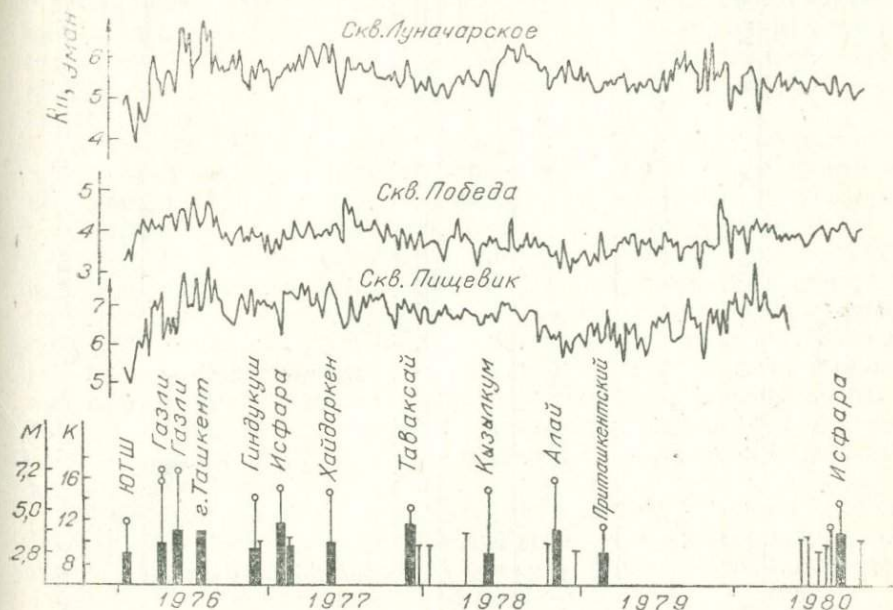


Рис. 14. Вариации содержания радона на Ташкентском геодинамическом полигоне (по данным дискретного анализа).

сений. Аномалия имеет и положительное, и отрицательное значение. Все это свидетельствует о том, что радон может служить надежным предвестником тектонических землетрясений.

### Результаты изучения вариации радона

Вариации радона изучались в основном на Ташкентском геодинамическом полигоне.

Из трех скважин (2, 3, 8) ежедневно отбирались пробы на дискретный анализ. Анализы выполнялись на радиометре «Альфа-1». (рис. 14). Как сказано выше, все три скважины эксплуатируются различными организациями, в результате чего естественный режим водоносного горизонта на этих участках сильно нарушен. Поэтому и газохимический, в том числе радоновый, режим этих вод сильно колеблется. Следует отметить, что одноразовым анализом радона нельзя полностью изучить все особенности его суточных или сезонных вариаций. Известно, что содержание радона зависит от многих факторов, связанных с эксплуатацией подземных вод, атмосферными явлениями и др. Кроме того, на резуль-

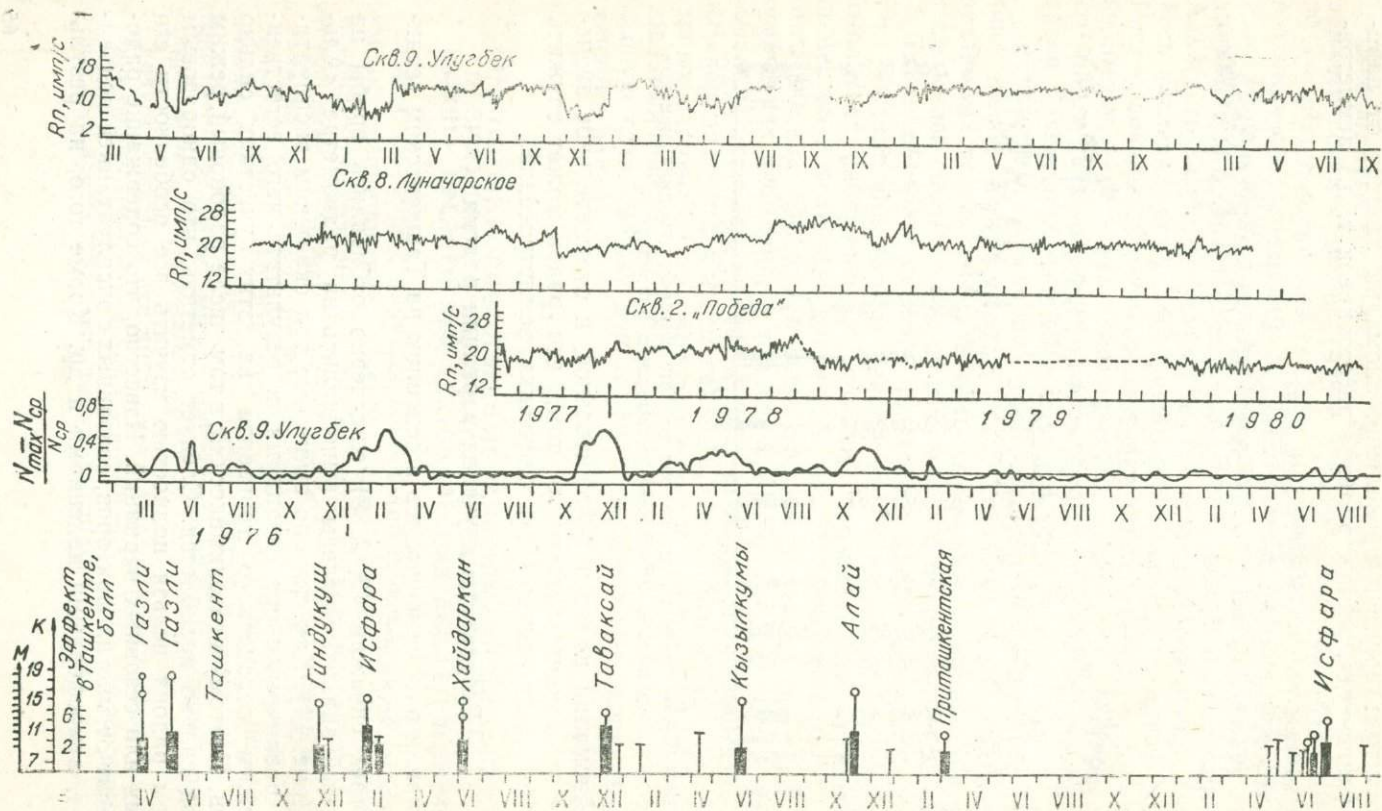


Рис. 15. Вариации содержания радона на Ташкентском геодинимическом полигоне (по данным непрерывной регистрации).

таты определения радона накладываются ошибки операторов, пробоотборщиков, неисправности аппаратуры и т. д. Иногда становится невозможным выделить полезные сигналы, связанные с землетрясениями. Несмотря на это в результате дискретных анализов определены абсолютные средние содержания радона по скважинам Ташкентского геодинамического полигона. Среднее содержание радона на скв. 3 составляет 5—6 эман., скв. 2 — 3—4, скв. 8 — 6—7.

В течение 1976—1980 гг. в содержаниях радона выделяются аномальные значения в период подготовки таких сильных землетрясений, как Газлийское (8 апреля и 17 мая 1976 г.), Исфара-Баткенское (31 января 1977 г.), Таваксайское (6 декабря 1977 г.), Алайское (1 ноября 1976 г.). Например, в периоды, предшествующие Газлийским землетрясениям, по данным дискретных анализов на скважинах Луначарское и Пищевик содержание радона заметно росло, незадолго до основных толчков наблюдалось некоторое его снижение (рис. 14). В водах скважины Парк Победы изменение содержания радона незаметно. Вообще в течение 1976—1980 гг. вариации содержания радона в водах этой скважины были незаметны и дискретными анализами невозможно было выделить аномальные значения.

Исфара-Баткенское землетрясение отличается общим снижением радона. Более заметно содержание его изменяется на скважине Луначарское во время Алайского землетрясения 2 ноября 1978 г.

С июня количество радона повышается, примерно с октября оно начинает падать, перед толчком заметно некоторое повышение.

По скважине Пищевик рост содержания радона не заметен, как на скважине «Луначарское», но отмечается снижение перед толчком.

С применением автоматической установки стало возможно получать непрерывную информацию о вариации радона на наблюдательных пунктах, избавиться от некоторых субъективных факторов, влияющих на результаты измерения.

Приборы по непрерывной записи содержания радона установлены на трех скважинах: 9 Улугбек, 8 Луначарское и 2 Парк Победы. Определены средние значения вариации содержания радона по всем наблюдательным скважинам (рис. 15). Естественное отклонение содержания радона от многолетних средних его значений не превышает 6—8%. Такое отклонение, вероятно, свойственно подземным водам глубоких горизонтов.

Выявить какие-нибудь закономерности связи этих вариаций с лунноприливными или другими атмосферными явлениями не удается (107).

Воды скважин, где ведутся наблюдения, интенсивно эксплуатируются и этим сильно нарушается естественный режим. Поэтому величины физических параметров (температура, пластовое дав-

ление, радон) сильно колеблются. На фоне этих колебаний очень трудно различать аномалии, связанные с землетрясениями, за исключением скважины Улугбек, которая с 1976 г. передана в распоряжение Института сейсмологии и с этого времени находится в строго стабильном режиме. В результате исключено возможное влияние на изменение изучаемых гидрогеосейсмологических параметров факторов неравномерной эксплуатации воды. Поэтому при измерении содержания радона по скважине четко выделяются аномалии, связанные с глубинными процессами. Особенно четкие

Таблица 4

**Зависимость величины аномалий радона от параметров землетрясений**

Землетрясение, дата основного толчка	Параметры землетрясений			Параметры аномалий		
	эпицентральное расстояние, км	магнитуда, м	энерг. класс, К	дата начала аномалии	длительн. аномалии, сут.	амплитуда отн. фонов. значения
Газлийское 17.V-1976	485	7,3	17	10.IV—1976	37	0,35
Исфара-Баткенское 31.I-1977	210	6,3	16	8.VII—1976	54	0,4
Таваксайское 6.XII-1977	25	5,3	13,5	24.X—1977	45	0,65
Алайское 2.X-1978	350	6,8	16	27.VIII	65	0,45

аномалии наблюдались в периоды сильных активизаций тектонических движений, связанных с Газлийскими (8 апреля и 17 мая 1976 г.), Исфара-Баткенским (31 января 1977 г.), Таваксайским (6 декабря 1977 г.), Алайским (1 ноября 1978 г.) землетрясениями.

Если предположить, что в основе всех предвестников землетрясения лежат деформация земной коры и связанные с этим процессом другие вторичные явления, возникающие вследствие напряжений, порождаемых подготовкой сейсмического события, выявленные нами аномалии в поведении радона подземных вод вполне согласуются с точкой зрения В. И. Уломова (64) о распространении деформации, предшествующей основным толчкам (табл. 4).

Длительность и амплитуда наблюдаемых аномалий тесно связаны с энергией и величиной эпицентрального расстояния, корреляционная зависимость которых рассмотрена ниже.

Приведенные в таблице землетрясения — наиболее прогнозируемые нашими наблюдательными пунктами. Скважины удалены от эпицентров этих землетрясений на расстояние меньшее в 10 раз, чем размер очагов. Поэтому с точки зрения (64) на этих наблюдательных точках может проявляться значительная деформация земной коры, обусловленная подготовкой землетрясений.

Кроме рассмотренных, обнаружены аномальные значения радона, связанные с далекими сильными и местными слабыми землетрясениями (см. рис. 15). К таким можно отнести аномалии, приуроченные к землетрясениям в Кызылкумах (4 июля 1978 г. с М-5,8), в Исфаринском (11 июля 1980 г. с М-5,3) и Приташкентском районах (9 апреля 1978 г. с М-3,8 16 июля 1980 г. М-30, 23 июля 1980 г. с М-4). Следует отметить, что перечисленные аномалии проявляются не очень четко, но они заметны среди фоновых значений радона. Это обстоятельство иногда затрудняло правильную интерпретацию полученных данных.

1979 г. в сейсмическом отношении был сравнительно спокойным (для Ташкентского геодинимического полигона). Вариации радона в этом году тоже были без резких изменений. В 1980 г. в Приташкентском районе активизируются тектонические движения. В связи с этим содержание радона резко колеблется.

Следует отметить, что большинство наблюдаемых аномалий имеет «бухтообразную» форму, размеры (длительность проявления) их прямо пропорциональны энергии возникших землетрясений. Обычно они отрицательные, кроме одной аномалии, наблюдаемой на скважине Луначарское во время Алайского землетрясения 1 ноября 1978 г.

Для выявления закономерностей поведения радона (и не только радона), связанных с геолого-тектонической и гидрогеологической обстановкой района расположения наблюдательных точек, необходимы специальные исследования, которые дадут возможность правильно интерпретировать ложные аномалии.

Проведенные исследования в эпицентральных районах ряда сильных землетрясений показывают, что содержание радона во время интенсивных повторных толчков резко изменяется. После основного толчка (видимо, и до землетрясения), количество его обычно повышено, затем постепенно снижается. Во время афтершоков наблюдается сильное колебание, связанное с накоплением напряжения перед ними и динамическими волнами многочисленных сотрясений, например, в период Газлийского землетрясения. Такое же поведение радона зафиксировано во время афтершоков известного Ташкентского землетрясения 1966 г. (97).

### Природа наблюдаемых аномалий в содержаниях радона

Как было сказано, аномалия радона, а также других гидрогеохимических параметров в периоды активизации тектонических движений обнаружена во многих регионах. Во всех работах, посвященных этой проблеме, содержатся сведения о возможных причинах данного явления. Для объяснения этого эффекта привлекались различные модели, в то же время по мере накопления данных появляется возможность определения несоответствия теоретической модели фактической картине.

В работе В. И. Уломова и Б. З. Мавашева (106), посвященной изменениям содержания радона во время Ташкентского землетрясения, наблюдаемые аномалии связываются с определенными этапами деформирования горных пород в процессе подготовки землетрясения. Первый этап отражает вековые деформации земной коры. Следующие два начинаются примерно за год до землетрясения, охватывают стадии аномальной упругой деформации и вязкого течения пород в области будущего очага и относятся к прогностическим. Они завершаются резким сдвигом пород — землетрясением. Четвертый этап характеризуется максимальным снятием упругих напряжений в области очага, он относится к периоду афтершоков землетрясений. Образование аномалий радона в подземных водах в результате землетрясений связывают с процессом «выжимания» радоновых вод из пород приочаговой области. Эта точка зрения на механизм образования аномалий радона в подземных водах При-ташкентского бассейна в принципе не противоречит физическим процессам, протекающим в массиве горных пород приочаговой области при подготовке будущего очага землетрясения, однако с ее позиции трудно объяснить наблюдаемые временные несоответствия между периодом полураспада радона и характером изменения концентрации его в водах до и после землетрясения.

Кратко рассмотрим эти несоответствия, наблюдаемые в период Ташкентского землетрясения.

По данным сейсмических наблюдений, очаг основного толчка Ташкентского землетрясения находится на глубине около 8 км. Забой скважины, из которой анализировались пробы воды, имеет абсолютную отметку около 1,5 км. Если допустить, что объем пород, из которых «выжимались» радоновые воды, заключен в сфере радиусом 4—5 км (область наибольшей деформации пород), то расстояние от источника обогащения вод радоном до забоя скважины составляет 1,5—2,5 км. Принимая во внимание небольшой период полураспада радона (3,825 дня), трудно предположить, что образование положительной аномалии радона в ташкентских минеральных водах связано с медленно протекающим процессом поступления обогащенных радоном вод из глубокозалегающих пород приочаговой области.

Из теории обогащения подземных вод радоном известно, что при движении вод сначала по активным (источник радона), а затем неактивным породам, концентрация радона в них подчиняется следующей математической зависимости, по В. И. Баранову:

$$Q = \frac{\varepsilon}{\rho\lambda} \left( 1 - e - \frac{P_1 t_w}{W} \right) \cdot e - \frac{P_2 t_2}{W} \lambda, \quad (1)$$

где  $Q$  — количество радона в воде.

$\varepsilon$  — количество радона, выделяемое 1 см<sup>3</sup> породы за 1 с,  
 $P_1, P_2$  — пористость соответственно радиоактивной и нерадиоактивной породы,

$l_1, l_2$  — длина пути фильтрации вод соответственно по радиоактивной и нерадиоактивной породе.

$W$  — количество воды, протекающей через  $1 \text{ см}^3$  породы за 1 с.

$\lambda$  — константа распада радона.

Анализ данной формулы показывает, что, если вода вытекает из мощного слоя активной породы (в нашем случае — породы приочаговой области), перекрытой слоем неактивной, то содержание радона будет тем выше, чем выше скорость фильтрации вод. Следовательно, если допустить, что обогащение ташкентских минеральных вод вызвано притоком радоновых вод из пород приочаговой области, то в этом случае скорость фильтрации должна исчисляться сотнями метров в сутки. Это должно привести к резким изменениям (в несколько раз превышенное) гидродинамических и гидрогеохимических показателей подземных вод. Однако достаточно детальными наблюдениями за гидродинамическими и гидрогеохимическими показателями подземных вод Ташкентского артезианского бассейна до и после землетрясения не обнаружены столь сильные изменения в величинах этих параметров.

Если даже допустить, что воды обогащались радоном за счет смещения, то уменьшаться концентрация радона после этого (после основного толчка) должна в соответствии с законом радиоактивного распада:

$$Q_{Rn} = Q_0 P n \cdot I^{-\lambda t}. \quad (2)$$

Начальная (фоновая) концентрация радона в водах в этом случае должна восстановиться не ранее, чем за 15—20 дней ( $\sim 5T_{1/2}$  радона), на самом же деле она снижалась гораздо быстрее. Все это свидетельствует о том, что образование аномалий радона в подземных водах перед землетрясением не связано с процессом выжимания радоновых вод из пород приочаговой области. В то же время известно, что содержание радона в горных породах ( $Q_{Rn}$ ) определяется следующей зависимостью:

$$Q_{Rn} = \frac{\alpha}{4} \cdot g_{Ra} \rho \cdot \frac{R}{r}, \quad (3)$$

где  $g_{Ra}$  — содержание радия в породах,

$\rho$  — плотность пород,

$R$  — длина пробега атомов радиоактивной отдачи в минерале,

$r$  — средняя ширина микротрещин и других зон нарушений,

$\alpha$  — коэффициент пропорциональности, зависящей от геометрической формы микротрещин.

Данная зависимость показывает, что эманирующая способность горных пород в первую очередь определяется развитием мельчайших трещин внутри минералов, т. е. их внутренней поверхностью. Крупное дробление пород не должно приводить к увеличению ее эманирующей способности. Поэтому, если при деформации пород образуется система микротрещин в минерале, то концентрация ра-

дона в водоносном горизонте должна повыситься и оставаться на этом уровне практически постоянной (и после релаксации упругих напряжений), так как процесс «залечивания» микротрещин (если он происходит) протекает гораздо медленнее по сравнению с периодом полураспада радона. Однако в природных условиях характерной особенностью аномалий радона, возникающих при землетрясениях, является их нестандартность, выражающаяся в том, что после толчка концентрация радона, как правило, быстро достигает значений, близких к фоновым.

Обнаруженные аномалии (см. рис. 15) в содержаниях радона в подземных водах Ташкентского геодинамического полигона, связанные с далекими землетрясениями, тоже нельзя связать только с трещинообразованием, так как вряд ли процессы подготовки землетрясения со значительно удаленными эпицентрами приводят к трещинообразованию в горизонтах наблюдательных скважин. Рассмотрим несколько иное объяснение природы радона в подземных водах в период сейсмической активизации.

Накопление радона в поровом пространстве горных пород (капилляры, микротрещины) обусловлено эманированием и диффузией. При распаде  $Ra^{223}$  ядра отдачи (радон), обладая кинетической энергией около 100 Кв, способны пройти в воздухе расстояние 0,1—0,2 мм. Любая горная порода пронизана системой капилляров, микротрещин и пор, размеры которых колеблются от  $10^{-3}$  до  $10^{-5}$  см и менее. Ядра отдачи, пересекающие сухие капилляры, внедряются в противоположную стенку. Столкновение ядер отдачи со стенками пор и капилляров сопровождается их адсорбцией и только незначительная часть, пробег которой заканчивается в капиллярах, будет находиться в свободном состоянии.

В природных условиях поры и капилляры горных пород, как правило, заполнены водой. Поэтому большинство ядер отдачи будет задерживаться водой и оставаться в порах. Доля адсорбированных ядер отдачи в этом случае, естественно, будет меньше, чем для сухих пор.

Таким образом, в горной породе атомы радона находятся в свободной и адсорбированной формах в порах и в «связанной» форме — в узлах или межузлах кристаллической решетки минералов. В процессе эманирования участвуют только атомы радона первых двух форм.

Максимальное количество радона в подземных водах может быть оценено из следующего выражения:

$$Q_{Rn} = \frac{K_{эм} q_{Ra} \rho}{P} \cdot 10^3 \text{ кюри/л,} \quad (4)$$

где  $K_{эм}$  — коэффициент эманирования,  
 $q_{Ra}$  — содержание радия в породах, г/г,  
 $\rho$  — плотность пород, г/см<sup>3</sup>,  
 $P$  — пористость пород.

Имея фактические данные по содержанию радона в подземных водах, радиоактивности, плотности и пористости пород, из выражения (4) можно определить коэффициент эманирования для пород в естественном залегании. Мы произвели расчет для некоторых скважин Приташкентского бассейна. Полученные результаты показывают, что коэффициент эманирования для пород в естественном залегании имеет крайне низкие значения, не превышающие 1%. Лабораторные определения коэффициента эманирования для образцов пород, отобранных из этих скважин, показали значения около 10% при эманировании в воздух (сухие образцы), что составляет около 30% при эманировании в воду.

Приводим коэффициент эманирования и содержания радия в породах и в подземных водах Приташкентского артезианского бассейна.

Скважина, местонахождение	В породах, В водах,		В водах,	$K_{эман.}$ %
	Ra $10^{-12}$	Ra $10^{-12}$	Rn $10^{-12}$ С/л	
Пос. Сарыагач, 19	7,0	4,2	5,0	0,6
Улугбек, 9	6,6	3,0	6,6	0,8
Дворец водн. спорта, 3	3,6	3,2	4,0	0,9
д/о „Ботаника“, 10	3,7	3,5	7,0	0,6

Крайне низкие значения коэффициента эманирования, полученные для пород в естественном залегании, по сравнению с данными лабораторных определений свидетельствуют о том, что большая доля радона, присутствующего в поровом пространстве горных пород, находится в адсорбированном состоянии и лишь незначительная часть растворена в подземных водах, т. е. равновесие сильно смещено в сторону адсорбированного радона. Это можно объяснить особыми физико-химическими условиями подземных вод бассейна (например, высокое давление, температура). Если по какой-либо причине равновесие между адсорбированным и растворенным радоном в системе порода — вода сместится в сторону последнего, то это приведет к повышению концентрации радона в подземных водах. Причем, это повышение может быть значительным, так как основная масса радона (до 90%) в системе порода — вода находится в адсорбированном состоянии, в водах же концентрация радона крайне низкая и далека до предела насыщения.

Рассмотрим, за счет каких факторов, сопровождающих процессы подготовки землетрясений, может сместиться равновесие между адсорбированной и растворенной формами радона в системе порода — вода.

В настоящее время установлено, что очаговые области испытывают деформацию. Величина и скорость деформаций (64) обуславливают все геофизические, гидрогеодинамические, геофизические и другие аномалии.

К факторам, воздействующим на выделение эманации из пород, в первую очередь следует отнести упругие колебания, возникающие при подготовке землетрясения. Лабораторным путем установлено

(39), что при воздействии колебаний различной частоты на горные породы, выделение радона и торона из них в несколько раз увеличилось. Следует отметить, что увеличение выделения эманации из минералов под действием ультразвука в данном случае нельзя связать с повышением коэффициента эманирования, так как при озвучивании физические свойства минералов не изменялись (не нарушена плотность минералов). Причина данного явления заключается в том, что под действием ультразвука адсорбционные силы,

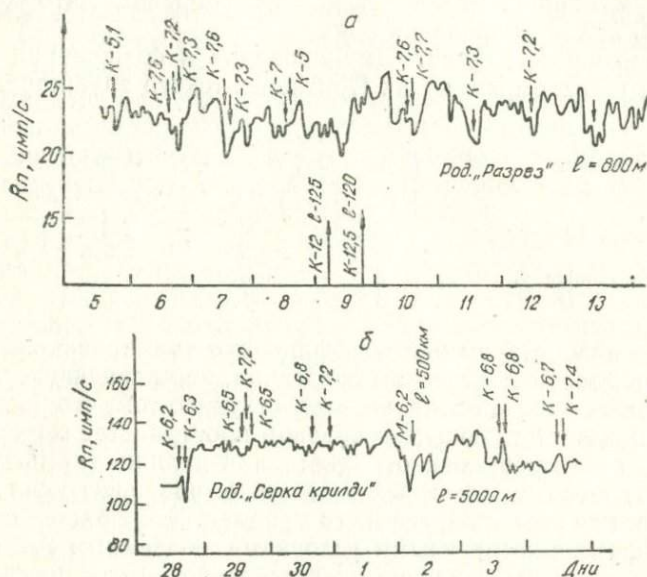


Рис. 16. Вариации содержания радона в подземных водах под действием искусственных взрывов.

которые в нормальных условиях удерживают атомы газа по стенкам пор, микротрещин и других пустот внутри минерала нарушаются, и атомы переходят в свободное состояние, в результате чего получают возможность за счет диффузии выделиться в окружающее образец пространство.

В естественных условиях возможности воздействия упругих колебаний на выделение радона нами проверены в процессе искусственных взрывов, которые произведены на одном из разрезов угольного месторождения. Класс сотрясения от этих взрывов (эквиваленты энергетического класса) и моменты указаны стрелками (рис. 16а).

На расстоянии 800 м от места взрыва на артезианской скважине установлено оборудование регистрации содержания радона в подземной воде (рис. 16а). Среднее его содержание оказалось

21—23 имп/сек. Почти после каждого взрыва содержание радона быстро падает, потом наблюдается некоторый его рост. Такой же эксперимент проведен на скважине, расположенной на расстоянии 5000 м (рис. 16, б). Эффект взрывов в содержаниях радона этой скважины почти не заметен. Аномальные значения радона, наблюдаемые 2—3 апреля, связаны, вероятно, с землетрясением в Кызылкумах 4 апреля 1978 г. (М 6,2), которое ощущалось на точках наблюдения.

Известно, что незадолго до землетрясения уровень акустических шумов резко возрастает. Как считают сейсмологи, очаг землетрясения представляет собой разрыв сплошности пород, который возникает в тот момент, когда тектонические напряжения превосходят предел прочности среды. По соседству с основным разрывом в породах образуется огромное количество трещин, каждая из которых при возникновении вызывает упругие колебания высоких частот. Под действием упругих колебаний в приочаговой области в системе порода — вода равновесие между сорбированными и растворенными газами смещается в сторону последних, вызывая изменение концентрации радона в подземных водах.

С другой стороны, воздействие упругих колебаний на жидкую фазу вызывает уменьшение растворенного в ней газа, т. е. жидкость дегазируется (108). Однако процесс дегазации жидкости начинается в том случае, если акустическая мощность превышает некоторое пороговое значение, величина которого зависит от физико-химического состояния жидкой фазы (вязкость, содержание растворенного газа, давление и др.). Следовательно, при распространении упругих колебаний в системе порода — вода протекают два качественно противоположных процесса: а) обогащение подземных вод газами, в том числе радоном за счет перехода адсорбированного газа в растворенную форму; б) уменьшение количества растворенного газа за счет дегазации подземных вод. Соотношение между этими процессами зависит от мощности акустических колебаний. При относительно слабых акустических колебаниях жидкая фаза обогащается газами, а после достижения мощности акустических колебаний порогового значения дегазации растворенный газ переходит в свободный. Процесс дегазации жидкости, как показывают эксперименты (108), наиболее интенсивно протекает при относительно мощных акустических колебаниях. В этом отношении мощный источник акустических колебаний в природе — землетрясение. Под действием ультразвуковых колебаний, возникающих при землетрясении, происходит не только дегазация подземных вод, но и, по-видимому, интенсивный процесс выщелачивания различных химических элементов из пород, вызывающий изменения химического состава вод и их минерализацию.

Другим фактором, способствующим смещению адсорбированного равновесия между растворенной и адсорбированной формами радона в системе порода — вода, является изменение гидродинамического режима подземных вод в частности, колебания внутри-

пластового давления жидкости в процессе роста и разрядки упругих напряжений горных пород.

Многолетние наблюдения показывают, что содержание радона и величины гидродинамических показателей на скважинах Улугбек и Парк Победы в общих чертах коррелируют между собой. Понижение затрубного давления соответствует повышению содержания радона и, наоборот, повышение давления — понижению содержания радона.

В процессе исследования на скважинах Ташкентского геодинамического полигона мы установили сильное колебание содержания радона на тех скважинах, где вода неравномерно эксплуатируется. Эксплуатация воды действует на трубное давление скважин. С уменьшением трубного давления содержание радона увеличивается и наоборот.

Закономерные вариации давления и содержания радона в водах свидетельствуют об их взаимосвязи. Можно полагать, что изменение напора водоносного горизонта, обусловленное процессом накопления или разрядки упругих напряжений горных пород, приводит к смещению равновесия между адсорбированными и растворенными газами в системе порода — вода. Это, в свою очередь, изменяет концентрацию радона в подземных водах.

Последнее время внимание специалистов привлекает возможность активизации эманирования искусственным способом. В ГДР получен патент на способ измерений при геологических исследованиях, когда воздействуют на породы (механическим, электрическим термическим и другими методами) для активизации эманирования.

В связи с этим следует обратить внимание на значительное изменение электромагнитного поля земли (109, 110) во время сильных землетрясений. Эти факторы, несомненно, влияют на внедрение различных элементов, в том числе радона, из горных пород в подземные воды, нарушая установленные вековые равновесия в системе порода — вода.

### О корреляционных зависимостях наблюдаемых аномалий от параметров землетрясений

Результаты исследований вариации содержаний радона и других гидрогеохимических параметров позволили сделать попытку найти в первом приближении закономерные связи между отдельными параметрами наблюдаемых аномалий и возникших землетрясений.

Гидрогеохимические аномалии, как показывают эксперименты, могут быть как положительные, так и отрицательные, в зависимости от расположения наблюдательных точек и эпицентров землетрясений в геолого-тектоническом отношении. Наблюдаемые аномалии характеризуются амплитудой и длительностью проявления, которые зависят от мощности землетрясений.

На примере Газлийских землетрясений 1976 г. мы выявили (111) корреляционные связи между амплитудой вариации содержания радона и эпицентрными расстояниями: относительное изменение содержания радона в подземных водах обратно пропорционально расстоянию между пунктом наблюдения и эпицентром землетрясения.

В работе (112) указано, что величина деформации в любом пункте зависит от магнитуды готовящегося землетрясения, а также от эпицентрального расстояния. Эту зависимость можно выразить

$$M = \lg \frac{A}{T} + a \lg l, \quad (5)$$

где  $M$  — магнитуда,

$A$  — амплитуда максимальных сейсмических волн,

$T$  — период максимальных сейсмических волн,

$a$  — числовой коэффициент,

$l$  — эпицентральные расстояния.

$\frac{A}{T} = d$  — значение можно узнать на сейсмических станциях.

Если для  $a$  принять соответствующие значения для исследуемого региона, в нашем случае оно равно 2, тогда

$$M = \lg d + 2 \lg l$$

$$10^M = d \cdot l^2, \quad d = \frac{10^M}{l^2}. \quad (6)$$

Выражение (6) можно считать сейсмической активностью. Мы попытались связать эту величину с амплитудой имеющихся аномалий гидрогеосейсмологических параметров. Величина амплитуды аномалий равна максимальному отклонению измеряемых величин от среднего фонового значения (рис. 17, а).

Корреляционную зависимость между амплитудой аномалии ( $A$ ) и величиной сейсмической активности ( $d$ ) на основании составленного графика можно выразить следующим образом:

$$A - a = 0,37 \lg d - 0,51. \quad (7)$$

На рис. 17, в показана зависимость между длительностью наблюдаемых аномалий, эпицентральным расстоянием и магнитудой землетрясений. Каждая точка на графике характеризуется координатой из трех параметров:  $l$  — эпицентральное расстояние (км),  $M$  — магнитуда,  $\lg \Delta T$  — длительность проявления аномалии (в сутках) от начала до момента основного толчка.

Как видно, точки, соответствующие каждому землетрясению, происходящему в регионе, лежат на одной линии плоскости. Уравнение такой плоскости для случая после обработки данных методом наименьших квадратов тройной корреляции приобрело вид:

$$\lg \Delta T = 0,555 M - 0,0028 l - 1,07. \quad (8)$$

Имея длительность и величину аномалии (амплитуда), можно приблизительно оценить магнитуду и эпицентральное расстояние готовящихся землетрясений.

Первыми попытались найти количественную зависимость между предвестниками и энергией землетрясений Rikitake (113) и И. Л. Нерсесов (114). При этом в качестве возможного предвестника использовались аномальные деформации земной коры и величины  $V_p/V_s$ .

В. И. Мячкин (6) составил сводный график зави-

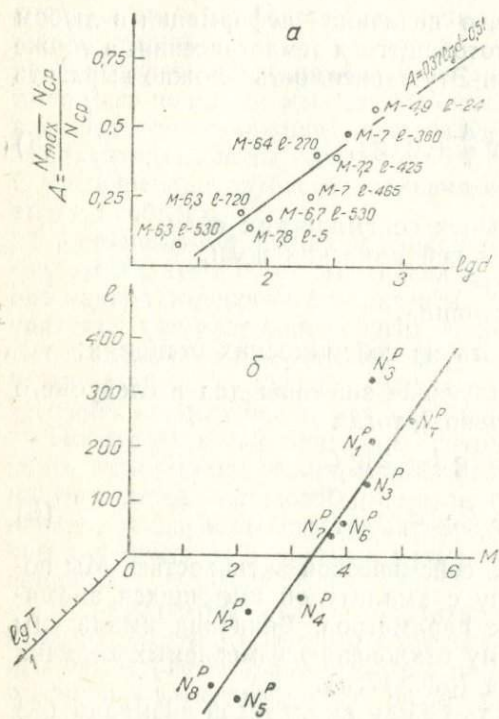


Рис. 17. Зависимость проявления аномалий содержания радона от параметров землетрясений.

Рис. 18. Зависимость проявления гидрогеосейсмологических аномалий от параметров землетрясений.

а) — график зависимости длительности аномалии ( $lg T$ ) от энергетического класса  $|K|$  землетрясения, б) — график зависимости функции  $lg RT$  от энергетического класса землетрясения.

1—Rn, 2—He (об. %), 3—CO<sub>2</sub>, 4—H<sub>2</sub>, 5—εh, 6—He (абс. сод.), 7 —  $\frac{dp}{dt}$ .

симости проявления различных предвестников от энергии землетрясения. На основе анализа данных он ввел формулу, показывающую зависимость аномального периода предвестников от энергии землетрясений.

При этом обнаружено, что величина  $\Delta T_{ам}$  уменьшается с увеличением эпицентрального расстояния, что, очевидно, обусловлено изменением во времени зоны подготовки землетрясений и чувстви-

тельности определения отдельных характеристик поля. И так как процесс подготовки землетрясений развивается не только во времени, но и в пространстве, А. Н. Сидорин (115) попробовал рассмотреть совместно не только время проявления предвестника  $T$ , но и расстояние от эпицентра землетрясения до точки наблюдения  $R$  и энергию землетрясения.

В вышеуказанных работах использованы сведения различного характера по различным районам.

Мы привлекли результаты режимных наблюдений, проведенных в основном на Ташкентском геодинамическом полигоне в 1972—1980 гг. В течение указанного времени произошло несколько сильных землетрясений с различными энергетическими классами и эпицентрными расстояниями (см. табл. 2). Они ощущались на Ташкентском полигоне и предварялись рядом геохимических и гидрогеодинамических аномалий.

Непрерывные режимные наблюдения за вариациями гидрогео-сейсмологических параметров позволили наметить некоторую связь величин выявленных аномалий с энергией возникших землетрясений (116). При этом, в частности, по вариации содержания радона четко выявляется зависимость величины проявленной аномалии от эпицентрального расстояния.

Результаты экспериментальных исследований свидетельствуют о тесной зависимости времени проявления гидрогео-сейсмологических аномалий не только от энергии землетрясений, но и от эпицентрального расстояния. Для выявления этих зависимостей мы составили графики (рис. 18). Время проявления аномалий —  $T$  (дни) бралось с начала их выражения до момента основного толчка (аномалией считались значения наблюдаемого параметра, существенно отличающиеся от среднегодового его значения). Эпицентральное расстояние  $R$  (км) измерялось от точки наблюдения предвестников до эпицентра землетрясений.

На рис. 18, а показана зависимость длительности проявленных аномалий от энергетического класса возникших землетрясений. По оси ординат отложены значения  $\lg T$ , показывающие время проявления аномалий, наблюдавшихся на Ташкентском геодинамическом полигоне перед сильными землетрясениями в Средней Азии с различными эпицентрными расстояниями — от 25 до 500 км. Однако, как видно из графика, длительность проявления аномалий очень слабо связана с энергией землетрясений. Рассчитанный коэффициент корреляции равен 0,35. Для однозначной интерпретации данных землетрясений, эпицентры которых удалены от точек наблюдения на разные расстояния, мы построили график зависимости функции  $\lg^2 TR$  (учитывающий как длительность проявленных аномалий предвестников, так и расстояние от точки наблюдения до эпицентра) от энергии землетрясений. Как видно (рис. 18, б), наблюдается довольно четкая линейная зависимость функции  $\lg TR$  от энергетического класса (формула корреляционной зависимости рассчитана методом наименьших квадратов):

$$\lg TR = 0,35 K - 1,25. \quad (9)$$

Если учесть, что  $K=4+1,8 M$ , то можно записать  $\lg TR = 0,63M + 0,15$ . Коэффициент корреляции между функцией  $\lg TR$  и энергетическим классом землетрясений  $K$  равен 0,95. Следует отметить, что установленная линейная зависимость с высоким коэффициентом корреляции еще раз свидетельствует о том, что наблюдаемые аномалии гидрогеосейсмологических параметров тесно связаны с процессами подготовки землетрясений и могут быть использованы для прогноза места, времени и силы землетрясений.

Ограниченность сведений (использованы данные наблюдений, только на одном полигоне) не позволяет пока сделать более обобщенных выводов, поскольку не учитывается возможное влияние на время проявления аномалий геолого-тектонических условий очагов землетрясений и наблюдательных точек.

Несмотря на это, полученные результаты имеют важное практическое значение. Их следует принять как одну из первых попыток количественной оценки данных гидрогеосейсмологических предвестников землетрясений и использовать при разработке алгоритмов прогноза землетрясений.

#### О прогностических возможностях гидрогеосейсмологической системы наблюдения в Узбекистане

В результате гидрогеохимических наблюдений, проводимых с 1965 г. на Ташкентском, Андижанском и других геодинамических полигонах, установлено, что накануне почти всех сильных землетрясений, возникших на территории Средней Азии, отмечались гидрогеосейсмологические аномалии, подтверждающие возможность их использования для предсказания землетрясений. На примере нескольких землетрясений установлена зависимость величины наблюдаемых аномалий от силы и эпицентрального расстояния (111). Поэтому, имея определенное количество наблюдательных пунктов, можно следить за ходом глубинных процессов, связанных с подготовкой землетрясений в данном регионе. С этой целью в сейсмоактивных районах Узбекистана создаются комплексные наблюдательные станции. При выборе местоположения станции учтены геолого-тектонические и гидрогеологические условия района.

Мы попытались оценить (117) возможность обнаружения этими станциями минимального уровня магнитуды подготавливающегося землетрясения на территории Узбекистана. На Ташкентском геодинамическом полигоне в результате гидрогеосейсмологических исследований установлено (117).

$$\lg RT = aM + b, \quad (10)$$

где  $R$  — эпицентральное расстояние, т. е. расстояние от пункта наблюдения до эпицентра землетрясения, км

$T$  — длительность аномалии, т. е. время от начала проявления аномалий до момента основного толчка, сут,

$M$  — магнитуда землетрясения.

Закономерность вида (10) использована при построении карты минимальной представительности готовящихся землетрясений (рис. 19).

Допустим, что в данном регионе минимальное число станций, участвующих в определении координат эпицентра будущих земле-

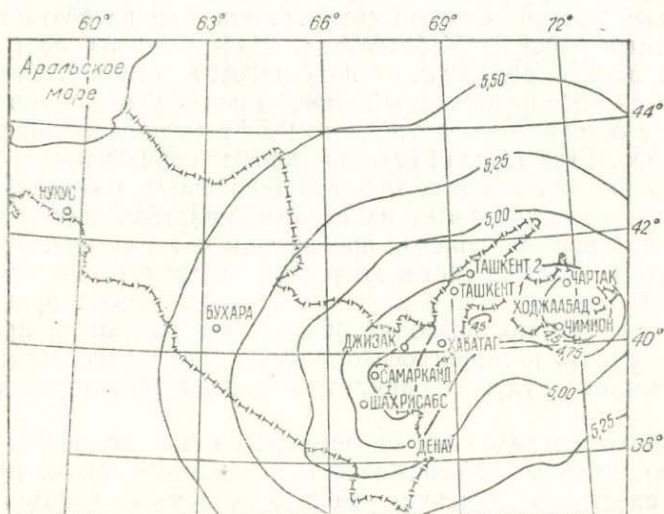


Рис. 19. Схематическая карта минимального уровня магнитуды прогнозируемых землетрясений для станций Узбекистана.

трясений  $m_i$ . Для оценки погрешностей необходимо, с одной стороны, знать, какие именно станции участвуют в определении координат эпицентра, с другой — какому минимальному уровню  $M_{m, \min}$  соответствует представительность готовящихся землетрясений изучаемого района по данным этих же станций. Гидрогеосейсмологические станции расположены на большой территории с разнообразными геологическими условиями. Чувствительность этих станций к прогностическим предвестникам почти одинакова.

В данной работе мы допустили, что наблюдательные станции имеют одинаковую чувствительность. Естественно что  $M_{m, \min}$  определяется по данным самой «грубой» из всей последовательности станций (1, 2...  $n$ ), участвующих в определении координат прогнозируемых эпицентров землетрясений этого района при определении значений  $T_i$ .

На основании вышесказанного разработаны алгоритм и программа построения карты  $M_{m, \min}$  (117). Мы приводим карту

$M_{3, \min}$  для гидрогеосейсмологических станций Узбекистана (рис. 19). Кроме того, мы построили карты для различных значений  $T_i$ . Приведенная карта соответствует  $T = 10$  суткам. Она показывает возможность определения представительности прогнозируемых землетрясений с помощью 12 гидрогеосейсмологических станций.  $M_{3, \min}$  варьирует от 4,3 до 7. Наименьшая магнитуда прогнозируемых землетрясений соответствует восточной части Ферганской долины и району Самарканда.

Таким образом, организуемые гидрогеосейсмологические станции по своей прогностической возможности хорошо соответствуют сейсмогенным районам Узбекистана. Как видно из построенной карты, на западе республики возможности станций несколько уменьшаются (обнаруживаемый минимальный уровень магнитуды завышен) в основном из-за отсутствия достаточного их количества. Но если учесть, что каждая станция, кроме опорных точек, должна иметь сеть наблюдательных пунктов (скважины, родники, колодцы и т. д.), расположенных на исследуемой территории, то возможности станций при поисках предвестников землетрясений будут увеличиваться. Данные систематических гидрогеосейсмологических наблюдений в комплексе с другими на создаваемых прогнозных станциях, несомненно, позволят обнаружить надежные предвестники и разработать гидрогеосейсмологические методы предсказания параметров будущих землетрясений на территории республики.

Результаты проведенных гидрогеофизических исследований по выявлению основных закономерностей поведения таких параметров, как пластовое давление, радон в подземных водах показывают, что их величина под действием различных факторов, возникающих при подготовке землетрясений, варьирует в широких пределах.

На примере происходивших на территории Средней Азии сильных землетрясений удалось выявить некоторые закономерности в вариации изучаемых параметров, найти корреляционную связь основных величин наблюдаемых аномалий с данными землетрясений. Амплитуда и время проявления (длительность) наблюдаемых аномалий в содержаниях радона (а также других параметров) — функция от магнитуды и эпицентрального расстояния готовящихся землетрясений. Для Ташкентского геодинамического полигона выявлена закономерность, которая позволяет по длительности и амплитуде аномалии в содержаниях радона судить о магнитуде и эпицентральной дистанции готовящихся землетрясений.

Для прогнозирования времени и места землетрясения необходим комплекс исследований, состоящий из гидрогеофизических, гидрогеохимических, геофизических и других работ.

Выявленная корреляционная связь параметров наблюдаемых аномалий и землетрясений для Ташкентского геодинамического полигона хотя не универсальна, но указывает путь к решению

проблемы прогноза места, времени и силы землетрясения. Для каждого полигона (или прогностической станции) необходимы специальные исследования по выявлению характерных для них гидрогеосейсмологических особенностей, связанных с сейсмичностью региона.

Гидродинамические параметры — чуткий индикатор на напряженные состояния горных пород. Они могут служить надежными предвестниками землетрясений в случае наблюдения в хорошо изолированном от внешних воздействий водоносном горизонте.

На основании выявленных закономерностей оценена прогностическая возможность существующих и запроектированных наблюдательных станций в Узбекистане. Составленная карта минимального уровня магнитуды прогнозируемых землетрясений  $M_{\min}$  для станций Узбекистана может служить основой при рациональном размещении пунктов наблюдений за вариацией гидрогеосейсмологических и других параметров при поисках предвестников землетрясений на территории республики.

## РАСПРОСТРАНЕННОСТЬ ИЗОТОПОВ УГЛЕРОДА И АРГОНА В ГАЗАХ ПОДЗЕМНЫХ ВОД В СВЯЗИ С СЕЙСМИЧНОСТЬЮ

С 1974 г. в Институте сейсмологии АН УзССР начаты систематические, приближенные к режимным, наблюдения за вариациями изотопных отношений углерода и аргона в газах подземных вод Ташкентского геодинамического полигона. В основе этих исследований лежит общепризнанный факт, что в периоды, предшествующие и сопутствующие землетрясениям, наблюдаются геохимические аномалии, проявляющиеся в закономерном изменении химического состава подземных вод, вариаций в концентрациях гелия, углекислого газа, аргона, радона и т. д. Признано также, что геохимические аномалии генетически связаны с возникновением в земной коре упругих напряжений, рост которых продолжается до тех пор, пока их величина не превысит предел прочности пород. В результате возникающих под действием напряжений деформаций увеличивается проницаемость горных пород и поровые растворы водосодержащей толщи вместе с газовыми струями поступают из недр земли по открывающимся трещинам и зонам разломов в верхние слои геосферы, что приводит к изменению состава подземных вод.

В ряде случаев эксперименты показали, что описываемые геохимические аномалии сопровождаются изотопными сдвигами некоторых стабильных и радиоактивных элементов, в частности, гелия, углерода, аргона, урана и др. (119—122). Но большая часть данных по вариациям изотопов получена при изучении свершившихся землетрясений, в то время как необходимы режимные наблюдения явлений в стадии, предшествующие и сопутствующие сейсмической активности.

Ниже приводятся результаты наблюдений за изотопными отношениями аргона ( $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ ), ( $^{36}\text{Ar}/^{38}\text{Ar}$ ) и углерода ( $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ ) в  $\text{CO}_2$  в газах термоминеральных вод Приташкентского артезианского бассейна с 1976 по 1980 г. В пределах бассейна пробурено множество гидрогеологических скважин, которые вскрыли водоносный горизонт, приуроченный к пескам и песчаникам сеномана. Воды этого горизонта в большинстве скважин самоизливающиеся, напорные с температурой  $22 \div 70^\circ\text{C}$ . По химическому составу и

минерализации подземные воды сеномана изменяются от гидрокарбонатно-кальциевых вблизи областей питания, карбонатно-натриевых на некотором удалении, до хлоридно-натриевых в зонах разлома депрессии. Соответственно меняется и минерализация подземных вод от  $0,3 \div 0,5$  г/л в областях питания, через  $0,5 \div 1,0$  г/л в окрестностях Ташкента до  $1,7$  г/л в зонах возрожденных разломов. В результате исследований условий формирования подземных вод бассейна и изучения концентрации дейтерия воды сеноманского горизонта в зоне горного обрамления и предгорий отнесены к водам инфильтрационного происхождения; по мере движения к депрессионной части бассейна возможно их смешение с седиментационными водами (123).

## Глава V

### ОТБОР ПРОБ ГАЗА И ПОДГОТОВКА К ИЗОТОПНОМУ АНАЛИЗУ НА МАСС-СПЕКТРОМЕТРЕ

Пробы газа отбирали на устье самоизливающихся скважин методом вакуумной дегазации. На опорных скважинах (в основном в черте г. Ташкента) установлены форвакуумные насосы, с помощью которых баллон из нержавеющей стали ( $V = 5$  л) вместе со стеклянной ампулой ( $v = 0,1$  л) откачивался до  $\approx 10^{-1}$  мм рт. ст. Вода из скважины подавалась в баллон и выделившийся газ собирался в ампулу (все соединения вакуумные). Затем ампула с газом присоединялась к вакуумной стойке напуска масс-спектрометра, на которой осуществлялась дальнейшая подготовка пробы к изотопному анализу.

Хроматографический анализ отбираемого газа показал следующий состав проб Ташкентского полигона:  $80 \div 92\%$   $N_2$ ,  $0,1 \div 1,5\%$   $O_2$ ,  $5 \div 12\%$   $CO_2$ ,  $0,6 \div 2,10\%$  He,  $1,3 \div 1,6\%$  Ag и в микроколичествах ( $0,001 \div 0,01\%$ ) водород.

Таким образом, для соответствующего изотопного анализа из совокупности газов необходимо было выделить:  $CO_2$  — для измерения  $^{13}C/^{12}C$  и Ag — для измерения  $^{40}Ag/^{36}Ag$ ,  $^{36}Ag/^{38}Ag$ .

**Аргон.** Благородные газы очищались от химически активных ( $N_2$ ,  $O_2$  и др.) последовательным пропусканием через ловушку, охлаждаемую смесью твердой углекислоты («сухого» льда) и спирта ( $t = -78^\circ C$ ) для удаления паров воды, и затем через титановую ампулу ( $v = 8$  см<sup>3</sup>), нагреваемую до температуры  $1000^\circ C$ . После очистки аргон собирался в ампулу с активированным углем при температуре жидкого азота. Затем оставшееся в пробе количество гелия определялось методом сравнения интенсивностей пиков с воздушными благородными газами, полученными очисткой дозированной порции воздуха.

Качество очистки контролировалось масс-спектрометром по азотному пику. Увеличение сигнала  $m/e = 28$  при напуске очищенной пробы было небольшим — в пределах фонового значения

(35÷80 мВ при  $R_{вх} = 10^{12}$  Ом). Специальные холостые опыты (в этих случаях в вакуумной системе выполнялась вся процедура очистки без напуска пробы газа) показали, что фоновые количества пиков на  $m/e = 36, 38, 40$  в приборе и в системе приготовления проб незначительны: для  $m/e = 40$  фоновое значение не более  $5 \cdot 10^{-14}$  А и, очевидно, обусловлено памятью от предыдущих напусков.

**Двуокись углерода.** Углекислый газ из отобранной пробы выделялся следующим образом. Предварительно проба газа очищалась от паров воды путем пропускания через ловушку со смесью твердой углекислоты и спирта, после чего двуокись углерода собиралась в отдельную ампулу, охлаждаемую жидким азотом. Дальнейшую очистку  $CO_2$  проводили методом перегонки в вакууме, для чего его испаряли из ампулы при температуре сухого льда ( $-78^\circ C$ ), конденсируя в ампулу, охлаждаемую жидким азотом. Двукратная манипуляция гарантировала получение необходимого качества углекислого газа.

### МАСС-СПЕКТРОМЕТРИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ

**Аргон.** Изотопный состав аргона исследуемых проб определялся на серийном отечественном масс-спектрометре МИ 1309 однолучевым способом. Ионный источник МИ 1309 имел достаточную чувствительность по аргону (порог чувствительности по  $Ar: \eta = 5 \cdot 10^{-4}\%$ ) и обеспечивал хорошо сфокусированные пучки ионов в широком диапазоне давлений (от  $10^{-8}$  до  $10^{-5}$  мм рт. ст.). Без особых потерь в интенсивностях ( $\approx 14 \div 17\%$ ) получена разрешающая способность  $\approx 1000$  на 10%-ной высоте при ширине выходной щели ионного источника 0,1 мм. Пики имели приемлемую форму, коэффициент формы пиков (отношение ширины пика на уровне 95%-ной интенсивности к ширине на уровне 5%-ной) был равен  $K_{\phi} = 0,15 \div 0,20$ . В снятых масс-спектрах пики органических молекул типа  $(^{12}C_3)^+$ ,  $(^{12}C_3H_2)^+$  не наблюдались, иначе их наличие при достигнутой разрешающей способности было бы зарегистрировано.

Для проверки стабильности работы масс-спектрометра, а также методики приготовления проб и в целом всего процесса измерений периодически измерялись изотопные отношения  $^{40}Ar/^{36}Ar$  и  $^{36}Ar/^{38}Ar$  в аргоне, извлекаемом из проб воздуха. Эти пробы обычно отбирались в эвакуированную ампулу объемом  $150\text{см}^3$  в загородной или парковой зоне Ташкента.

Процедура измерения изотопного состава аргона состояла из 5 двусторонних разверток масс-спектра  $Ar$ . Ионные токи регистрировались с помощью усилителя постоянного тока ( $10^{-9} \div 10^{-14}$  А), масс-спектры записывались электронным потенциометром КСП-4. Числовой материал объединялся в две группы: для обработки отношений  $^{40}Ar/^{36}Ar$  и, соответственно,  $^{36}Ar/^{38}Ar$ . Погрешность измерений составила в среднем  $\pm 1\%$ .

По полученным данным в общем количестве аргона рассчитывались доли радиогенного ( $K_{\text{рад}}$ ) и воздушного ( $K_{\text{возд}}$ ) аргона:

$$K_{\text{возд}} = \frac{({}^{40}\text{Ar}/{}^{36}\text{Ar})_{\text{эталон}}}{({}^{40}\text{Ar}/{}^{36}\text{Ar})_{\text{проба}}},$$

$$K_{\text{рад}} = 1 - K_{\text{возд}}. \quad (11)$$

Под «воздушным аргоном» подразумевается та его часть, в которой измеренное отношение  ${}^{40}\text{Ar}/{}^{36}\text{Ar}$  соответствует воздушному и составляет 296. Употребляемая здесь терминология нуждается в пояснении. Дело в том, что «воздушный аргон» включает в себя как некоторую часть аргона, попавшего в пробу непосредственно из атмосферы при отборе пробы (в атмосфере Земли содержание аргона 0,934 об.%) и при подготовке ее к анализу, так и аргон с воздушным отношением изотопов, находящихся в подземных водах. Оставшаяся часть аргона, содержащая только избыток  ${}^{40}\text{Ar}$ , называется радиогенной.

**Углерод.** Измерялись  ${}^{13}\text{C}/{}^{12}\text{C}$  в углекислом газе на масс-спектрометре МИ 1309 двухлучевым способом. Мы в основном придерживались методик, наиболее подробно описанных в работах В. И. Устинова, В. А. Гриненко, Ф. А. Алексеева (124, 125). Как известно, основная масса изотопных измерений в лабораториях производится по отношению к лабораторному стандарту, величина  $S^{13}$  которого относительно международных стандартов измерялась многократно. В нашей лаборатории в качестве рабочего стандарта взят углекислый газ, приготовленный на электрохимкомбинате в г. Чирчике. Изотопный состав был измерен на масс-спектрометре МАТ-250 в лаборатории Института литосферы АН СССР. В результате получены значения:  $\delta C_{\text{pDB}}^{13} = -30,9\%$  и  $\delta O_{\text{smow}}^{18} = 2,6\%$ .

## Глава VI

### РЕЗУЛЬТАТЫ НАБЛЮДЕНИЙ ЗА ИЗОТОПНЫМ СОСТАВОМ АРГОНА В ГАЗАХ ПОДЗЕМНЫХ ВОД

В течение 1975—1980 гг. опробовалось 15 скважин Ташкентского геодинамического полигона. Частота отбора проб лимитировалась в основном удаленностью скважин от лаборатории. Из скважин, расположенных в черте г. Ташкента (№ 2, 8, 9), пробы газа на изотопный анализ отбирались 2÷5 раз в неделю, из остальных — ежемесячно или раз в квартал.

Мы приводим результаты измерений изотопного отношения  ${}^{40}\text{Ar}/{}^{36}\text{Ar}$  в газах, полученных из термоминеральных вод скважин 2, 8, 9 за период с сентября 1975 г. по октябрь 1980 г. (рис. 20). За это время по каждой скважине отобрано и проанализировано  $\approx$  по 400 проб. На этот же график нанесены основные параметры землетрясений: время свершения, магнитуда  $M$  и расстояние  $L$

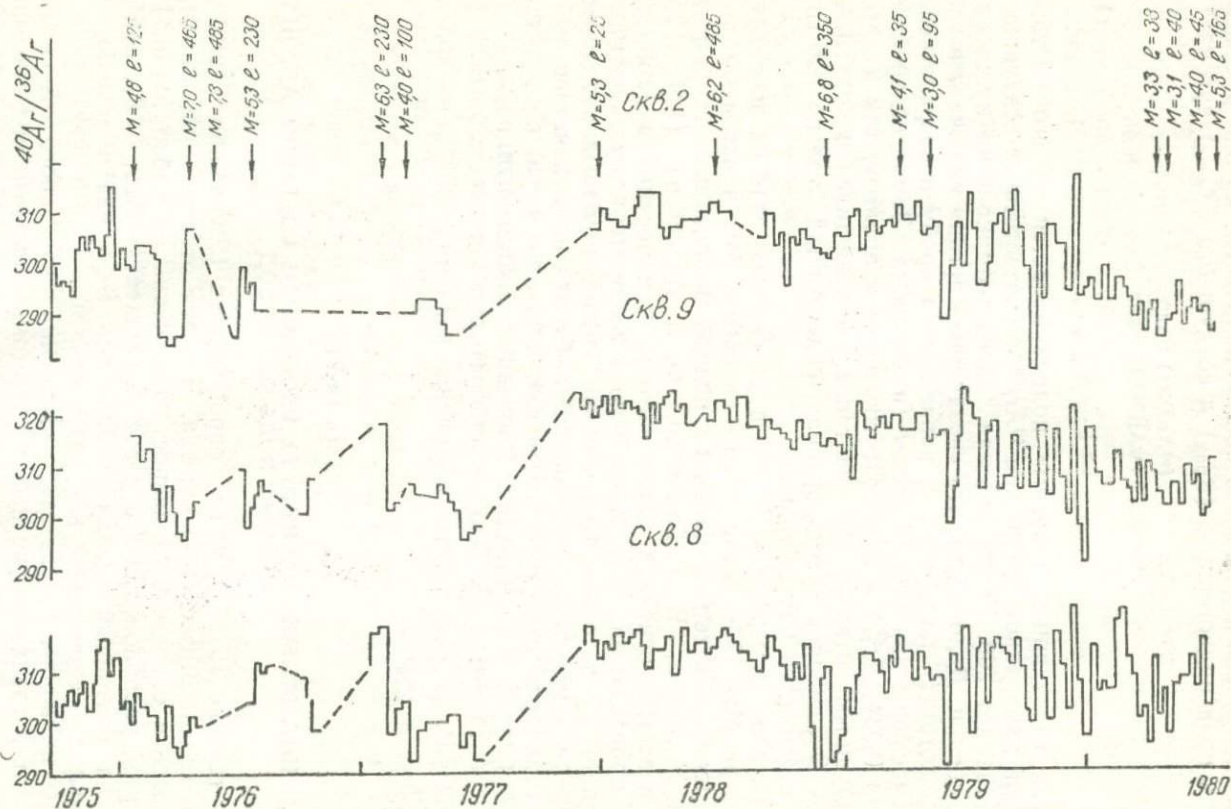


Рис. 20. Изменение  $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$  в газах подземных вод Приташкентского артезианского бассейна (скв. 2, 8, 9) за период с 1975 по 1980 г.

эпицентра от места взятия проб. Естественно, за пять лет наблюдений на Ташкентском геодинамическом полигоне и за его пределами произошло значительное количество землетрясений. Из Каталога землетрясений, а также из оперативных сообщений сейсмической станции Ташкент мы отобрали только те сейсмические события, которые могли обусловить геофизические, гидрогеохимические и геодезические аномалии в месте наблюдения. Эпицентры выбранных землетрясений удалены от скважин наблюдения на расстояниях, превышающие размеры очага в  $k = 10, 20$  или  $30$  раз, где  $k$  — коэффициент превышения размеров очага характеризует деформацию земной коры в месте наблюдения.

Анализ данных изотопных отношений  $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$  показывает следующее.

1. Изменение во времени величины  $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ , т. е. изменение содержания  $^{40}\text{Ar}_{\text{рад}}$  в термальном воде, достигающее до  $10\%$ . Например, с сентября 1975 г. по май 1978 г. при среднем значении для скважины 8  $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar} = 305$  наблюдался интервал значений  $290 \div 322$ , что характеризуется коэффициентом вариации  $\sigma/\bar{x} = 2,54\%$ . Для скважины 9 за этот же промежуток времени  $\bar{x} = ^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar} = 310$ , а  $\sigma/\bar{x} = 2,92\%$ .

2. Сопоставление данных  $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$  с сейсмичностью показывает определенную приуроченность наблюдаемых вариаций к землетрясениям, происшедшим как на территории Ташкентского геодинамического полигона, так и за его пределами.

3. Синхронность потока аргона и его изотопов на разных площадных участках Ташкентского геодинамического полигона подтверждается и количественно. Для скважин 8 и 9 в интервале времени с сентября 1975 г. по май 1978 г. вычислен коэффициент линейной корреляции, имевший значение  $r = 0,82 \pm 0,05$  со статистической значимостью на  $1\%$ -ном уровне (126). Полученная величина коэффициента линейной корреляции позволяет предположить, что не менее, чем на  $65\%$  изменение потока  $^{40}\text{Ar}_{\text{рад}}$  обусловлено общим фактором — в данном случае, по нашему мнению, сейсмическими явлениями.

Следует отметить, что явной взаимосвязи между количеством  $^{40}\text{Ar}_{\text{рад}}$  и проявленной сейсмичностью нет, но отчетливо видна тенденция к увеличению содержания  $^{40}\text{Ar}_{\text{рад}}$  в периоды сейсмической активности и к уменьшению в периоды сейсмического «затишья». Очевидно также разное влияние близких и далеких, так называемых «транзитных», землетрясений.

Особенно сильно на увеличение содержания радиогенного аргона повлияло землетрясение, происшедшее 6 декабря 1977 г. с эпицентром в пос. Таваксай (Ташкентская область) и  $M = 5,3$ . Землетрясение в Таваксае — одно из крупных сейсмических событий на Ташкентском геодинамическом полигоне за период наблюдений с 1975 по 1980 г. Представлялось необходимым проанализировать поведение содержания  $^{40}\text{Ar}_{\text{рад}}$  в исследуемых образцах

в периоды времени, предшествующие, сопутствующие землетрясению и после него.

Для этого строились гистограммы распределения измеренных значений  $^{40}\text{Ag}/^{36}\text{Ag}$  в образцах за интервал времени с 1975 по 1978 гг.

В геохимических исследованиях широко используется метод графического представления экспериментальных результатов, в частности, в виде гистограмм. Как известно, если ход гистограмм приближается к кривой нормального распределения вероятностей, или, как ее называют, колоколообразной кривой Гаусса, то можно сделать вывод, что исследуемые образцы (в данном случае — значения  $^{40}\text{Ag}/^{36}\text{Ag}$ ) относятся к одному геохимическому явлению. Сложнее интерпретировать гистограммы с асимметричным распределением, к примеру, с лево- или правосторонним максимумом, а также распределение с двумя (или несколькими) максимумами. Надо отметить, что выбор той или иной модели для описания полученных распределений заключается в чисто формальной статистической процедуре, тогда как выявление геохимических или физико-химических причин, обусловивших появление конкретного распределения, основывается на тщательном анализе реальной сущности события, в результате чего появляется возможность сделать выводы о тех факторах, которые влияют на характер распределения. Для получения информации в подобных исследованиях необходимо иметь дело с достаточно большим количеством образцов, в противном случае распределения будут носить чисто иллюстративный характер.

На рис. 21 представлены гистограммы распределения измеренных значений  $^{40}\text{Ag}/^{36}\text{Ag}$  в образцах из скважин 8 и 9. Представительность каждого распределения вполне достаточна — обрабатывалось 200 образцов. Гистограммы для каждой скважины построены в двух временных интервалах: 1975÷1976 гг. и 1977÷1978 гг.

Данные всех распределений обработаны на ЭВМ в Вычислительном центре Института сейсмологии АН УзССР по программе «Проверка гипотезы о функции распределения». В результате получены основные статистические характеристики распределений (табл. 5): средние значения —  $\bar{x}$ , дисперсии —  $\sigma$ , коэффициенты вариации —  $\sigma/\bar{x}$ , значения коэффициентов асимметрии и эксцессов, а также значения медиан и моды (правой границы интервала, имеющего наибольшую частоту).

Рассмотрение пары гистограмм для скв. 8 показывает, что на первом временном интервале распределение близко к кривой нормального распределения ( $\bar{x} = 304$ ,  $\sigma/\bar{x} = 2,05$ ), в то время как на втором временном интервале видны два максимума и  $\text{max}_I < \text{max}_{II}$ .

В распределениях по скв. 9 наблюдается иная картина. Каждое из распределений измеренных значений  $^{40}\text{Ag}/^{36}\text{Ag}$  на обоих временных интервалах имеет по два максимума. Но характер этих распределений разный: если для интервала 1975—1976 гг. кривая

имеет явно выраженный левосторонний максимум, то на следующем временном интервале — правосторонний. Это подтверждается и значениями коэффициента асимметрии (табл. 5). Необходимо отметить также, что характеры распределений и для скв. 8, и для скв. 9 на втором временном интервале совпадают, и в обоих случаях момент землетрясения приходится на правый максимум.

Полученные распределения и, конечно, характер их изменения на выбранных временных интервалах позволяют предположить,

Таблица 5

**Основные статистические величины гистограмм измеренных значений  $^{40}\text{Ag}/^{36}\text{Ag}$ . Массивы данных (N) обработаны по программе „Проверка гипотезы о функции распределения“**

Массивы данных	Число данных в массиве, N	Среднее значение, $\bar{x}$	Дисперсия, $\sigma^2$	Коэфф. вариации, $\sigma/\bar{x}$	Медиана, $\tilde{x}$	Мода, M	Асимметрия, $\beta$	Эксцесс, $\epsilon$
Скв. 8 (1975—1976 гг.)	140	304	39	2,05	305	302	0,18	3,12
Скв. 8 (1977—1978 гг.)	81	305	82	2,97	303	318	-0,19	1,60
Скв. 9 (1975—1976 гг.)	102	308	87,8	3,04	309	306	0,37	1,9
Скв. 9 (1977—1978 гг.)	97	312	125	3,58	309	324	-0,32	1,6
Скв. 8 (1975—1980 гг.)	433	306	64,1	2,6	300	313	-0,47	2,6
Скв. 9 (1975—1980 гг.)	393	312	93,3	3,1	307	319	-0,40	2,0

что, во-первых, наблюдаемая вариация изотопного отношения  $^{40}\text{Ag}/^{36}\text{Ag}$  во времени обусловлена подготовкой и свершенном землетрясения 6. 12. 77 г., во-вторых, влияние подготовки очага этого землетрясения стало раньше сказываться на водовмещающих и подстилающих водоносный горизонт породах в области питания скв. 9 (расстояние до эпицентра  $l = 25$  км) по сравнению со скв. 8 ( $l = 38$  км).

Анализ временного хода изотопного отношения  $^{40}\text{Ag}/^{36}\text{Ag}$  с помощью гистограмм в дальнейшем был продолжен. В случае построения распределений, начиная с временного интервала 1977—1978 гг., прибавлением образцов последующих лет получено постепенное заполнение впадин между максимумами и в итоге — распределение для обеих скважин к концу 1980 г. (рис. 22). Над построенными гистограммами стрелками с соответствующими номерами указаны землетрясения, представленные в табл. 2. Стрелки расположены в определенном порядке: их местоположение сопряжено с номером образца, измеренного в день землетрясения. Нам представляется, что здесь можно проследить следующую



нившиеся условия в распределении давлений и температур (Р-Т условия) от действующих очагов землетрясения.

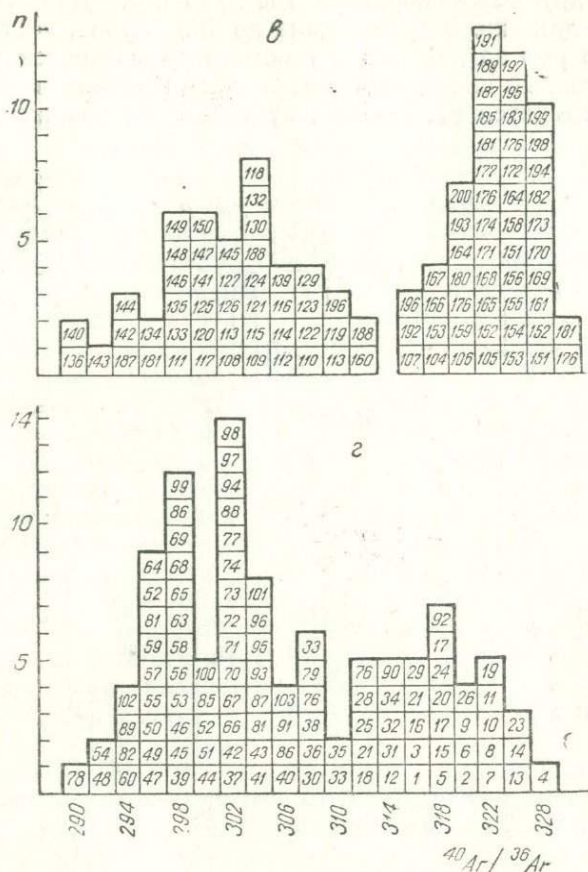


Рис. 21. Гистограммы изотопных отношений  $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$  в газах термоминеральных вод скв. 8 (а, б) и 9 (в, г). В квадратах указаны номера проб, соответствующие времени их отбора:

а-1÷144 за 1975-1976 гг., б-145÷225 за 1977÷1978 гг. для скв. 8; в-1÷103 за 1975÷76 гг.; г-№№ 104÷200 за 1977÷78 гг. для скв. 9.

Ниже даны полученные к настоящему времени соотношения между энергетическими параметрами, временем и областью подготовки очагов землетрясений.

Магнитуда землетрясений, $M$	Примерный размер очага, $l$ , км	Область подготовки землетрясения, $S$ , км <sup>2</sup>	Время подготовки землетрясения, $T$
5.5	5	400	5 мес.
6.0	15	1200	1 год
6.5	20-25	4000	2 года
7.0	35-55	12000	5 лет
7.5	60-100	40000	10 лет
8.0	250-550	120000	25 лет

Из этих данных для землетрясения 6.12.77 г. можно принять следующие значения: время подготовки — менее пяти месяцев, а область подготовки — порядка  $150 \div 200 \text{ км}^2$ . Данные анализа гистограмм для скв. 9 (расстояние до эпицентра  $l = 25 \text{ км}$ ) показывают, что уже за два года до момента землетрясения в аргоне имелся изотопный сдвиг, но все-таки достоверность в этом случае несколько сомнительна, поскольку скв. 9 расположена рядом с

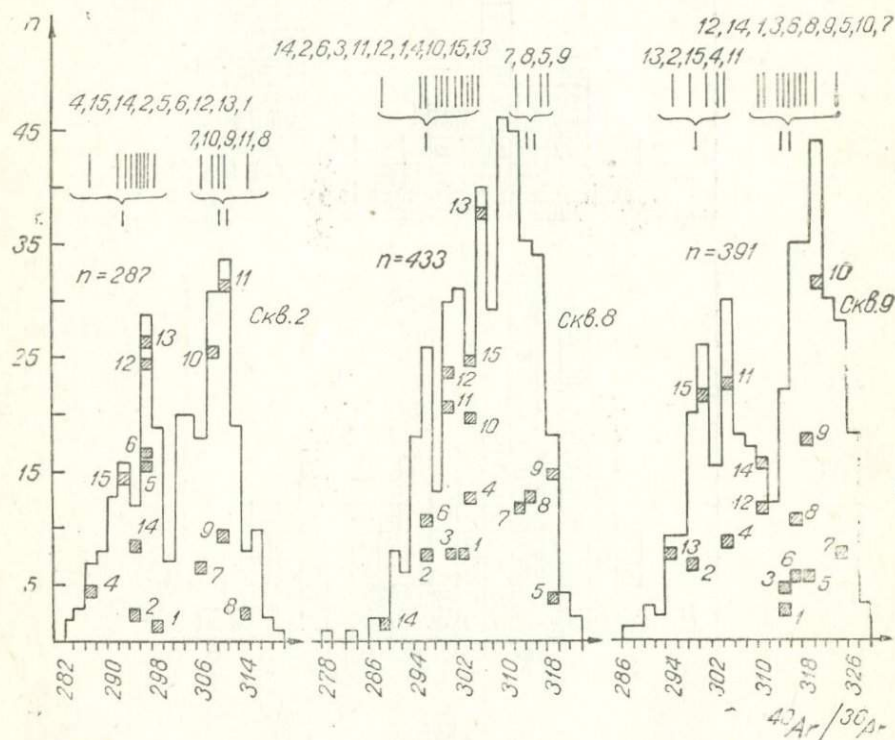


Рис. 22. Гистограммы изотопных отношений  $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$  в газах термоминеральных вод скв. 2, 8, 9 за период наблюдений 1975÷1980 гг.

разломом, который влияет на геохимические параметры этого объекта (123). Но из гистограммы для скв. 8 ( $l = 38 \text{ км}$ ) следует, что время подготовки рассматриваемого землетрясения — менее года, т. е. порядок величины согласуется с данными, приведенными выше.

Если построить концентрические окружности с центром в эпицентре землетрясения 6.12.77, то простая оценка  $\{S = \pi(l_1^2 - l_2^2)\}$ , где  $l_1 = 38 \text{ км}$ ,  $l_2 = 25 \text{ км}$  } показывает, что к моменту землетрясения область подготовки  $S \approx 2500 \text{ км}^2$ . Найденная величина

сравнима с площадью подготовки землетрясения с  $M \approx 6,0$ . Различие в величине магнитуды можно объяснить, с одной стороны, простотой расчетов, с другой — высокой чувствительностью изотопных эффектов в химии землетрясений. Возможно, в этой оценке присутствуют элементы еще не познанного механизма передачи энергии от готовящегося очага землетрясения.

Имея сведения об изотопных отношениях благородных газов, полученных для закрытых пор, микровключений минералов и пород исследуемого региона, можно составить представление о том, вклад какого источника стал относительно большим, т. е. какие процессы привели к наблюдаемым изотопным сдвигам. В этой связи интересны исследования по изучению изотопов аргона в газах подземных вод в других сейсмоактивных районах Средней Азии. Был выбран Иссыккульский геодинамический полигон, отличающийся, как известно, высокой сейсмичностью. На этом полигоне в течение полевых сезонов 1975—1980 гг., в основном в летнее время, опробовались скважины Иссыккульского артезианского бассейна. Ценность этих исследований также и в том, что разработанная методика отбора проб и измерений проверялась на объектах с другим химическим и газовым составом.

Иссыккульский артезианский бассейн отличается от других межгорных артезианских бассейнов Средней Азии замкнутостью и отсутствием существенного подземного и поверхностного стока, положением в центре горно-складчатой области Северного Тянь-Шаня и наличием озера Иссык-Куль, заполняющего центральную часть бассейна. В геологическом строении района участвуют горные породы самого различного состава, свойства и происхождения — от жестких скальных пород протерозоя до рыхлообломочных четвертичных отложений.

В Иссыккульской впадине распространены многочисленные источники минеральных и термальных вод. Подавляющее их большинство приурочено к кислым изверженным породам нижнего палеозоя: гранитам, гранито-диоритам и т. д. Выходы минеральных вод Иссыккульской впадины в основном сосредоточены в Восточном Прииссыкулье, являющемся областью интенсивных тектонических движений.

За последние годы в пределах бассейна пробурено большое количество скважин. Мы исследовали воды термальных скважин, приуроченных к зонам разломов северного склона Терской-Алатау, южного склона Кунгей-Алатау, и Джергаланской депрессии. Обследовались месторождения минеральных вод курортов Джеты-Огуз, Аксу, Джергалан, а также скважины в пос. Долинка, гор. Чолпон-Ата, пансионата «Геолог» и ист. Алтин-Арошан.

Подробные геологические и гидрогеологические сведения об изучаемом районе достаточно полно изложены в работах П. И. Чалова и др. (127), Н. И. Катаевой и др. (129), П. Г. Григоренко (130), В. Н. Васильевой (131). Отметим только, что воды курортов Джеты-Огуз и Аксу приурочены к зоне крупного Терскойского

разлома, простирающегося в северо-восточном направлении по границе древних гранитоидов с осадочной метаморфической толщей палеозоя. Глубина скважин Аксу до 210 м, температура воды  $56 \div 58^\circ\text{C}$ , состав воды сульфатно-хлоридно-натриевый. На месторождении Джеты-Огуз глубина скважин варьирует от 70 до 520 м, с температурой на устье от 23 до  $39^\circ\text{C}$ . Химический состав воды хлоридно-натриево-кальциевый с минерализацией до 12 г/л. Скважины курорта Джергалан пробурены в четвертичных и верхнеплиоценовых отложениях, на глубине порядка 1500 м, температура воды  $35 \div 43^\circ\text{C}$ , минерализация около 1 г/л, состав воды хлоридно-натриевый.

Как показали измерения, практически во всех изученных пробах присутствует радиогенный аргон, причем в пробах из скв. 6 и 9 месторождения Джеты-Огуз концентрация  $^{40}\text{Ar}_{\text{рад}}$  достигает 20%. Кроме того, сама концентрация  $^{40}\text{Ar}_{\text{рад}}$  меняется во времени (рис. 23). По нашему мнению, наблюдаемые изменения могут быть результатом подготовки и свершения крупного сейсмического события — землетрясение в Тюпском районе Иссыккульской области, происшедшее 25.3.78 в 0 час. 30 мин. по Гринвичу, с магнитудой  $M = 6,3$ . Эпицентр землетрясения находился в 60 км к северо-востоку от г. Пржевальска и в 80—90 км от места наблюдательных скважин Джеты-Огуз.

Поведение тренда измеренных концентраций  $^{40}\text{Ar}_{\text{рад}}$  не противоречит нашей рабочей гипотезе, основу которой составляет выход из пород при лавинном трещинообразовании ранее захороненного от распада  $^{40}\text{K}$  радиогенного аргона. Этим механизмом объясняются получившиеся «букты». Спад концентрации  $^{40}\text{Ar}_{\text{рад}}$  после землетрясения можно трактовать, по-видимому, процессом «залечивания» микротрещин, хотя этот процесс может протекать и длительное время, на что указывают характер тренда  $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$  для скв. 5, а также результаты, полученные на Ташкентском геодинамическом полигоне. Здесь, пожалуй, необходимо отметить сходство установленных нами зависимостей с зависимостями, наблюдающимися в лабораторных условиях при экспериментах по выделению благородных газов из природных минералов в случае измельчения образцов, а также в экспериментах типа «темперинг» (132—134).

Поставив наблюдения за вариациями изотопов аргона в газах термоминеральных вод, мы исходили из того, что газохимические аномалии, появляющиеся за время действия очага землетрясения (сюда входит время подготовки, свершения и последствия), должны сопровождаться изотопными сдвигами ряда элементов и в том числе изменениями в изотопных отношениях аргона. В основе гипотезы изотопных сдвигов Ar лежит предположение, что энергия готовящегося очага по какому-то механизму (определенный вклад, очевидно, вносят ультразвуковые колебания, появляющиеся при трещинообразовании) переносится в область пород, имеющих контакт с водоносным горизонтом и в конечном счете с водой

наблюдательной скважины. Поскольку изотопные сдвиги в Аг мы наблюдаем экспериментально и связываем этот факт с сейсмическими событиями на геодинамическом полигоне, вполне логичным будет предположение, что передаваемая от очага энергия может быть сравнима с энергией активации миграции (ЭАМ)

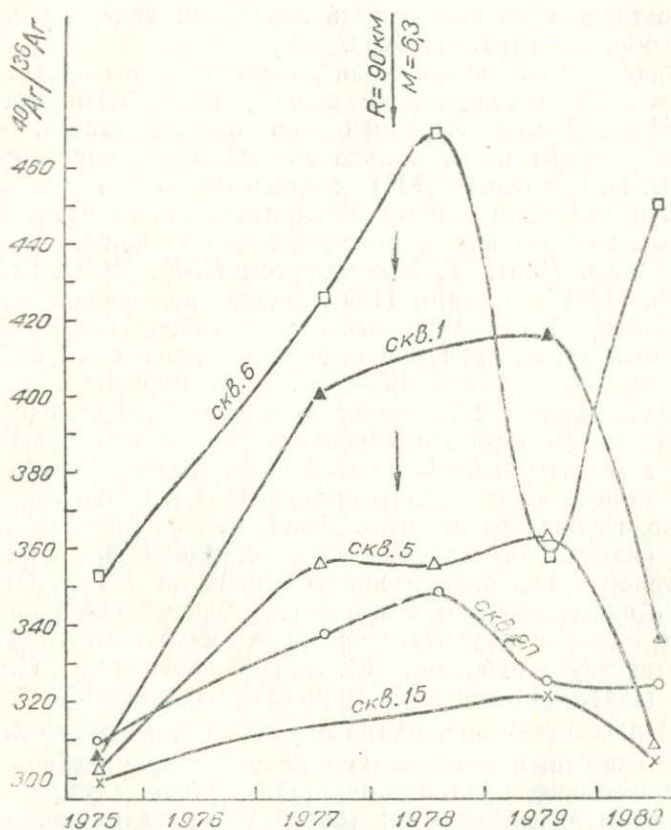


Рис. 23. Изменение  $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$  во времени в скв. 1, 5, 6, 15 и 20 месторождения Джеты-Огуз за период 1974÷1980 гг.

атомов благородных газов (для  $^{40}\text{Ar}$  это составляет  $15 \div 130$  ккал/моль).

Основой современной модели очага землетрясения, развиваемой в ИФЗ АН СССР, а также американскими учеными, служит представление о накоплении во времени мелких разрывов и их последующее кооперативное развитие при достижении критических концентраций. Исходя из этого, может возникнуть вопрос, какие фазы действия очага землетрясения могут повлиять на механизм миграции атомов благородных газов, в частности аргона,

что в конечном счете отразится на их концентрации и изотопном составе. Несомненно, процесс активного трещинообразования в породах во время формирования очага землетрясения способствует выходу из пород и минералов аргона-40, что обуславливает появление, подобно процессам в хроматографии, некоторой зоны его повышенной концентрации. Эту информацию в нашем эксперименте поставляет на поверхность подземная вода, выполняющая роль своеобразного транспортера.

Для дальнейшего обсуждения данного вопроса представляется полезным дать историческую справку об изучении аргона  $=40$  в гидросфере Земли. Первоначально предполагалось, что весь аргон гидросферы имеет только атмосферное происхождение, и модель В. П. Савченко (135) хорошо объясняла это. Подтверждали это мнение и первые экспериментальные изучения газов природных вод различных районов земного шара, проведенные G. Voato и др. (136), Г. Вассербургом (137), В. И. Виноградным и др. (138) и другими (139). Однако дальнейшие исследования показали, что в природных водах может присутствовать и радиогенный аргон, причем в отдельных случаях его содержание составляло 80% и более (140—142). А. Н. Воронов и В. В. Тихомиров (143) провели статистический анализ 2000 экспериментальных определений аргона в пластовых водах различных районов СССР. Результаты анализа позволили им сделать заключение, что в водах помимо атмосферного присутствует и радиогенный аргон, возможно, глубинного происхождения. Можно предположить, что избыток радиогенного аргона  $=40$  в подземных водах обусловлен присутствием в них определенного количества калия. Ответ должен дать эксперимент, и возможность образования радиогенного аргона в водах в результате распада находящегося в них калия-40 отвергнута работами Ю. А. Шуколюкова и И. Н. Толстихина (144). Они для двух проб газа из пластовой воды (п-ов Челекен) рассчитали количество  $Ag_{\text{рад}}^{40}$ , который мог образоваться в воде с известным содержанием калия за время существования вмещающих пород ( $\approx 130$  млн. лет). В обоих случаях зафиксирован значительный избыток (более 90%) радиогенного аргона по сравнению с тем количеством, которое должно образоваться из растворенного в воде калия-40. Таким образом, можно сделать важный вывод: радиогенный аргон-40, как впрочем и гелий, попадает в подземные воды из пород, и их содержание в подземных водах определяется состоянием пород и, в первую очередь, Р-Т условиями — параметрами, важными для сейсмологии.

Вклады других источников — калийсодержащих минералов, осадочных пород, фундамента, мантии, очагов вулканической деятельности, глубинных разломов — оценить трудно, хотя попытки делались. Так, Л. К. Гуцало (145), проанализировав распределение изотопов He и Ar в термальных водах Курильских островов и Камчатки, предположил, что в изотопном балансе аргона термальных источников участвует аргон атмосферы и верхней мантии.

В этой же работе Л. К. Гуцало приводит отношение изотопов аргона для мантии Земли  $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar} = 334 \pm 13$ . С другой стороны, И. Н. Толстихин и др. (116, 117) на основе совместного анализа распространенности изотопов легких инертных газов в атмосфере, отношений  $\text{K/U} \approx 10^4$  в Земле и  $^3\text{He}/^4\text{He} = (2 \div 4) \cdot 10^{-5}$  в мантии получили диапазон возможных отношений  $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$  в мантии Земли —  $500 \div 1000$ . Г. С. Ануфриев (148, 149), используя экспериментально найденные корреляционные связи между величинами  $^3\text{He}/^4\text{He}$ ,  $^3\text{He}/^{20}\text{Ne}$ ,  $^3\text{He}/^{40}\text{Ar}$ ,  $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ ,  $^4\text{He}/^{40}\text{Ar}$  и других в образцах пород и газов мантийного происхождения, получил следующую картину распределения благородных газов в геосферах Земли.

Количество газов Земли, см	Мантия, %	Кора, %	Атмосфера, %
$^3\text{He}$ ; $4,9 \cdot 10^{17}$	99,98	0,008	0,0065
$^4\text{He}$ ; $1,6 \cdot 10^{22}$	92,0	8,0	0,13
$^{20}\text{Ne}$ ; $1,1 \cdot 10^{20}$	39,0	4,0	57,0
$^{36}\text{Ar}$ ; $4,0 \cdot 10^{20}$	65,0	4,0	31,0
$^{38}\text{Ar}$ ; $8,0 \cdot 10^{19}$	67,0	4,0	29,0
$^{40}\text{Ar}$ ; $1,4 \cdot 10^{23}$	64,0	9,0	27,0

На основе этих данных получены такие величины изотопных отношений аргона для мантии и земной коры: ( $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ ), кора =  $787,5$ ; ( $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ ) мантия =  $340 \pm 40$ .

Вопрос о значении величины изотопного отношения  $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$  (по данным разных авторов величина этого отношения лежит в пределах  $3,4 \cdot 10^{22} - 1,5 \cdot 10^{24}$ ) важен с той точки зрения, что появляется возможность, исходя из наблюдаемых в эксперименте величин, оценить вклад коры и мантии в общий аргоновый поток.

Очевидно, по данным, полученным нами на Ташкентском геодинамическом полигоне, нельзя утверждать о «добавке» к аргону-40 некоторой доли мантийного аргона. Больше влияние, по видимому, оказала радиогенная компонента коры.

Об отсутствии аргона мантии говорят также результаты изотопного анализа гелия, которые выполнены на магнитном резонансном масс-спектрометре в лаборатории Б. А. Мамырина в ФТИ АН СССР. В пробах, отобранных нами в апреле — мае 1976 г. из скв. 9, изотопный состав гелия был  $^3\text{He}/^4\text{He} = (1,7 \div 4,0) \cdot 10^{-8}$ , т. е. налицо типичный радиогенный гелий, отличающийся на три порядка от гелия мантии  $^3\text{He}/^4\text{He} = (3 \div 1) \cdot 10^{-5}$  (150). Правда, надо учитывать, что указанные пробы отбирались в период свершившихся землетрясений в Газли (8.4.76 г. и 17.5.76 г.), ощущавшихся в Ташкенте с эффектом в 5 баллов, что, несомненно, способствовало выходу радиогенного гелия из пород (151).

Из-за отсутствия гелиевых изотопных данных сложнее трактовать результаты анализов в пробах Иссыккульского геодинамического полигона. Экспериментальные значения  $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$  расположены в диапазоне  $500 \div 475$  (см. рис. 23). Можно только предполагать вклад мантийного аргона в его общий поток, в основном

же мы склоняемся к тому, что эффект обусловлен реакцией коры.

**Соотношение  $^{36}\text{Ar}/^{38}\text{Ar}$ .** Исследованию соотношения аргона -36 и аргона-38 посвящено значительно меньше работ по сравнению с  $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ . В первую очередь, это связано с малым содержанием  $^{36}\text{Ar}$  и  $^{38}\text{Ar}$  в общем составе аргона (напомним, что в аргоне атмосферы Земли изотопы аргона имеют следующую распространенность:  $^{40}\text{Ar} = 99,6$ ;  $^{38}\text{Ar} = 0,063$ ,  $^{36}\text{Ar} = 0,337$ ). Кроме того,

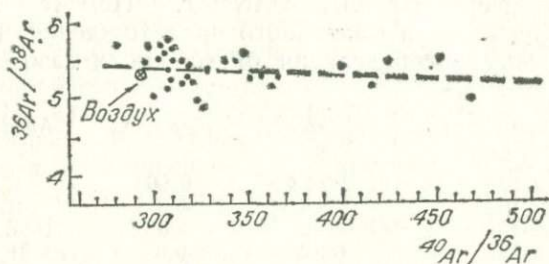


Рис. 24. Зависимость  $^{36}\text{Ar}/^{38}\text{Ar}$  от  $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$  в образцах газа подземных вод Ташкентского и Исыккульского геодинамических полигонов.

из-за относительно большого содержания аргона в атмосфере ( $\approx 1\%$  по объему) при отборе образцов для анализа всегда имеется возможность их контаминации с аргоном воздушным. И, конечно, не последнюю роль в сложностях интерпретации экспериментальных результатов играет неоднозначность образования  $^{38}\text{Ar}$  и  $^{36}\text{Ar}$  в геохимических объектах, что значительно затрудняет анализ экспериментальных данных.

В работах И. Н. Толстихина и др. (144), В. В. Чердынцева (152) и других авторов обсуждалась возможность сдвига в соотношениях аргона-36 и аргона-38. Отмечена тенденция к некоторому уменьшению отношения  $^{36}\text{Ar}/^{38}\text{Ar}$  с увеличением отношения  $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ . Подобный эффект наблюдался и в проведенных нами экспериментах. На рис. 24 представлены результаты наблюдений за величиной  $^{36}\text{Ar}/^{38}\text{Ar}$  в образцах газа, отобранного на Ташкентском и Исыккульском геодинамических полигонах за весь период наблюдений.

В рамках предлагаемой нами гипотезы о выходе радиогенных газов из вновь образуемых трещин в моменты «жизнедеятельности» очага землетрясения полученный ход зависимости  $^{36}\text{Ar}/^{38}\text{Ar}$  от  $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$  можно объяснить двояко. С одной стороны, уменьшение отношения  $^{36}\text{Ar}/^{38}\text{Ar}$  может быть обусловлено тем, что в результате ядерных реакций, ответственных за создание аргона-36 и аргона-38 в породах и минералах земной коры, относительное количество образуемого  $^{38}\text{Ar}$  больше по сравнению с  $^{36}\text{Ar}$ . Такое объяснение небезосновательно, к примеру, в газе не-

которых элементов обнаружено  $^{36}\text{Ar}/^{38}\text{Ar} = 0,02$ , что в 1000 раз меньше нормального (141).

С другой стороны, преимущественный выход из пород аргона-38 по сравнению с аргоном-36 на первый взгляд маловероятен. Представляется, что для решения этого интересного вопроса — изотопного сдвига в соотношении изотопов  $^{36}\text{Ar}/^{38}\text{Ar}$  — необходимы дальнейшие эксперименты, постановка прецизионных определений отношений  $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$  и  $^{36}\text{Ar}/^{38}\text{Ar}$  наряду с тщательным усовершенствованием методики отбора проб.

В. В. Чердынцев и др. (152—155) провели серию исследований по обнаружению обратного сдвига в изотопном отношении  $^{36}\text{Ar}/^{38}\text{Ar}$ , т. е. эффекта обогащения аргоном  $\approx 36$ . Идея этих работ состояла в обнаружении земных объектов, которые могли бы сохранить захваченный аргон древней атмосферы. Считается, что в первичных газах Земли, участвовавших в создании начального состава атмосферы, соотношение изотопов аргона было следующим:  $^{36}\text{Ar}/^{38}\text{Ar} = 5,6 \div 6,1$ ;  $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar} \approx 10^{-4}$ . В. В. Чердынцеву с сотрудниками удалось доказать, что некоторые древние минералы — шунгиты — содержат избыток  $^{36}\text{Ar}$  до 3%, а в газах некоторых фумарол Камчатки и Курильских островов его избыток достигал 6%, и такое обогащение при изучении глубинных газов авторы считают указанием на вынос глубинного, мантийного вещества. Подобные исследования, несомненно, должны сопровождаться определением изотопного состава гелия  $^3\text{He}/^4\text{He}$  (151).

В полученных нами значениях  $^{36}\text{Ar}/^{38}\text{Ar}$  мы не обнаружили данных об избытке какого-либо из изотопов. Кривая распределения отношений  $^{36}\text{Ar}/^{38}\text{Ar}$  имеет хорошо выраженный максимум, соответствующий медиане 5,40, а в интервал значений  $5,20 \div 5,50$  попадает более 80% исследованных образцов.

Соотношение  $(^4\text{He}/^{40}\text{Ar})_{\text{рад}}$ . Гелий и аргон непрерывно образуются во всех породах Земли, первый — в основном из урана и тория, а аргон, как упоминалось выше, — из калия-40. Величина  $^4\text{He}/^{40}\text{Ar}$  определяется отношением скоростей их накопления. Для большинства кристаллических пород Земли  $^{40}\text{K}/\text{U} = 1$ ,  $\text{Th}/\text{U} = 3,8$  и тогда  $^4\text{He}/^{40}\text{Ar}_{\text{рад}} \approx 7$  (135, 141). Отсюда ясно, что в зависимости от характера распределения радиоактивных элементов в породах, особенностей миграции радиогенных газов из минералов и геологической истории отношение  $(^4\text{He}/^{40}\text{Ar})_{\text{рад}}$  может меняться в широких пределах. Несомненно связь этого отношения с Р-Т-условиями, в которых находятся породы. В соответствии с этим можно трактовать данные И. Н. Толстихина и Е. Р. Друбецкого (156), которые для некоторых образцов с почти кларковыми отношениями материнских элементов  $(\text{U} + \text{Th})/\text{K}$  получили гелий-аргоновое отношение, близкое к таковому для калийных солей. Иными словами, в случае интенсивного разрушения (а применительно к нашей проблеме — активного трещинообразования) подобных образцов начнется потеря радиогенных изотопов, что приведет к аномальным значениям  $(^4\text{He}/^{40}\text{Ar})_{\text{рад}}$ . Точно так же одна и та

же порода с кларковыми отношениями радиоактивных элементов при сравнительно низких температурах будет преимущественно терять гелий, при последующем высокотемпературном воздействии ее покинет радиогенный аргон.

Интересно в этом плане сообщение Г. И. Войтова (157) об увеличении содержания радиогенного аргона в спонтанных газах Хибин. Ожидаемое отношение  $({}^4\text{He}/{}^{40}\text{Ar})_{\text{рад}}$  в породах Хибин при среднем для них содержании U и Th и 3% K должно быть около 7, в то время как измеренная величина дала значение на полтора порядка выше —  ${}^4\text{He}/{}^{40}\text{Ar} = 270$ . В этой же работе Г. И. Войтов сообщает, что соотношение между индивидуальными газами в струях резко нарушается при тектонических землетрясениях.

А. Н. Воронов и др. (158) на основании изучения величины  $({}^4\text{He}/{}^{40}\text{Ar})_{\text{рад}}$  на большом фактическом материале показали, что газы «молодых» тектонически активных регионов, в которых процессы дегазации проявляются наиболее интенсивно, характеризуются отношениями  $({}^4\text{He}/{}^{40}\text{Ar})_{\text{рад}} = 1 \div 3$ , в то время как в газах тектонически пассивных платформенных регионов отношение  $({}^4\text{He}/{}^{40}\text{Ar})_{\text{рад}}$  существенно выше ( $10 \div 20$ ) в силу преимущественных потерь  ${}^4\text{He}$  и высокой сохранности аргона породами.

Полученный в нашем эксперименте характер вариации отношения  $({}^4\text{He}/{}^{40}\text{Ar})_{\text{рад}}$  хорошо согласуется с вышеприведенной схемой тектонического состояния региона. Вычисленные значения  $({}^4\text{He}/{}^{40}\text{Ar})_{\text{рад}}$  (при этом полагалось, что  ${}^3\text{He}/{}^4\text{He} = 2 \cdot 10^{-8}$ ) показывают следующую вариацию: от  $5 \div 12$  (в периоды сейсмической активности) до 150 (во время сейсмического затишья). Последняя величина близка к значениям, полученным Ю. А. Шуколюковым и И. Н. Толстихиным (144) для свободно выделяющегося газа и газа, выделенного термо- и вакуумной дегазацией из воды, взятой в районе уранового месторождения. Поскольку породы Ташкентского геодинамического полигона характеризуются средними содержаниями U и Th (к примеру, содержание урана в подземных водах Приташкентского артезианского бассейна, по данным А. Н. Султанходжаева, С. У. Латипова (93) варьирует в пределах  $5 \cdot 10^{-7} \div 5 \cdot 10^{-6}$  г/л), остается предположить, что полученные вариации в величинах  $({}^4\text{He}/{}^{40}\text{Ar})_{\text{рад}}$  обусловлены сейсмической активностью на полигоне.

## Глава VII

### РЕЗУЛЬТАТЫ НАБЛЮДЕНИЙ ЗА ИЗОТОПНЫМ СОСТАВОМ УГЛЕРОДА В $\text{CO}_2$ В ГАЗАХ ПОДЗЕМНЫХ ВОД

#### Наблюдения на Ташкентском геодинамическом полигоне

В предыдущих работах А. Н. Султанходжаева и других сообщались результаты измерения  $\delta\text{C}^{13}$  в  $\text{CO}_2$  за период с 1974 по 1975 г. на Ташкентском геодинамическом полигоне. Эти исследо-

вания были продолжены и в настоящем сообщении приводятся данные за период с 1976 по 1980 г. Под наблюдением находились основные скважины Ташкентского артезианского бассейна (рис. 25).<sup>\*</sup> На график нанесены сейсмические события, и, как видно, изотопный состав углерода ( $\delta C^{13}$ ) «откликается» на эти события. Характер вариации величины  $\delta C^{13}$  перед землетрясением не всегда одинаков, но общая закономерность не отличается от той, которая установлена в предыдущих работах: в основном в период подготовки очага землетрясения углерод углекислого газа утяжеляется изотопом  $^{13}C$ , а непосредственно перед толчком и спустя некоторое время после него происходит «облегчение» углерода  $CO_2$  и величина  $\delta C^{13}$  достигает фоновых значений.

Как видно, наблюдения за изотопным отношением  $^{13}C/^{12}C$  велись на нескольких скважинах Ташкентского артезианского бассейна. Различные фоновые значения величин  $\delta C^{13}$  для каждого объекта обусловлены разной геологией области газового питания данной скважины. Мы это подчеркиваем, поскольку в основном все наблюдательные скважины вскрыли сеноманский горизонт. В ряде случаев наблюдается синхронное изменение величины  $\delta C^{13}$  по всем опробованным скважинам. В эти моменты можно предполагать возможность землетрясения в том или ином направлении, ибо все наблюдательные пункты (см. рис. 1) расположены в направлении с северо-востока на юго-запад. В литературе довольно часто обсуждалась проблема влияния приливных эффектов на газовые потоки из глубин Земли. Так, А. И. Тугаринов и С. С. Сардаров (159) сообщили о хорошей корреляции гелиевого и аргонового потоков с «приливо-отливными деформациями». Причем, в этом эксперименте максимальная интенсивность выделения глубинного газового потока (He и Ar) приходилась синхронно на новолуние и полнолуние, а минимальная, соответственно — на лунные квадратуры.

С другой стороны, И. Н. Яницкий и др. (160), изучая изменение гелиевого потока в связи с афтершоками землетрясения 28÷29. 7. 1976 в Грозном, выявили короткопериодические импульсные вариации потока He, в которых, однако, не проявилась строгая ритмичность, описанная в (159). По мнению И. Н. Яницкого и др., полученные короткопериодические импульсные вариации гелиевого потока обусловлены «взаимосвязью между давлением гелиеносного флюида и условиями его разгрузки в верхних горизонтах с импульсными современными сейсмодислокациями и тектоническими движениями».

Было бы интересно оценить влияние приливных эффектов на поток углекислого газа и заодно посмотреть изменение  $\delta C^{13}$  в  $CO_2$ . Для этого в марте — апреле 1976 г. в отделе гидрогеосейсмологии был проведен эксперимент, в ходе которого из скв. 9 ежесуточно через каждые четыре часа отбирали пробы газа.

<sup>\*</sup> Отсутствие некоторых данных по  $\delta C^{13}$  объясняется техническими причинами.

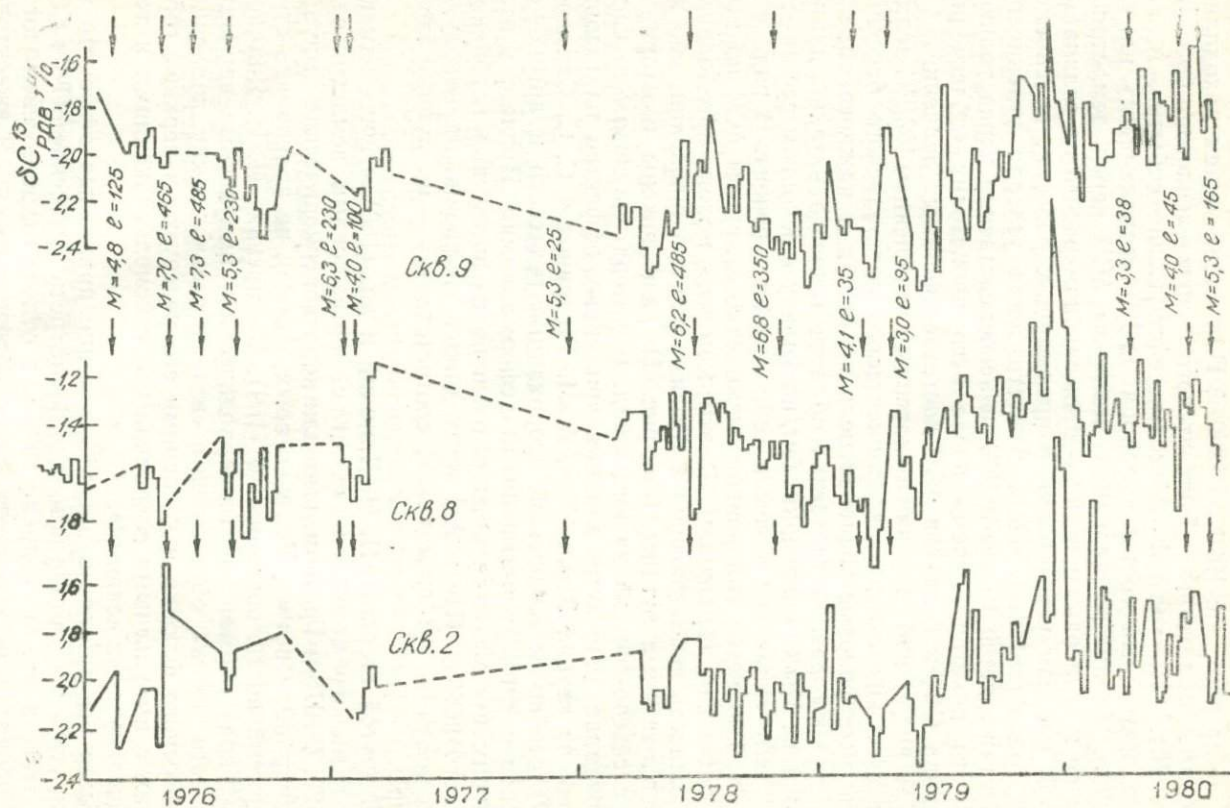


Рис. 25. Изменение  $\delta C^{13}$  в  $CO_2$  подземных вод скв. 2, 8, 9 за период наблюдений 1976÷1980 гг.

Результаты измерений концентрации углекислого газа (это производилось на хроматографе) и  $\delta C^{13}$  в этом углекислом газе показаны на рис. 26 (сплошные линии — среднесуточные значения, кружки и треугольники — средние за неделю). Как видно, средние недельные значения концентрации как  $CO_2$ , так и  $C^{13}$  в пределах ошибки эксперимента можно считать неизменяющимися, в то время как в последовательности суточных значений отмечаются короткопериодические вариации. На графике показаны квадра-

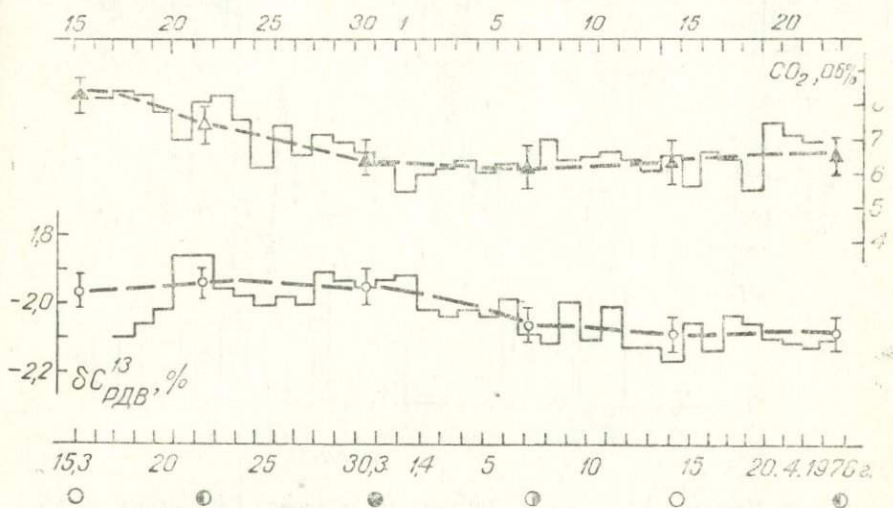


Рис. 26. Изменение во времени концентрации  $CO_2$  и  $C^{13}$  в скв. 9 за март—апрель 1976 г. (пробы газа отбирали шесть раз в сутки).

туры Луны за период наблюдений, и достаточно отчетливо видно, что синхронности с лунными фазами, о чем сообщал С. С. Сардаров, нет. Возможно, синхронность, как суточная, так и недельная, была нарушена эффектом Газлийских землетрясений. Нам представляется, что подобный эксперимент необходимо провести в будущем, когда удастся отобрать пробы и измерить наблюдаемые величины непосредственно на скважине, т. е. в условиях, крайне приближенных к непрерывным измерениям.

### Наблюдения на Кызылкумском полигоне

В течение апреля — июня 1976 г. были отобраны пробы газа из скважин Туякачар и Джангельды, которые располагались в непосредственной близости от эпицентров Газлийских землетрясений 8 апреля и 17 мая 1976 г. Проведенные исследования представляют определенный интерес. Не вдаваясь пока в подробности характера изменений величины изотопного отношения  $^{13}C/^{12}C$ ,

можно отметить, что величина  $\delta C^{13}$  (рис. 27) варьирует, причем в отдельных случаях вариация достигает 0,8%.

Как видно из графика, пробы отбирались не в момент землетрясений, а в основном в период сильных афтершоков. Так что

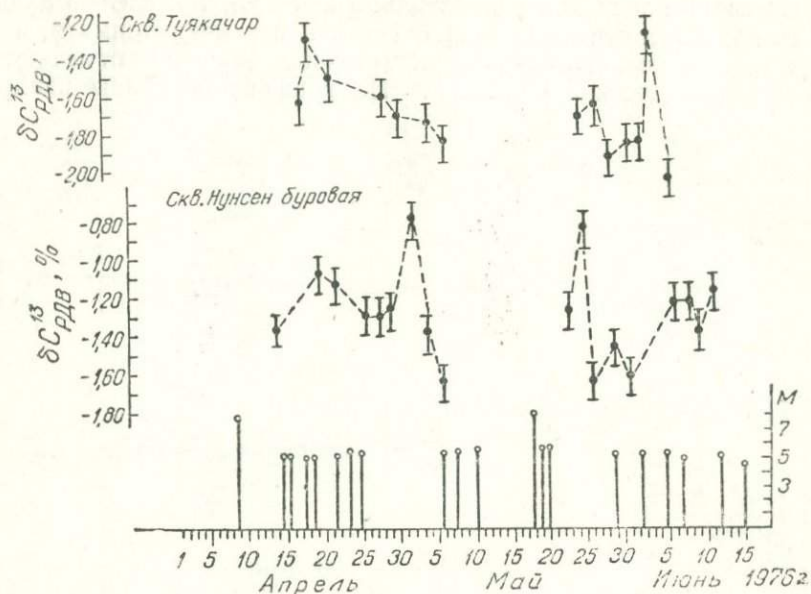


Рис. 27. Изменение  $\delta C^{13}$  в скв. Джангельды в период Газлийских землетрясений 1976 г.

можно только догадываться об истинных значениях величины вариации  $\delta C^{13}$ , особенно в момент подготовки этого крупного сейсмического события.

### Наблюдения на Иссыккульском полигоне

В течение полевых сезонов 1974—1980 гг. в основном в июле на территории Иссыккульского артезианского бассейна были отобраны пробы газа для изучения вариации изотопного отношения  $^{13}C/^{12}C$  в подземных водах этого бассейна. Была поставлена также цель отработать методику на принципиально другом в геологическом отношении полигоне, где часты сейсмические события.

На рис. 28 отчетливо видна сильная вариация величины  $\delta C^{13}$ , наиболее выраженная по скв. 20. Как мы писали выше, в это время произошло крупное сейсмическое событие на Иссыккульском полигоне — землетрясение 25 марта 1978 г. в Тюпском районе с магнитудой 6,3. Это дает нам основание полагать, что наблюдаемая вариация величины  $\delta C^{13}$  обусловлена подготовкой и свершением указанного землетрясения.

Выше мы отмечали, что имеющиеся публикации по изотопным сдвигам некоторых элементов неполны из-за того, что исследования часто проводились после землетрясений. Вопросу изотопных сдвигов в углероде в связи с сейсмичностью в последние годы посвящены работы Н. И. Хитарова и др., Г. И. Войтова, А. И. Фридмана, М. И. Кучера, А. И. Кравцова, В. С. Лебедева (120, 121, 161—164).

В основе рассуждений этих авторов о причинах вариаций изотопного отношения  $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$  при сейсмических событиях лежит следующее. Считается, что в литосфере существует изотопная зональность углерода (в  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$  и т. д.). При подготовке очага земле-

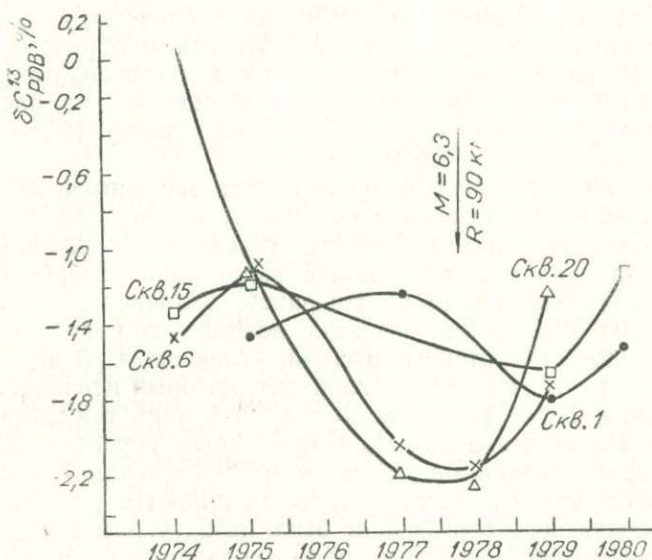


Рис. 28. Изменение  $\delta C^{13}$  в  $\text{CO}_2$  в водах скв. 1, 6, 15, 20 месторождения Джеты-Огуз за период 1974÷1980 гг.

трясения накопление упругих деформаций сопровождается возникновением большого числа трещин (это положение лежит в основе современной модели очага землетрясения), что немедленно сказывается на химическом и изотопном составе газов. Свершение землетрясения, при котором разрывается сплошность горных пород, приводит к спонтанной разгрузке того объема пород, который находился в зоне действия очага землетрясения. В этом случае можно ожидать поступления газов с различных глубин Земли.

Мысль о том, что в глубинах Земли имеется определенная зональность углерода (по изотопному составу), впервые высказали А. П. Виноградов и О. И. Кропотова (165), которые в

своих рассуждениях об эндогенном углероде предположили, что «постоянство изотопного состава этого углерода, малые его флуктуации указывают на определенную установившуюся область под земной корой, где в одинаковых условиях происходят эти процессы фракционирования от первичного состава земного углерода». В дальнейшем О. И. Кропотова (166) экспериментально изучила вопрос изотопного разделения в системе  $C-H_2O$ . В этом исследовании рассмотрена реакция взаимодействия графита с водой при давлении  $600 \div 615$  атмосфер и температуре  $500 \div 750^\circ C$ . В результате установлено обогащение углекислоты тяжелым изотопом углерода  $^{13}C$ . Величина  $\delta C^{13}$  углекислоты относительно графита в экспериментах колебалась от  $+0,02$  до  $+3,01\%$ . Кстати, теоретический расчет V. Bottinga (167) для равновесия  $CO_2-C$  дает величину изотопного сдвига в  $+1,01\%$ . Таким образом, исследования О. И. Кропотовой позволяют считать, что эндогенная углекислота ( $\delta C^{13} = -0,7\%$ ) должна образовываться из рассеянного элементарного углерода ультраосновных пород ( $\delta C^{13} = -2,5\%$ ) при температурах  $600-700^\circ C$ .

Возвращаясь к полученным в наших экспериментах данным, когда углерод  $CO_2$  обогащается тяжелым изотопом  $^{13}C$ , можно предположить, что в эти моменты углекислота подземной воды «разбавлена» значительной долей эндогенной углекислоты с ее  $\delta C^{13} = -0,7\%$ . Как видно из графиков, величина вариации  $\delta C^{13}$  достигает  $0,6 \div 1,2\%$ . Здесь может возникнуть вопрос о способе и времени доставки этой эндогенной углекислоты в верхние слои Земли, т. е. в тот водоносный горизонт, который исследуется в наших экспериментах. Представляется, что роль транспортера по-прежнему выполняет вода. По современным представлениям, область распространения жидкой воды простирается до глубин порядка  $20-25$  км, т. е. до тех глубин, где начинаются фазовые превращения воды: вода  $\rightleftharpoons$  пар. Может быть не случайно этот же интервал глубин является зоной основного количества коровых землетрясений нашей планеты.

В представленных нами экспериментальных результатах и в исследованиях других авторов содержания углерода в  $CO_2$  (его первоначальное утяжеление изотопом  $^{13}C$ , а затем облегчение) перед сейсмическим событием варьировали несколько дней. Такую быструю доставку эндогенной углекислоты в исследуемые подземные воды объяснить трудно. Здесь, очевидно, основную роль играют разломы земной коры.

Определенный вклад в изотопный сдвиг углерода углекислого газа, поднимающегося из глубин Земли, может внести углекислота газожидких включений. Г. Б. Наумов и др. (168) при микроскопических наблюдениях и последующем химическом анализе газожидких включений в кварцах самого различного генезиса установили, что в этих кварцах концентрация углекислоты достигает  $60 \div 80$  г/л; это во много раз превышает ее концентрацию в современных высокоуглекислых водах. С другой стороны, М. И. Кучер

и В. У. Мацапулин (1969) определили изотопный состав  $\delta C^{13}$  углекислоты газожидких включений в кварцах, получив значения от  $-0,49$  до  $0,56\%$ .

Растрескивание пород во время подготовки очага землетрясения, несомненно, открывает доступ к углекислоте газожидких микровключений и она начинает участвовать в геохимической «жизни» региона. Такие процессы нарушают зональное распределение углерода, что и фиксируется при экспериментальных наблюдениях за изотопным составом углекислого газа в подземных водах.

Мы рассмотрели экспериментальные результаты наблюдений за вариацией изотопных отношений аргона и углерода в газах, растворенных в подземных водах, проведенных на разных геодинамических полигонах Средней Азии за период с 1976 по 1980 г. Полученный материал позволил установить вариации изотопов аргона  $^{40}Ar/^{36}Ar$ , что явилось следствием активного трещинообразования в горных породах и выхода захороненного радиогенного аргона-40 в периоды подготовки очага землетрясения.

При землетрясении, происшедшем на Ташкентском геодинамическом полигоне 6. 12. 1977 с  $M=5,3$ , удалось проследить распространение «волны» повышенной концентрации  $^{40}Ar_{рад}$ , что в будущих исследованиях по прогнозу землетрясений, несомненно, поможет в выборе направления готовящегося очага землетрясения. При изучении вариации изотопов аргона установлена синхронность аргонного потока на наблюдательном полигоне, что также в будущем позволит определить идентичность сейсмических событий как на самом геодинамическом полигоне, так и сильных, но далеких землетрясений вне полигона.

Наблюдения за вариацией величины изотопного отношения  $^{13}C/^{12}C$  углерода углекислого газа исследованных подземных вод в основном подтвердили установленную ранее тенденцию к утяжелению углерода  $CO_2$  в период подготовки очага землетрясения с последующим облегчением к моменту толчка. Проведенный анализ зависимости амплитуды вариации  $\delta C^{13}$  от величины энергетического класса землетрясения ( $M$ ) и расстояния эпицентра до места наблюдения ( $l$ ) пока не позволил вывести эмпирическую зависимость (типа  $\delta C^{13} \approx M(l-x)$ ). Возможно, дальнейшие исследования дадут возможность накопить необходимый для этого статистический материал.

## СТАТИСТИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА ГЕОХИМИЧЕСКИХ ПРЕДВЕСТНИКОВ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ

Наиболее острый вопрос прогноза землетрясений — предсказание времени возникновения сильных землетрясений в том или ином пункте интересующей нас территории. В настоящий момент возможность предсказания времени, места и силы будущего землетрясения значительно усилилась благодаря обнаружению большого числа его предвестников.

Видное место занимают гидрогеосейсмологические предвестники, включающие в себя основные геохимические параметры подземных вод. В последние годы гидрогеосейсмологические наблюдения (при этом исследуются содержание в подземных водах гелия, водорода, радона и ряда других параметров) дали весьма полезную информацию о возможной сейсмической активности.

Гидрогеосейсмологические наблюдения основаны на систематических режимных наблюдениях за геохимическими параметрами подземных вод и дальнейшем рассмотрении изменяющихся во времени концентраций различных компонентов. Однако процесс изменения во времени измеренных параметров содержит флуктуирующую составляющую, что можно объяснить сложным механизмом поступления геохимических компонент в подземные воды. В связи с этим поиск прогностических аномалий в поведении геохимических предвестников требует статистической обработки гидрогеосейсмологической информации.

Со статистических позиций геохимические аномалии можно трактовать как закономерные, связанные с подготовкой очага землетрясения изменения статистических характеристик вариаций геохимических компонент во времени, таких как среднее значение, медиана, дисперсия, спектральная характеристика.

Представленная методика статистической обработки гидрогеосейсмологической информации опробована на примере данных об изменении концентрации газов  $N_2$ ,  $CO_2$ , He, Rn скважин 2, 3, 8 с 1973 по 1979 г. Эта методика, представляющая собой первый этап программы разработки алгоритмов статистического анализа гидрогеосейсмологических предвестников землетрясений, включает как

независимую обработку каждой из наблюдаемых компонент, так и совместный (многомерный) анализ их совокупности.

Однокомпонентная обработка заключалась в спектрально-временном анализе наблюдений, в результате чего определялись наиболее информативные частотные интервалы, затем проводились фильтрация и анализ наблюдений в выбранных диапазонах частот. Многокомпонентная обработка заключалась в применении линейного дискриминантного анализа к совокупности наблюдений за всеми компонентами (170—172).

Обрабатывались данные на ЭВМ, для чего разработан соответствующий пакет программ. Эта работа выполнена в отделе вычислительной геофизики ИФЗ АН СССР.

### СГЛАЖИВАНИЕ И СПЕКТРАЛЬНО-ВРЕМЕННОЙ АНАЛИЗ

Концентрация  $N_2$ ,  $CO_2$ ,  $Rn$  и  $He$  измерялась ежедневно и полученные значения значительно варьировали, что затрудняло визуальное сопоставление наблюдений с сейсмичностью.

Для точной характеристики устойчивых изменений концентрации газов необходимо «сгладить» наблюдения. Для этого обычно используется усреднение в пределах скользящего временного окна, которое описывается следующим математическим выражением:

$$y_t = \sum_{k=-m}^m a_k x_{t-k}, \quad (12)$$

где  $x_t$  — исходная кривая изменения концентраций,

$y_t$  — сглаженная кривая,

$a_k$  — весовые коэффициенты усреднения, выбираемые таким образом, чтобы соответствующая частотная характеристика была достаточно гладкой.

$2m+1=M$  — ширина скользящего окна, определяемая исходя из желаемого времени усреднения.

На рис. 29 приведены реализации наблюдения за весь анализируемый период, сглаженные согласно вышеприведенному алгоритму с эффективным временем усреднения 7 дней. Для выявления частотных диапазонов, содержащих наибольшую информацию о сейсмичности, к сглаженным реализациям можно применить спектрально-временной анализ (СВАН), который представляет собой фильтрацию исходного временного ряда совокупностью фильтров согласно формуле

$$S(f, t) = 2 \int_0^{\infty} H(\lambda - 2\pi f) k(f) e^{2\pi i \lambda f} d\lambda, \quad (13)$$

где  $k(f) = \sum_{t=0}^T u(t) e^{2\pi i f t}$  — спектр сглаженной кривой  $u(t)$ ;  $H(\lambda - 2\pi f t)$  — частотная характеристика фильтра с центральной час-

тотой  $f$ , где  $f$  дискретно меняется от 0 до  $F_{\max}$  — верхней границы анализируемого частотного диапазона. Результат применения СВАНа — диаграмма зависимости энергии сигнала от времени и частоты. Каждое ее горизонтальное сечение определяет временную зависимость мощности сигнала на выходе одного из фильт-

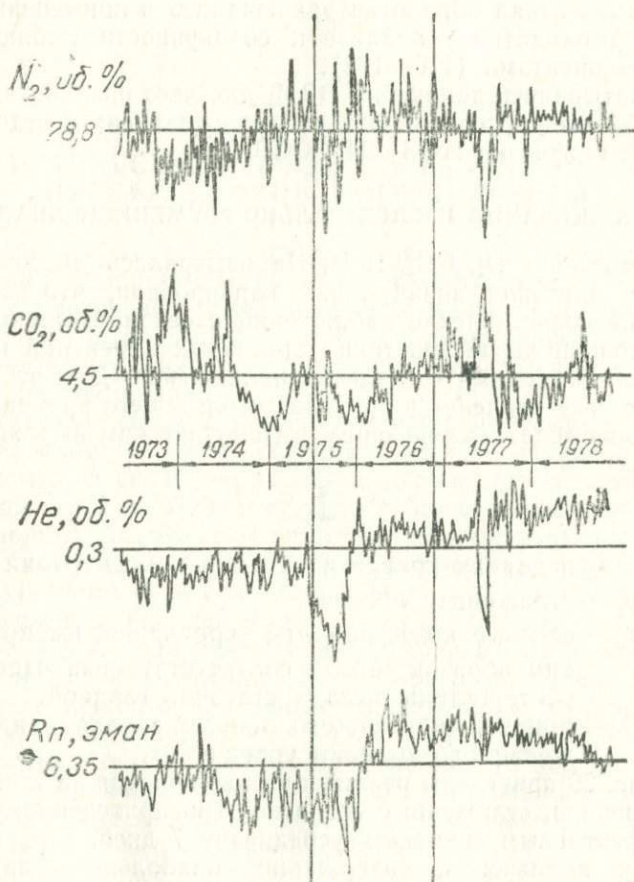


Рис. 29. Вариации концентраций  $N_2$ ,  $CO_2$ ,  $Rn$ ,  $He$  (усредненные данные) в скв. 3 за период наблюдений 1973–1978 гг.

ров. Периоды, соответствующие центральным частотам фильтров, указаны на диаграмме слева. Области, заштрихованные одним цветом, соответствуют одинаковым мощностям. Для обработки реализации СВАНа использовались двадцать четыре фильтра с гауссовыми частотными характеристиками

$$H(\lambda - 2\pi f) = c \exp \left[ -\alpha \left( \frac{\lambda - 2\pi f}{2\pi f} \right)^2 \right],$$

охватывающие диапазон частот, соответствующих периодам от 10 дней до 1,5 лет (рис. 30).

Нетрудно заметить достаточно высокую корреляцию в структуре всех СВАН-диаграмм. Два наиболее характерных пятна на всех СВАН-диаграммах расположены примерно в одних и тех же частотных и временных интервалах и находятся в низкочастотной области диаграмм. На более высоких частотах корреляции СВАН-диаграмм значительно меньшая. Таким образом, общие закономерности в изменениях концентрации всех газовых компонент наиболее отчетливо проявляются в низкочастотном диапазоне.

СВАН-диаграммы можно использовать для прогноза землетрясений по следующей методике. Если землетрясения предваряются локальными аномалиями в изменениях концентрации газов в подземных водах, то на СВАН-диаграмме мы должны увидеть в соответствующий момент времени повышение интенсивности какого-то спектрального компонента, т. е. по диаграмме можно судить о времени вступления соответствующего предвестника. Рассмотрим на примере составляющей СВАНа с периодом 24 дня, как можно обнаружить подобные изменения интенсивности и сопоставить их с землетрясениями. Для каждой составляющей  $N_2$ ,  $CO_2$ ,  $He$  и  $Rn$  введем порог и будем подавать тревогу по данной компоненте, когда ее концентрация превышает свой порог. Значения порогов выбираются исходя из среднего фонового уровня содержания данной составляющей. Таким образом, получаем функции индивидуальных тревог (рис. 31). Общая тревога объявляется в случае совпадения не менее, чем трех индивидуальных тревог. Функция общей тревоги сопоставлялась с сейсмичностью. Для этого из каталога землетрясений в среднеазиатском регионе были отобраны землетрясения трех категорий (см. табл. 2). В соответствии с рекомендациями, предложенными в Информаци-

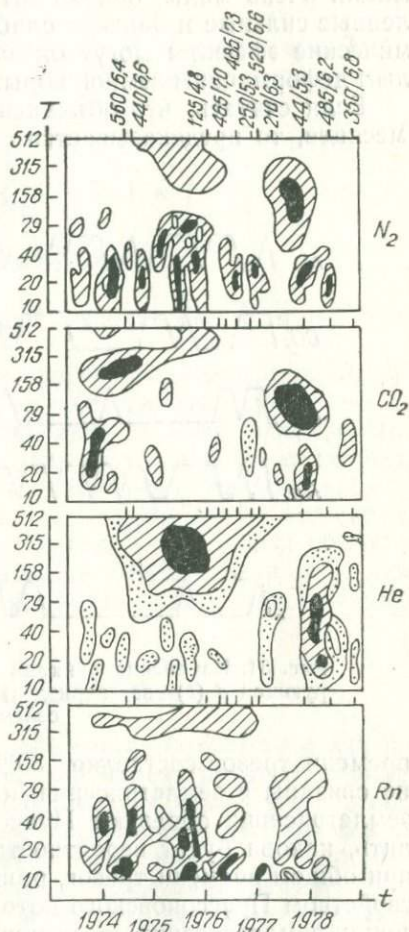


Рис. 30. СВАН-диаграммы для  $N_2$ ,  $CO_2$ ,  $He$  и  $Rn$ .

онном сообщении № 186, составленном В. И. Уломовым, выбирались землетрясения, эпицентры которых удалены от скважины на расстояния, превышающие размеры очага в 10, 20, 30 раз; коэффициент превышения размеров очага характеризует деформацию земной коры в месте наблюдения. При коэффициенте  $k > 20$  эти деформации очень малы, однако мы брали  $k = 30$ , т. е. учитывали отдаленные сильные и близкие слабые землетрясения, поскольку геохимические эффекты могут оказаться чувствительными к очень малым деформациям земной коры.

Если считать, что объявленная тревога длится в течение двух месяцев, то предсказывается 47% землетрясений. Доля общего

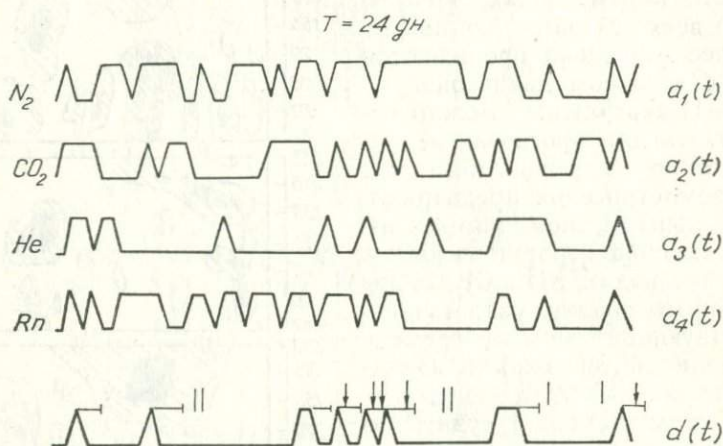


Рис. 31. Изменение функций тревог  $a_1(t) \div a_4(t)$  и результирующей  $d(t)$  за период 1973÷78 гг. и сопоставление их с сейсмичностью.

времени тревог составляет 30%. Если предположить, что тревоги не связаны с землетрясениями и объявляются случайно, а сами землетрясения образуют Пуассоновский поток, то можно вычислить, какова будет вероятность предсказания 47% землетрясений при общем времени тревог, равном 30%. Воспользуемся известным свойством Пуассоновского потока: если на отрезке длиной  $T$  произошли землетрясения, то моменты этих землетрясений статистически независимы и равномерно распределены на данном отрезке. Тогда условная вероятность каждого землетрясения попасть в какой-либо интервал тревог равна отношению суммарной длины этих интервалов к общей длине отрезка наблюдений

$$P = \frac{\sum_i \Delta t_i}{T}, \quad (15)$$

где  $\Delta t_i$  — интервалы ложных тревог.

Вероятность того, что в интервалы тревог попадет  $k$  из  $n$  землетрясений, происшедших на отрезке наблюдения, определяется биномиальным законом распределения (173):

$$P_n(k) = C_n^k p^k (1-p)^{n-k}, \quad (16)$$

который при  $n \geq 10$  можно аппроксимировать нормальным. Тогда вероятность случайного предсказания более чем  $m$  землетрясений из  $n$  происшедших определяется формулой

$$P_n^{(k>m)} = 1 - \Phi\left(\frac{\frac{m}{n} - P}{\sqrt{P(1-P)}} \cdot \sqrt{n}\right), \quad (17)$$

где  $m/n$  — доля предсказанных землетрясений,  
 $P$  — доля тревог.

Формула (17) по существу определяет вероятность того, что различие чисел  $m/n$  и  $P$  не случайное.

Из сказанного следует, что качество предсказания удобно характеризовать тремя параметрами — долей времени тревог, оценкой вероятности правильного предсказания землетрясений и статистической значимостью различия этих чисел, т. е. вероятностью того, что это различие не случайно. Качество предсказания в данном случае характеризуется числами 0,3; 0,47; 0,90, что свидетельствует о связи между землетрясениями и моментами объявления тревог. Однако связь эта, хотя статистически значимая, тем не менее недостаточно велика для получения практически эффективного прогноза землетрясений.

### ФИЛЬТРАЦИЯ НАБЛЮДЕНИЙ

Целесообразно сопоставлять с сейсмичностью наиболее информативные частотные составляющие, положение которых определяется спектрально-временным анализом. Выделить эти составляющие можно с помощью цифровой фильтрации наблюдений на ЭВМ, для чего необходимо синтезировать фильтр с заданной частотной характеристикой. Эта задача эффективно решается для рекурсивных минимально-фазовых фильтров, частотные характеристики которых описываются выражением

$$H(f) = \frac{k_0}{1 + \sum_{k=1}^m a_k e^{2\pi i f/k}}, \quad (18)$$

где  $a_k$  — коэффициенты, выбираемые из условий хорошей аппроксимации заданной частотной характеристики функцией. Процесс фильтрации описывается выражением

$$y_t = \sum_{k=1}^m a_k y_{t-k} + x_t, \quad (19)$$

где  $x_t$  — входной сигнал фильтра,  
 $y_t$  — выходной,  
 $m$  — порядок фильтра.

При анализе временных рядов концентраций газа  $N_2$ , He, Rn и  $CO_2$  был синтезирован высокочастотный цифровой фильтр 30

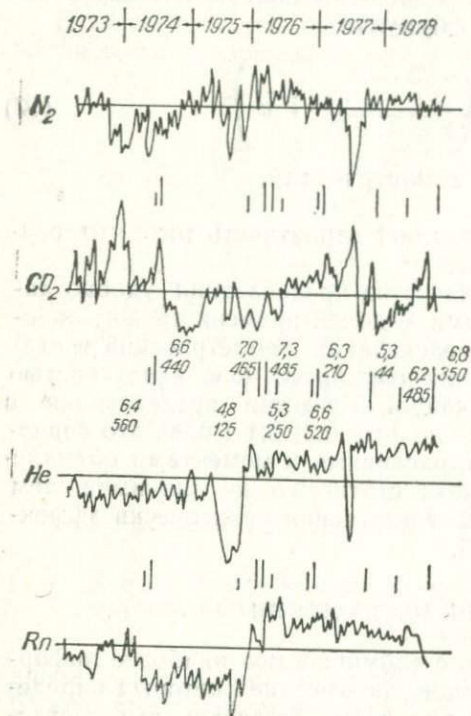


Рис. 32. Низкочастотные вариации концентраций  $N_2$ ,  $CO_2$ , He, Rn и их сопоставление с сейсмичностью за период 1973—1978 гг.

терную форму аномалии, имеющую прогностическую ценность для каждого землетрясения в отдельности, затруднительно.

### ЛИНЕЙНЫЙ ДИСКРИМИНАНТНЫЙ АНАЛИЗ

Для прогноза землетрясений необходимо иметь какую-либо решающую функцию, позволяющую объявлять тревогу при аномальном поведении совокупности наблюдаемых компонент.

Для проведения комплексной многомерной обработки наиболее эффективны методы теории классификации. В терминах теории классификации задачу прогноза землетрясений можно сформули-

порядка с амплитудно-частотной характеристикой, позволяющей выделять составляющие сигнала с периодом 30 дней и более. Результаты фильтрации всех газовых компонент для 8-летнего периода наблюдений приведены на рис. 32. Сопоставление графиков низкочастотных вариаций концентрации с сейсмичностью позволяет сделать следующие выводы.

1. По всем компонентам период малой сейсмичности (до 1976 г.) характеризуется более низким средним уровнем концентрации по сравнению с периодом высокой сейсмичности (1976—1978 гг.).

2. Перед началом сейсмического периода во всех компонентах проявляются длительные аномалии (с периодом порядка 0,5 года), заключающиеся в относительно резком увеличении концентрации газов, особенно He, Rn и  $N_2$ . Концентрации  $CO_2$  возрастают более плавно и с запаздыванием. В то же время выделить для каждой из компонент характерную форму аномалии, имеющую прогностическую ценность для каждого землетрясения в отдельности, затруднительно.

ровать следующим образом: по обучающим наблюдениям найти дискриминантную функцию, относящую текущий вектор наблюдений к одному из двух классов — «сейсмичному» (указывающему на возможность землетрясений) и «несейсмичному». Вектор наблюдений составляется из совокупности значений концентрации всех газов в данный момент времени, а обучающие наблюдения — из векторов, о которых априори известно, что они принадлежат к сейсмичному и несейсмичному классам.

Целесообразно ограничиться линейной решающей функцией (в большинстве задач более сложные функции не дают существенного улучшения классификаций)

$$L(\bar{x}) = x_1 + U + T, \quad (20)$$

где  $L(\bar{x})$  — линейная дискриминантная функция (ЛДФ),

$\bar{x}$  — классифицируемый вектор наблюдений,

$U$  — вектор коэффициентов ЛДФ,

$T$  — пороговое значение.

Вектор коэффициентов  $U$  линейной формы и пороговое значение определяются с использованием обучающих векторов по формуле

$$\bar{U} = c^{-1} (\bar{m}_1 - \bar{m}_2), \quad (21)$$

где  $\bar{m}_1$  — вектор средних обучающей выборки первого класса,

$\bar{m}_2$  — вектор средних обучающей выборки второго класса,

$c^{-1}$  — обратная матрица ковариаций обучающих векторов.

Пороговое значение вычисляется согласно формуле

$$T = \ln \frac{P_1}{P_2} - \frac{1}{2} (\bar{m}_1 + \bar{m}_2) \cdot c^{-1} \cdot (\bar{m}_1 - \bar{m}_2), \quad (22)$$

где  $P_1, P_2$  — априорные вероятности появления вектора первого и второго классов соответственно. В нашем случае в качестве сейсмичных обучающих векторов естественно выбирать векторы, соответствующие моментам, близким к датам землетрясений ( $\pm 15$  дней), а в качестве несейсмичных — моментам, удаленным во времени от землетрясений. Ясно, что выбор обучающих векторов неоднозначен, и для проверки устойчивости качества распознавания по отношению к этому выбору использованы два различных массива несейсмичных обучающих векторов. В первом случае они целиком относились к несейсмичному периоду (до 1976 г.), а во втором — частично выбирались в промежутках между землетрясениями в период повышенной сейсмичности. Таким образом, классифицируемый вектор  $\bar{x}_i$  будем относить к 1-му классу (сейсмическому), если  $L(\bar{x}_i) > 0$ , в противоположном же случае — ко 2-му (несейсмичному).

Графики значений линейных дискриминантных функций (с разными обучающими выборками), соответствующие всей последовательности многомерных наблюдений, приведены на рис. 33.

В форме этих графиков проявляются характерные особенности поведения всех четырех компонент. Особенно это заметно на графике первой дискриминантной функции. Видно, что эта функция ниже порога в период слабой сейсмичности и выше него в период повышенной. Резкое возрастание ее значений соответствует началу сейсмического периода. В течение сейсмического периода ЛДФ выше порога и в промежутках между землетрясениями, что, вероятно, свидетельствует о длительном периоде аномалий, связанных с подготовкой землетрясений. Это, очевидно, объясняет и гораздо более низкое качество распознавания при использовании второй линей-

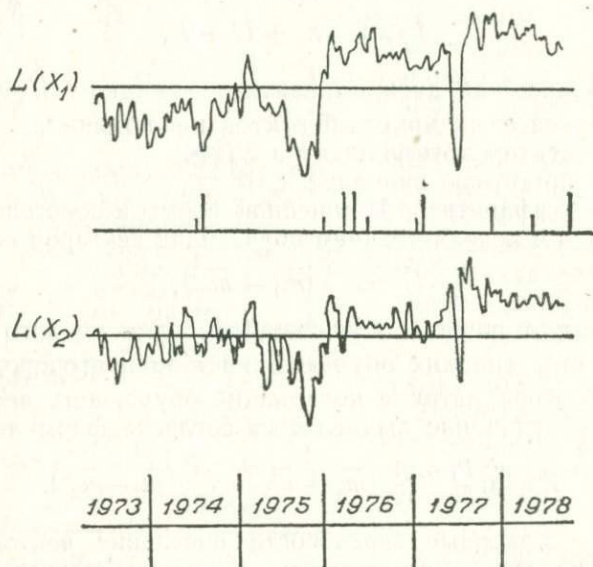


Рис. 33. Изменение во времени линейных дискриминантных функций  $L(x)$  (обучающие выборки у функций разные).

ной дискриминантной функции. Качество предсказания с помощью линейного дискриминатора оценивается трехмерным показателем: долей времени тревог, долей предсказанных землетрясений и статистической значимостью различия этих чисел. Для первого дискриминатора эти величины равны 0,53, 0,82, 0,97; для второго — 0,55, 0,64, 0,70.

Изложенные результаты относятся к низкочастотным составляющим колебаний концентраций и свидетельствуют о возможности предсказания длительных периодов высокой сейсмической активности.

## ОБРАБОТКА ГЕОХИМИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ ПО ТРЕМ СКВАЖИНАМ

В предыдущем изложении методика статистической обработки многокомпонентных геохимических данных (в данном случае обрабатывались четыре компонента —  $N_2$ ,  $CO_2$ , He и Rn) была применена к экспериментальным результатам, накопленным с мая 1973 г. по декабрь 1978 г. по скв. 3. Применение методики для прогноза отдельных землетрясений показало, что обнаруживается

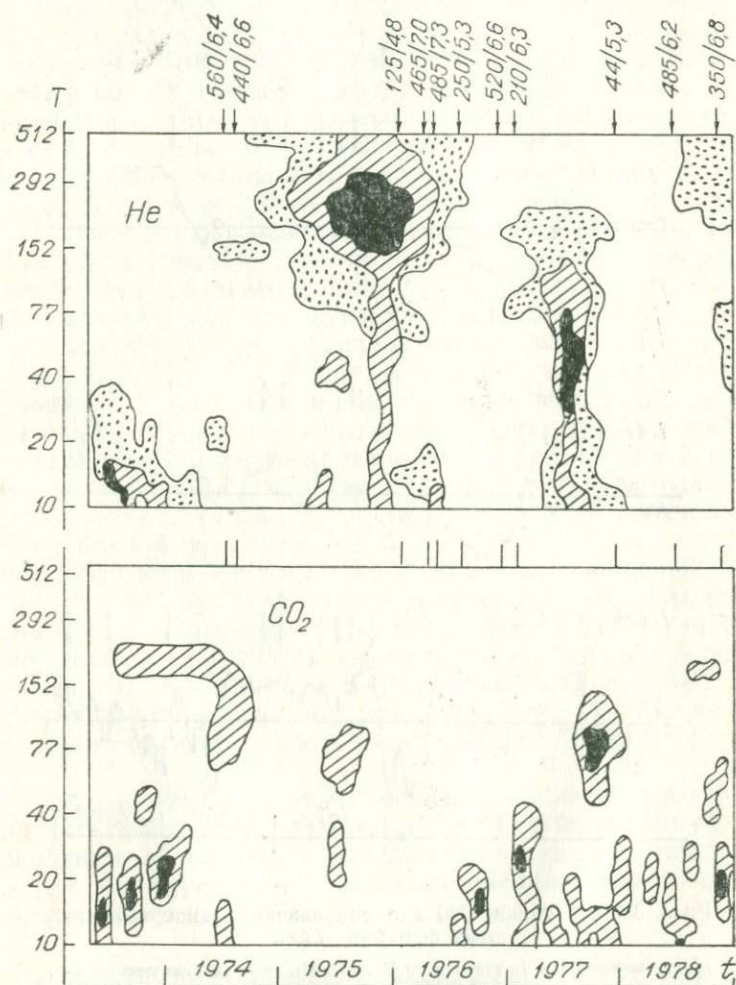


Рис. 34. СВАН-диаграммы для He и  $CO_2$  по скв. 8.

значимая связь отдельных сейсмических событий с локальными изменениями концентраций газов. Но достаточной надежности —

предсказания 47% землетрясений — эта связь не обеспечивала, что, по-видимому, объясняется тем, что в анализе использовались данные лишь одной скважины.

В дальнейшем исследовании к статистической обработке были привлечены экспериментальные данные по скважинам 2 и 8 за тот же период времени. Процесс изучения был тем же, единственное изменение внесено в методику сглаживания исходных экспериментальных данных. Сглаживание первичной информации производи-

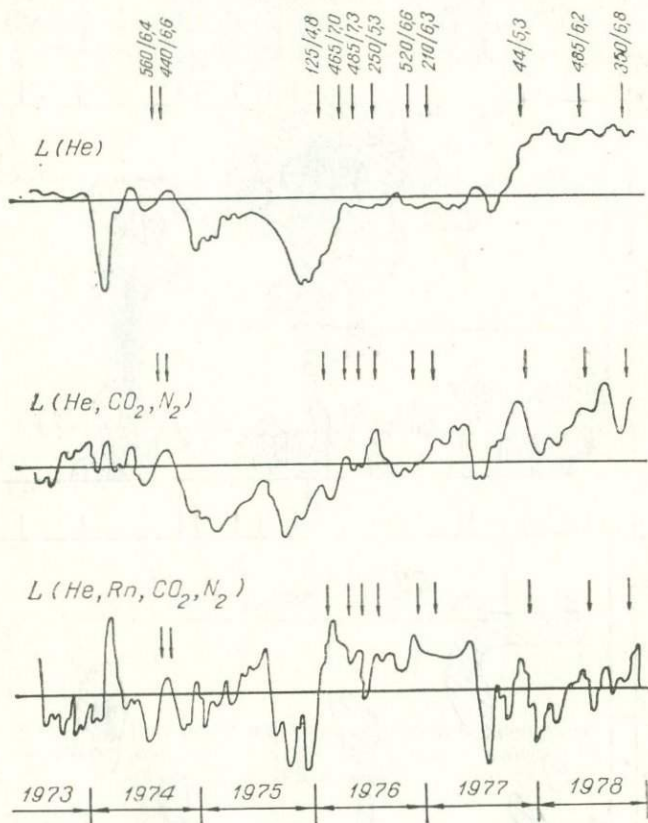


Рис. 35. Изменение во времени линейных дискриминантных функций  $L(x)$ .

$a$  — экзамен по He,  $b$  — экзамен по He,  $CO_2$ ,  $N_2$ ,  $\sigma$  — суммарная дискриминантная функция (12 компонент).

лось методом трехдневных медиан, который дает тот же характер сглаживания, что и метод усреднения в пределах скользящего окна, но методика медиан несколько сильнее реагирует на отдельные (2-, 3-дневные) выбросы в экспериментальных результатах.

Далее был произведен спектрально-временной анализ данных на ЭВМ получены СВАН-диаграммы для всех изученных геохимических параметров по трем указанным выше скважинам. Структура их в основе осталась прежней. Сохранились характерные пятна наибольших мощностей в области низких частот, но наряду с этим произошло заметное их смещение в область более высоких частот. Эти изменения в структурах СВАН-диаграмм хорошо видны на рис. 34, где показаны результаты спектрально-временного анализа по He и CO<sub>2</sub>. Отчетливо проявляется в случае СВАН-диаграммы для скв. 8 смещение в область высоких частот, а также появление новых пятен с большей мощностью для периодов от 10 до 20 дней.

Подробный анализ СВАН-диаграмм всех 12 геохимических компонент еще ждет своего применения, особенно в обнаружении связей аномалий с локальными сейсмическими событиями.

В дальнейшем к полученным массивам данных для трех скважин был применен линейный дискриминантный анализ. Линейные дискриминантные функции, полученные из обучающих наблюдений, подверглись своеобразному «экзамену». В результате получены линейные дискриминантные функции, например, по He для всех трех скважин. Кроме того, использовались комбинации: He, CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub> или Rn, CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub> и т. д. Характер функций менялся от экзамена к экзамену, отчетливо показывая, какая из геохимических компонент внесла улучшение или, соответственно, ухудшение в прогностическую кривую. Это хорошо иллюстрируют графики линейных дискриминантных функций  $L(x)$  (рис. 35). Внизу изображена суммарная прогностическая кривая  $L(He, Rn, CO_2, N_2)$ , полученная при анализе данных по трем скважинам.

Оценка качества предсказания с помощью суммарной прогностической кривой дает следующий трехмерный показатель: доля времени тревог составляет 52% от всего времени наблюдений, предсказано 100% землетрясений, статистическая значимость различия этих чисел — 0,98. Сравнение тройки чисел 0,52; 1,00; 0,98 с тройкой 0,53; 0,82; 0,97, полученной при обработке данных только по одной скважине, несомненно, свидетельствует об улучшении прогноза.

Необходимо отметить повышенное тревожное время — 52%. Однако, как показывают данные, из этих 52% тревоги 14% времени приходится на «ложные» предвестники, когда геохимические параметры реагируют на возникающие напряжения в толщах Земли, которые разряжаются без сейсмического толчка.

#### КОРРЕЛЯЦИОННЫЕ СВЯЗИ МЕЖДУ ГЕОХИМИЧЕСКИМИ КОМПОНЕНТАМИ ПОДЗЕМНЫХ ВОД

Процесс нахождения статистических связей между компонентами в гидрогеосейсмологических исследованиях — в целом принципиально нестационарная задача, так как этот процесс практически сводится к последовательному нахождению все новых и новых пор-

ций информации и часто, что особенно осложняет ситуацию, в условиях изменения сейсмичности изученного района. Это означает, что функция плотности распределения вероятностей и ее главные параметры — математическое ожидание  $M(x)$ , среднее значение  $\bar{x}$ , дисперсия и коэффициент корреляции  $r$  — будут изменяться в масштабе времени.

Для выявления связей между гидрогеосейсмологическими параметрами в настоящем исследовании рассчитаны коэффициенты парной корреляции (174), а затем вычисленные значения  $r$  просле-

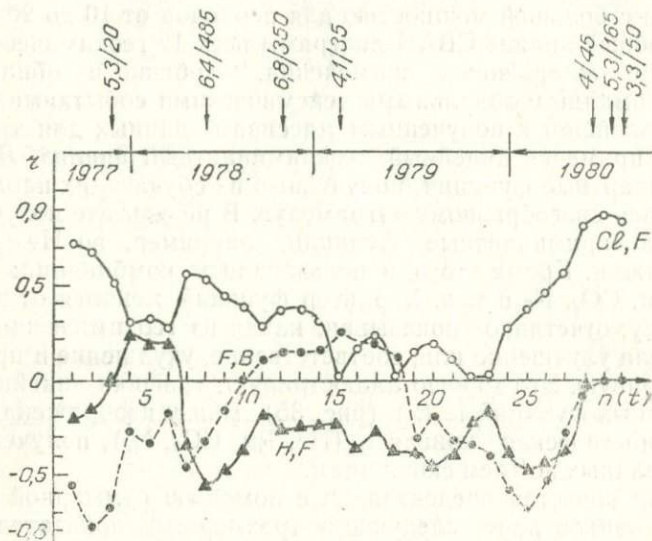


Рис. 36. Изменение во времени коэффициента корреляции  $r$ , вычисленного методом скользящего окна, по геохимическим параметрам скв. 9 за 1977÷1980 гг.

жены в масштабе времени. Коэффициенты корреляции рассчитывались с условием «скользящего окна» по формуле

$$r = \frac{\sum_{i=(k-1)l+1}^{(k-1)l+n} (y_i - \bar{y})(x_i - \bar{x})}{\sqrt{\sum_{i=(k-1)l+1}^{(k-1)l+n} (y_i - \bar{y})^2 \sum_{i=(k-1)l+1}^{(k-1)l+n} (x_i - \bar{x})^2}}, \quad (23)$$

где  $y_i$  и  $x_i$  — исследуемые гидрогеосейсмологические параметры,

$\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=(k-1)l+1}^{(k-1)l+n} y_i$  — среднее арифметическое значение одного параметра,

$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=(k-1)l+1}^{(k-1)l+n} x_i$  — среднее арифметическое значение другого параметра,

$n$  — число исследуемых параметров,

$l$  — число, задающее размер „окна“,

$k$  — управляющий параметр над скользящим „окном“.

Вычисления проводились по программе «процедура В», составленной на языке ФОРТРАН — IV для ЭВМ ЕС1020 с гидрогеосейсмологической информацией, полученной при исследованиях воды скв. 9. Временной интервал наблюдений занимает 3,8 года (с 19.1.77 по 1.9.80) и включает в себя 180 экспериментальных величин, каждая из которых находилась усреднением результатов наблюдений за тем или иным гидрогеохимическим параметром в течение недели. Параметры  $n$ ,  $l$  и  $k$  в формуле (23) выбирались следующим образом:  $n=35$ ,  $l=5$ ,  $k=1,2,3...$  Это означает, что коэффициенты парной корреляции вычислялись в выбранном заранее «окне» (внутри этого интервала располагались данные исследованных параметров за 10 месяцев наблюдений), и это «окно» сдвигалось с шагом в 35 дней. Временной размер «окна» выбран из следующих соображений. Опасность представляют землетрясения, магнитуда которых в очаге  $M \geq 5$ . По современным данным считается, что очаг землетрясения с  $M \approx 5,5$  готовится около 5 месяцев, соответственно, для  $M = 6$  время подготовки около 1 года.

Некоторые результаты вычислений парных коэффициентов корреляции в выбранных «окнах» приведены на рис. 36, где изображено изменение  $r(Cl, F)$ ,  $r(H, F)$ ,  $r(F, B)$  во времени. На рисунке стрелками отмечены моменты землетрясений, эффект которых на Ташкентском геодинамическом полигоне составлял не менее  $3 \div 4$  баллов. Среди этих событий есть землетрясения (см. табл. 2), совершившиеся непосредственно на полигоне. В эти периоды наблюдается тесная связь между приведенными геохимическими параметрами, что отражено в полученных значениях коэффициентов корреляции:

$r = 0,6 \div 0,8$ . Можно предположить, что наблюдения за величинами  $r$  и сопоставление их с сейсмичностью на полигоне обуславливают прогностический признак.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Гидрогеохимические аномалии прослеживаются по широкому спектру элементов-индикаторов, включая углерод, азот, водород, химически нейтральные радиогенные газы — гелий, аргон, радиоактивные уран, радон, изотопные отношения  $U^{236}/U^{238}$ ,  $C^{13}/C^{12}$ ,  $Ag^{40}/Ag^{36}$ , а также макро-и микрокомпоненты: фтор, бор, хлор, величины  $Eh$ ,  $pH$  и др. Эти изменения периодические и коррелируют с активностью тектонических процессов, что экспериментально доказано исследованиями, проводимыми на Ташкентском геодинамическом полигоне на примере сильных землетрясений.

Гидрогеохимические показатели по степени их химической активности и различиям в миграционной способности можно разделить на индикаторы, предшествующие и сопутствующие тектоническим землетрясениям. К первым можно отнести инертные газы (гелий, аргон, радон), водород, азот, двуокись углерода и их изотопы, отдельные макро-и микрокомпоненты: хлор, фтор, ртуть, бор, которые при смене термодинамической обстановки и под действием различных физических факторов способны переходить из раствора в газообразное состояние, а также из адсорбированного состояния в жидкость, тем самым увеличивая свою миграционную способность. Ко вторым — радиоактивные элементы (уран и его изотопы), макрокомпонентный состав и минерализацию подземных вод.

Надежность предвестника зависит от величины предстоящего землетрясения, геолого-тектонического строения, механизма будущего очага и его расстояния до пункта наблюдения. Предшествующие землетрясениям гидрогеосейсмологические аномалии обусловлены упругими напряжениями, вызывающими деформации горных пород, связанные с подготовкой землетрясений.

На примере сильных землетрясений удалось выявить некоторые закономерности вариаций изучаемых параметров, найти корреляционную связь основных величин наблюдаемых аномалий с данными землетрясений. Амплитуда и время проявления (длительность) аномалий в содержаниях газов (а также других индикаторов) являются функцией от магнитуды и эпицентрального

расстояния готовящихся землетрясений, а также от особенностей сеймотектонического строения исследуемого региона.

Экспериментальный материал, накопленный по результатам систематических режимных наблюдений на Ташкентском геодинамическом полигоне за вариациями изотопов углерода ( $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ ) и аргона ( $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ ,  $^{36}\text{Ar}/^{38}\text{Ar}$ ) в газах, растворенных в подземных водах, показал, что изотопные характеристики — чуткие индикаторы современных тектонических движений. Показатель изотопного состава элементов — наиболее устойчивая характеристика исследуемых компонент, идущих из глубин Земли. Наблюдаемые изотопные сдвиги отражают качественно иное состояние как самих изучаемых компонент, так и всего комплекса пород, участвующих в сейсмической жизни геодинамического полигона.

Представляется, что данные по изотопным характеристикам водорода, кислорода и гелия наряду с другими геохимическими исследованиями подземной гидросферы внесут определенный вклад в создание физико-химической модели очага землетрясения.

Как показывает опыт, положительные результаты прогноза землетрясений можно получить при систематических комплексных наблюдениях за вариациями гидрогеохимических, гидрогеодинамических, гидрогеотермических и других геофизических параметров.

Утверждение некоторых авторов о возможности прогнозирования землетрясений только радоновым методом или гидродинамическими исследованиями нашими многолетними наблюдениями не подтверждается. В результате применения комплексного метода удачно прогнозировано время возникновения нескольких крупных землетрясений, в том числе Газлийского 17 мая 1976 г., Алайского 2 ноября 1978 г., сильных афтершоков Назарбекского 30 декабря 1980 г. Как показывает статистика, надежность гидрогеосейсмологических методов прогноза землетрясений более 60%.

Гидрогеосейсмологические аномалии возникают под действием различных геолого-геохимических и геофизических процессов, возникающих при подготовке землетрясений.

В связи с тем, что все приведенные положения механизма образования аномалий нуждаются в дальнейшем уточнении и научном обосновании, необходимо разработать теоретические основы образования гидрогеохимических предвестников. Для успешного решения поставленной задачи необходимо расширить гидрогеосейсмологическую службу на каждом естественноисторическом полигоне.

Для организации такой службы с центром обработки и оповещения всю территорию сейсмоактивной зоны СССР надо разделить на естественноисторические регионы. В основу этого расчленения должны быть положены сеймотектонические условия регионов с учетом их промышленно-экономического развития. К настоящему времени представляется возможность предварительно выделить ряд регионов, в том числе Карпатский, Кавказский, Памиро-Тяньшаньский, Байкальский, Курило-Камчатский и др. В их пределах на

основе структурно-гидрогеологического районирования выделяются природные водонапорные системы, в которых с учетом сложного строения и размеров размещаются один или несколько гидрогеосейсмологических постов.

Нам представляется, что в пределах Памиро-Тяньшаньского региона необходимо разместить 28 гидрогеосейсмологических постов на территории Средней Азии и Южного Казахстана. Возможно, это число в результате более детального обсуждения несколько изменится, однако необходимость организации комплексных гидрогеосейсмологических станций уже назрела.

Перед началом гидрогеосейсмологических наблюдений необходимо проанализировать гидрогеохимические и гидродинамические условия исследуемого региона. Для этого используется материал гидрогеохимической съемки территории СССР с выявленным гидрогеохимической роли того или иного водоносного горизонта или комплекса и разломов, глубин их залегания, гидродинамических характеристик и величин фоновых значений содержания тех или иных микро- и макрокомпонентов, газовых ассоциаций. В результате этого представится возможность более целенаправленного исследования с выбором конкретных информативных компонентов газо-химического и изотопного составов подземных вод. Так, если наблюдения ведутся в пресных гидрокарбонатно-кальциевых водах галечников среднечетвертичного возраста Центральной Ферганы, в комплекс ежедневно изучаемых показателей нет смысла включать определение содержания углеводов, как и в водах нефтяных месторождений Ферганы проследить вариации концентрации урана и т. п.

Глубина заложения наблюдательных скважин и расстояние между ними определяются конкретными структурно-гидрогеологическими условиями рассматриваемой территории с учетом ее сеймотектонических особенностей. Поэтому перед началом бурения для организации систем наблюдения необходимо проанализировать строение района. Степень гидрогеологической изученности сейсмоактивных районов СССР вполне позволяет это без особых затрат на основе имеющихся проработок и материалов Министерства геологии СССР и союзных республик. При определении густоты опорных пунктов наблюдения очень важен учет сеймотектонических особенностей. После тщательного анализа гидрогеосейсмологических условий исследуемого региона необходимо составить карту размещения опорной сети наблюдательных пунктов. При составлении этой карты прежде всего необходимо учесть возможность использования существующих скважин, если они отвечают требованиям гидрогеосейсмологических наблюдений. В случае отсутствия таковых с учетом геологического строения, гидрогеологических условий и сеймотектонической особенности района проектируется бурение опорных гидрогеосейсмологических скважин. Их проектная глубина определяется конкретным строением места заложения выработки. При проектировании бурения необходимо исключить возмож-

ность влияния внешних факторов (орошение, обводнение, осушение, строительство различных сооружений и т. п.) на режим подземных вод в наблюдаемой скважине.

Для оперативного ведения наблюдения за вариацией гидрогеохимических и гидродинамических параметров подземных вод его нужно начинать на скважинах, не дожидаясь конца бурения.

Назначение спорных пунктов:

1) проведение на них систематических инструментальных наблюдений за изменением отдельных параметров подземных вод;

2) изучение влияния внешних факторов (лунно-солнечные приливы, сезонные, месячные и суточные вариации) с целью выявления нормального геохимического фона;

3) определение наиболее чутких и объективных гидрогеосейсмологических показателей для конкретного района исследований;

4) первичная камеральная обработка данных инструментальных наблюдений с составлением таблиц и графиков по результатам наблюдения и анализа отобранных проб воды и газа;

5) систематическая своевременная передача информации в центр обработки, а в случае аномальных вариаций — немедленная.

Составной частью гидрогеосейсмологической сети помимо опорных пунктов является наблюдательная сеть водопунктов (скважины, колодцы, источники), для выявления влияния сейсмических процессов на режим неглубоких водоносных горизонтов и установление сферы распространения зоны деформации горных пород, вызванной этими процессами. Для этого необходимо использовать уже существующую региональную сеть наблюдательных пунктов, предназначенную для изучения режима подземных вод. Гидрогеосейсмологические наблюдения по сети наблюдательных скважин могут осуществляться партиями и экспедициями Министерства геологии, ведущими систематические режимные наблюдения за изменением температуры, уровня, расходов и химического состава подземных вод. При этом должны быть тщательно отобраны пункты для гидрогеосейсмологических наблюдений и согласованы программы и методика исследований.

Наблюдательные пункты должны равномерно располагаться по территории исследования и охватывать все наблюдаемые водоносные горизонты. Для этого на территории Узбекской ССР размещается 15 комплексных гидрогеосейсмологических станций — Ходжабадская, Чартакская, Чимнионская, Ленинюльская, Майская, Хаватагская, Джизакская, Джумабазарская, Каратепинская, Шахриябзская, Шурчинская, Свердловская, Зарафшанская, Ургенчская и Нукуская. К настоящему времени функционируют 6 первых станций и концу 1981 г. планируется ввод в эксплуатацию еще 12.

Создание такой службы, занимающейся комплексными изучением гидрогеохимических, геофизических, астрогеодезических, деформометрических и других предвестников, позволит в момент проявления больших аномалий определить район возможного землетрясения, его силу и время проявления.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Саваренский Е. Ф. Ташкентское землетрясение и его возможные причины. «Вестник АН СССР», 1966, № 8.
2. Физические основания поиска методов прогноза землетрясения. М., 1970.
3. Предвестники землетрясений. М., 1973.
4. Султанходжаев А. Н. Современное состояние и перспективы развития гидрогеосейсмологии. «Узб. геол. ж.», 1977, № 5.
5. Садовский М. А. Предсказание времени землетрясений. «Земля и вселенная», 1978, № 6.
6. Мячкин В. И. Процессы подготовки землетрясений. М., 1978.
7. Рикитаке Т. Предсказание землетрясений. М., 1979.
8. Барсуков В. Л. [и др.]. Геохимические методы прогноза землетрясений. «Геохимия», 1979, № 3.
9. Игумнов В. А., Халатян Э. С. Геохимические исследования с целью прогноза землетрясений на территории Армянской ССР. «Геохимия», 1979, № 3.
10. Осика Д. Г. Эмпирические и теоретические основы гидродинамического и геохимического методов, а также организация службы оперативного прогноза места, силы и времени тектонических землетрясений. В сб. «Сейсмичность и гидрогазогеохимия территории Дагестана», вып. 2 (17), 1978.
11. Осика Д. Г. Опыт разработки и перспективы практического использования геохимических и гидрогеологических методов прогноза места и времени мелкофокусных землетрясений. «Геохимия», 1979, № 3.
12. Сардаров С. С. Гелий-аргоновые предвестники землетрясений. Труды Института геологии Даг. фил. АН СССР, 1978, № 2.
13. Монахов Ф. И. [и др.]. Новые данные о гидродинамическом эффекте, предшествующем землетрясениям. «Изв. АН СССР», сер. «Физика Земли», 1980, № 1.
14. Голицин Б. Б. Избранные труды. Том 2. М., 1960.
15. Попов Г. В. Карта возможных наибольших землетрясений Средней Азии. «Соц. наука и техника», 1939, № 1.
16. Радославов Б. В. Влияние на землетрясения вообще и специально на ТЪЗИ в чирпанско и пловдивско презь прольтыта на 1928 г. върху термалнитъ и минерални води в България Списание на българского инженерно-архитектно дружество. София, 1929.
17. Садовский М. А. [и др.]. Гидродинамические предвестники Южно-Курильских землетрясений. ДАН СССР, т. 236, 1977, № 1.
18. Мавлянов Г. А. [и др.]. Аномальные вариации гидрогеохимических параметров подземных вод Восточной Ферганы — предвестник Алайского землетрясения 2. XI. 1978 г., «Узб. геол. ж.», 1981, № 2.
19. Султанходжаев А. Н., Латипов С. У., Закиров Т. Гидрогеосейсмологические эффекты Алайского землетрясения 2 ноября 1978 г., ДАН УзССР, 1979 № 3.

20. J. S. Rinehart. Fluctuations in Geyzer activity caused by variations in Earth tidal forces barometric Pressure and Tectonic Stress J. of Geophys. Research ganuary N 10, 1972, vol. 77, N 2.
21. Крейг Г. Геохимия стабильных изотопов углерода. В сб. «Изотопы в геологии», М., 1954.
22. King Ju Chi. «Radon emanation on San-Andreas fault» Earthquake Information Bull» 1978, 10, N 4.
23. Kovach R., [etc]. Water-level hluctuations and Earthquakes on the San-Andreas fault zone «Geology» 1975, 3, N 8.
24. Noguchi M., Wakita H. A method for continiuous measurement of radon in groundwater for earthquake prediction J. of Geophysical research, vol. 82, N 8, 1977.
25. Wakita. Geochemistry as a tool for Earthquake prediction. J. Phys. Earth. 25 Suppl., 1977.
26. Султанходжаев А. Н., Зиган Ф. Г. Методические рекомендации к гидрогеосейсмологическим исследованиям. Ташкент, 1980.
27. Султанходжаев А. Н. [и др.]. Гидрогеохимические особенности некоторых сейсмоактивных зон Средней Азии. Ташкент, 1977.
28. Султанходжаев А. Н. [и др.]. Гидрогеосейсмологические исследования в Восточной Фергане. Ташкент, 1978.
29. Мячкин В. И. [и др.]. Основы физики очага и предвестники землетрясений. В сб. «Физика очага землетрясений», М., 1975.
30. Карценштейн В. Н. К оценке глобальных ресурсов растворенных газов подземной гидросферы. ДАН СССР, т. 235, 1977, № 2.
31. Щербаков А. В., Козлова Н. Д., Смирнова Г. Н. Газы термальных вод. М., 1974.
32. Штенгелов Е. С. Зональность современного напряженного состояния земной коры и сейсмичность. ДАН СССР т. 235, 1977, № 2.
33. Блох А. М. О термодинамических особенностях природной макропористой системы порода—вода.—«Изв. АН СССР», сер., геол., 1980, № 8.
34. Болдырев В. В., Аввакумов Е. Г. Механохимия твердых неорганических веществ. «Успехи химии», вып. 10, 1971.
35. Виноградов А. П. Химическая эволюция земли. М., 1959.
36. Сидоренко А. Н., Теняков В. А., Сидоренко С. А. Осадочно-метаморфические процессы и «газовое дыхание» земной коры. Тезисы докл. IV симпозиума «Дегазация земли и геотектоника», М., 1976.
37. Кропоткин П. Н., Валяев Б. М. Дегазация земли и геотектоника. Тезисы докл. IV симп. «Дегазация земли и геотектоника», М., 1975.
38. Хитаров Н. И., Войтов Г. И., Лебедев В. С. О геохимических предвестниках землетрясений. В сб. «Поиски предвестников землетрясений на прогностических полигонах». М., 1974.
39. Горбушина Л. В., Тыминский В. Г., Спиридонов А. И. К вопросу о механизме образования радиогидрогеологических аномалий в сейсмоактивном районе и их значение при прогнозировании землетрясений. «Сов. геология», 1972, № 1.
40. Грацинский В. Г., Горбушина Л. В., Тыминский В. Г. О выделении радиоактивных газов горных пород под действием ультразвука. «Изв. АН СССР», сер. «Физика Земли», 1967, № 10.
41. Nug A. G. Dilatance pore fluids and premonitory variations of ts/tp travel times. Bull. seismol Soc. America, 1972, v. 62.
42. Nug A. G., Bell M. L., Talwani F. A. Detailed study of the dilatancy mechanism and premonitory velocity changes Jn: Proceedings of the conference on tectonic problems of the San Andreas fault system v. 13, Stanford California, 1973.
43. Conference report: towards earthquake prediction on the global scale. EOS Trans. Amer. Geophys. Union, 1978, 59, N 1.
44. Вольнец В. Ф. Геохимические процессы и цикл азота в земной коре. В кн. «Разделение элементов и изотопов в геохим. процессах». М., 1979 г.
45. Гуревич М. С. О генезисе природного газа. Труды ВСЕГЕИ, нов. сер., 1968, № 134.

46. Leventhal J. S. Nitrogen in gas wells as an indicator of the geochemistry of nitrogen atmospheric evolution and sea floor spreading. *Trans. Amer. Geophys. Union*, 1971, 52, N 11.
47. Крайча Я. Газы в подземных водах. М., 1980.
48. Ткачук Л. Т., Лазаренко Е. К. Континентальная кора в свете геохим. и петролог. проблем. «Изв. АН СССР», сер. геол., 1977, № 7.
49. Щербаков А. В. Геохимия термальных вод. М., 1968.
50. Смирнов А. А. О перспективах подземных вод в свете некоторых новых представлений об условиях их формирования. *Тр. ВСЕГИНГЕО*, сб. 16, 1959.
51. Хитаров Н. И. Геохимические исследования в области повышенных давлений и температур. М., 1965.
52. Кадик А. А., Луканин О. А. Поведение воды и углекислоты в магматических процессах, определяемое их растворимостью. «Геохимия», 1973, № 2.
53. Буачидзе Г. И. Вопросы генезиса CO<sub>2</sub> в свете данных углеродной изотопии. Тезисы докл. V Всесоюз. симпозиума по геохимии стабильных изотопов. М., 1974.
54. Green H. W. Trace elements in the fluid phase of the Earth's mantle «*Nature*», 1979, 277, № 5696.
55. Максимов С. П. [и др.]. Изотопный состав углерода CO<sub>2</sub> газов Западной Сибири в связи с его генезисом. «Геохимия», 1980, № 7.
56. Финкельштейн Д. Н. Инертные газы. М., 1979.
57. Фастовский В. Г., Ровинский А. Е., Петровский Ю. В. Инертные газы. М., 1972.
58. Якуцени В. П. Геология гелия. Л., 1968.
59. Матвеев Э. С., Толстихин И. Н., Якуцени В. П. Изотопный гелиевый критерий происхождения газов и выявления зон неотектогенеза (на примере Кавказа). «Геохимия», 1978, № 3.
60. Градский Б. В. [и др.]. Связь аномалий гелия с водообильностью пород ДАН СССР, 1979, № 5.
61. Булашевич Ю. П., Башорин В. Н. О выявлении разломов на Свердловском профиле ГСЗ по повышенным концентрациям гелия в подземных водах. «Физика Земли», 1973, № 3.
62. Чердынцев Б. В., Колесников Е. М. Аргон древней атмосферы в минералах осадочных пород. ДАН СССР, 1965, № 6.
63. Champ D. R., Gulens J., Jackson R. E. Oxidation — reduction sequences in ground water flow system «*Can. J. Earth Sci*» 1979, 16, N 1.
64. Уломов В. И. Методика поиска прогностических признаков землетрясений. *Инф. сооб.* № 186. Ташкент, 1977.
65. Dobrovolsky J. P., Zubkov S. J., Miachkin V. J. Estimation of the size of earthquake preparation zones «*Pure and appl. Geophys*», 1979, 117, N 5.
66. Султанходжаев А. Н., Зиган Ф. Г., Файзуллаева М. И. Гидрогеосейсмологические предвестники Газлийского землетрясения. ДАН УзССР, 1976, № 10.
67. Султанходжаев А. Н. [и др.]. Вариации газо-химического состава подземных вод Ташкентского геодинамического полигона. В сб. «Исфара-Баткенское и Таваксайское землетрясения 1977 г.», Ташкент, 1979.
68. Арипов Э. А., Эргашев С. Э. Об изменении концентрации водородных ионов в подземных водах в связи с землетрясением. ДАН УзССР, 1977, № 6.
69. Исмаилов М. И., Эргашев С. Э. О возможности использования гидрогеохимического показателя (РН) подземных вод для прогноза землетрясения. «Сов. геология», 1978, № 10.
70. Резников А. А., Муликовская Е. П., Соколов Ю. М. Методы анализа природных вод. М., 1970.
71. Хакимов С., Кутбединов А., Абдуллаев А. А. Активационное определение ртути в пробах без их концентрирования. «Радиохимия», 1978, № 6.

72. Перельман А. И. Геохимия элементов в зоне гипергенеза. М., 1972.
73. Самарина В. С. Гидрогеохимия, Л., 1977.
74. Набоко С. И. К вопросу о метаморфизме гидротермальных растворов и вулканогенных пород при их взаимодействии. Тр. лаборатории вулканологии, вып. 18, М., 1969.
75. Ткачук В. Г. Формирование термальных вод Саяно-Байкальской горной страны. Тр. II совещ. по подземным водам и инж. геологии Восточной Сибири, вып. 1, Иркутск, 1959.
76. Ломоносов И. С. Геохимия и формирование современных гидротерм Байкальской рифтовой зоны. Новосибирск, 1974.
77. Мавлянов Г. А. [и др.]. Гидрогеохимические особенности некоторых сейсмоактивных районов Узбекистана, Ташкент, 1973.
78. Александров С. М., Барсуков В. Л., Щербина В. В. Геохимия эндогенного бора. М., 1965.
79. Красинцева В. В. О накоплении бора в минеральных водах в результате выделения его из осадочных пород. В кн. «Проблемы гидрогеологии». М., 1960.
80. Валяшко М. Г. Некоторые черты геохимии бора. В сб. «Химия боратов». Материалы совещания по вопросам химии боратов. Рига, 1953.
81. Горбов А. Ф. Геохимия бора. М., 1976.
82. Хардер Г. Геохимия бора. М., 1965.
83. Landergrén S. The distribution of boron in Some swedish sediments, rocks and iron ores — «Arkiv kemi, Miner. Geol.» 1945, 19A, N 26, p. 1—31.
84. Гриднев Н. И., Бахридинов С. Литология разреза мезозойско-кайнозойских отложений центральной части г. Ташкента (по материалам глубокого бурения). «Узб. геол. ж.», 1974, № 1.
85. Крайнов С. Р. Геохимия редких элементов в подземных водах. М., 1973.
86. Ермаков Н. П. Исследование минералообразующих растворов. Харьков, 1950.
87. Когарко Л. Н. Роль флора в формировании щелочных пород на примере Ловозерского массива. М., 1962.
88. Сауков А. А. Геохимия ртути. Тр. ИГН АН СССР, вып. 74, 1946.
89. Озерова Н. А., Сауков А. А. Ртуть как индикатор при поисках рудных месторождений. В кн. «Геологические результаты прикладной геохимии и геофизики». Международный геолог. конгресс, XXI сессия, М., 1960.
90. Фурсов В. З. Ртуть — индикатор при геохимических поисках рудных месторождений. М., 1977.
91. Вернадский В. И. История минералов земной коры. т. IV, кн. 2, М., 1960.
92. Валуконис Г. Ю., Ходьков А. Е. Геологические закономерности движения подземных вод, нефтей и газов. М., 1973.
93. Блох А. М. Скачки структурного состояния воды и их возможная роль в процессах рудообразования. В сб. «Значение структурных особенностей воды и водных растворов для геологических интерпретаций», М., 1968.
94. Хитаров Н. Н. [и др.]. О геохимических эффектах, сопутствующих тектоническим землетрясениям. В сб. «Новые данные по сейсмологии и сейсмогеологии Узбекистана», Ташкент, 1974.
95. Рустанович Д. Н. Землетрясение в районе с. Советское (Шантай). «Физика Земли», 1968, № 12.
96. Войтов Г. И. [и др.]. О некоторых геолого-геохимических последствиях Дагестанского землетрясения 14. V. 1970 г. ДАН СССР, т. 202, 1972, № 3.
97. Султанходжаев А. Н. Гидрогеосейсмологические предвестники землетрясений. «Узб. геол. ж.», 1979, № 2.
98. Монахов Ф. М. Механизм формирования краткосрочного гидродинамического предвестника землетрясений. Южно-Сахалинск, 1979.
99. Монахов Ф. М., Хантаев А. М., Сапрыгин С. М. Краткосрочный гидродинамический предвестник землетрясений и его связь с упругой деформацией земной коры. Южно-Сахалинск, 1979.
100. Ташкентское землетрясение 26 апреля 1966 г. Ташкент, 1970.

101. Султанходжаев А. Н., Дусходжаев Х. Р., Хасанова Л. А. Об основном очаге разгрузки подземных вод Сырдарьинского артезианского бассейна ДАН УзССР, 1961, № 9.
102. Султанходжаев А. Н., Чернов И. Г. Гидрогеосейсмологические предвестники землетрясений. Вариации гидрогеодинамических параметров подземных вод. «Узб. геол. ж.», 1978, № 4.
103. Ишанкулов Р., Калугин Г. Н. Об изменениях уровня воды в пределах Букантауского горного массива во время Газлийского землетрясения. Тезисы докл. конф. по теме «Районирование сейсмической опасности и поиски предвестников землетрясений». Ташкент, 1976.
104. Мавлянов Г. А. [и др.] Аномальные вариации геомагнитного поля в Восточной Фергане — предвестник Алайского землетрясения 2. XI. 1978 г. ДАН СССР, т. 246, 1979, № 2.
105. Султанходжаев А. Н., Латипов С. У., Ибрагимов Д. С. Неравновесный уран в подземных водах некоторых артезианских бассейнов Ср. Азии. В кн. «Изотопный состав подземных вод». Ташкент, 1972.
106. Уломов В. И., Мавашев Б. З. О предвестнике сильного тектонического землетрясения. ДАН СССР, т. 176, 1967, № 2.
107. Кей Арик [и др.]. Исследования геофизических параметров в связи с землетрясениями в Каринтии и Фриуле. Вена, 1980.
108. Капустина О. А. Исследование механизма в основных закономерностях процесса ультразвуковой дегазации жидкостей. «Ультразвуковая техника», 1964, № 5.
109. Абдуллабеков К. Н. Полевые наблюдения возмущений электромагнитного поля Земли. Препринт № 8, М., 1980.
110. Гохберг М. Б. [и др.]. Электромагнитные предвестники в процессе подготовки землетрясений. Препринт № 8, М., 1980.
111. Султанходжаев А. Н. [и др.]. О возможности прогнозирования места возникновения сильных землетрясений. «Узб. геол. ж.», 1977, № 3.
112. Монахов Ф. И. [и др.]. Краткосрочные гидродинамические и гидрогеохимические предвестники землетрясений на острове Кунашир. «Геохимия», 1979, № 3.
113. Rikiake T. «Tectonophysics», 1969, 8, 81.
114. Кондратенко А. М., Нерсесов И. Л. Некоторые результаты изучения изменения продольных волн и отношения скоростей продольных и поперечных волн в очаговой зоне. Труды ИФЗ АН СССР, 1962, № 5 (192).
115. Сидорин А. Я. Зависимость времени проявления предвестников землетрясений от эпицентрального расстояния. ДАН СССР, т. 245, 1979, № 4.
116. Султанходжаев А. Н. [и др.]. Зависимость гидрогеосейсмологических аномалий от энергии и эпицентрального расстояния землетрясений. ДАН УзССР, 1980, № 5.
117. Султанходжаев А. Н. [и др.]. О прогностических возможностях гидрогеосейсмологической системы наблюдения в Узб. ДАН УзССР. 1980.
118. Галимов Э. М. Геохимия стабильных изотопов углерода. М., 1968.
119. Мавлянов Г. А. [и др.]. Явление изменения химического, газового (элементы и изотопы) составов подземных вод в процессе землетрясения. Открытие № 129, Бюллетень Госкомитета Сов. Мин. СССР, 1973, № 42.
120. Фридман А. И., Лебедев В. С., Кропотова О. И. Исследование изотопного состава углерода газов ртутных месторождений в связи с использованием их в качестве геохимических индикаторов оруденения. Тезисы докл. IV Всесоюз. симпозиума по стаб. изотопам, М., 1972.
121. Султанходжаев А. Н. [и др.]. Вариации изотопного состава углерода CO<sub>2</sub> термальных вод Приташкентского артезианского бассейна. Тезисы докл. V Всесоюз. симпозиума по стаб. изотопам, М., 1974.
122. Султанходжаев А. Н., Чернов И. Г., Сидиков С. Изучение изотопных отношений аргона в периоды, предшествующие и сопутствующие землетрясению в Газли. Тезисы докл. VI Всесоюз. симпозиума по стаб. изотопам, М., 1976.
123. Султанходжаев А. Н. [и др.]. Опыт оценки возраста подземных вод. Ташкент, 1972.

124. Устинов В. И., Гриненко В. А., Прецизионный масс-спектрометрический метод анализа изотопного состава серы. М., 1966.
125. Методические указания по прецизионному масс-спектрометрическому методу определения изотопного состава водорода и углерода. М., 1975.
126. Доерфель К. Статистика в аналитической химии. М., 1969.
127. Чалов П. И. [и др.]. Исследование возможностей идентификации вод разломов по радиологическим параметрам. «Изв. АН СССР», сер. «Физика Земли», 1976, № 9.
128. Булашевич Ю. П. [и др.]. Содержание гелия и соотношения между изотопами уранового ряда в водах разломов Северной Киргизии. «Изв. АН СССР», сер. «Физика Земли», 1976, № 1.
129. Катаева Н. И. [и др.]. Подземные минеральные воды Киргизской ССР. Фрунзе, 1969.
130. Григоренко П. Г. [и др.]. Объяснительная записка к гидрогеологической карте Киргизской ССР. М., 1965.
131. Васильева В. Н. Особенности формирования Джеты-Огузских радиоактивных терм. Сб. «Вопросы формирования и распространения минеральных вод СССР», М., 1960.
132. Шукулюков Ю. А., Левский Л. К. Геохимия и космохимия изотопов благородных газов. М., 1972.
133. Герлинг Э. К. Современное состояние аргонного метода определения возраста и его применение в геологии. М.-Л., 1961.
134. Пушкарев Ю. Д. Актуальные проблемы К-Аг геохронометрии. Препринт доклада на I Всес. шкале по изот. геохронологии. Апатиты, 1977.
135. Савченко В. П. К вопросу о геохимии гелия. В сб. «Природные газы», М.-Л., 1935, № 9.
136. G. Boato, G. Careri, M. Santangelo. Argon isotopes in natural gases; Nuovo Cimento, 9, N 1, 1952.
137. E. Mazon, G. J. Wasserburg. He, Ne, Ar, Kr and Xe in gas emanations from Yellowstone and Larson volcanic National Parks., Geochim. at Cosmochim Acta., 29, N 5, 433, 1965.
138. Виноградов В. П., Шанин Л. Л., Аракелянц М. М. Изотопный состав вулканического аргона. ДАН СССР, т. 170, 1966, № 4.
139. R. E. Zartman, G. L. Wasserburg, J. Reynolds. He, Ar and C in some natural gases., J. Geophys. Res., 63, N 5, 1962.
140. Argon, helium and the rare gases., Edit by G. A. Cook. Intersciences Pub. N.-Y. London, 1961.
141. Чердынцев В. В. Ядерная вулканология. М., 1973
142. Каменский И. Л., Прасолов Э. М., Тихомиров В. В. О ювенильных компонентах в газовых залежах Сахалина (по изотопным данным) «Геохимия», 1974, № 8.
143. Воронов А. Н., Тихомиров В. В. Анализ распределения аргона в пластовых водах «Геохимия», 1968, № 1.
144. Шукулюков Ю. А., Толстихин И. Н. Ксенон, аргон и гелий в природных газах. «Геохимия», 1965, № 7.
145. Гудало Л. К. О природе и закономерностях распределения изотопов гелия и аргона в термальных водах Курильских островов и Камчатки. «Геохимия», 1976, № 6.
146. Толстихин И. Н., Друбейской Е. Р., Шараськин А. Я. Об изотопном составе аргона в мантии Земли. «Геохимия», 1978, № 4.
147. Друбейской Е. Р., Логинов Ю. В., Лопатин Б. Г., Толстихин И. Н. К вопросу об изотопном составе аргона в мантии Земли. «Геохимия», 1979, № 8.
148. Ануфриев Г. С. Изотопное отношение и распространенность легких инертных газов в геосферах. ДАН СССР, т. 249, 1979, № 5.
149. Ануфриев Г. С. О закономерностях дегазации Земли. ДАН СССР, 1980, № 3.
150. Кононов В. И., Мамырин Б. А., Поляк Б. Г. Изотопы гелия в газах гидротерм Исландии. ДАН СССР, т. 217, 1974, № 1.
151. Матвеева Э. С., Толстихин И. Н., Якуцени В. П. Изотопно-

- гелиевый критерий прясхождения газов и выявления зон неотектогенеза. «Геохимия», 1978, № 3.
152. Чердынцев В. В., Шитов Ю. Б., Избыток  $^{36}\text{Ar}$  в вулканических и поствулканических газах СССР. «Геохимия», 1967, № 5.
  153. Чердынцев В. В., Колесников Е. М. Аргон древней атмосферы в минералах осадочных пород. ДАН СССР, т. 165, 1965, № 6.
  154. Чердынцев В. В., Шитов Ю. В., Лизарская И. В. Изотопный состав аргона вулканических газов СССР. ДАН СССР, т. 172, 1967, № 5.
  155. Чердынцев В. В., Колесников Е. М., Лизарская И. В. Изотопный состав аргона природных газов. «Геохимия», 1966, № 5.
  156. Толстухин И. Н., Друбецкая Е. Р. Изотопные отношения  $^3\text{He}/^4\text{He}$  и ( $^3\text{He}/^{40}\text{Ar}$ ) род в породах земной коры. «Геохимия», 1975, № 8.
  157. Войтов Г. И. Изотопные характеристики спонтанных газов Хибин. ДАН СССР, т. 236, 1977, № 4.
  158. Воронов А. Н., Прасолов Э. М., Тихомиров В. В. Соотношение радиогенных изотопов аргона и гелия в газовых залежах. «Геохимия», 1974, № 12.
  159. Тугаринов А. И., Сардаров С. С. Изменения в глубинных потоках радиогенных газов как следствие упругих деформаций земной коры. ДАН СССР, т. 223, 1975, № 4.
  160. Валяева Б. М. [и др.]. Короткопериодические вариации потока He в связи с афтершоками землетрясения 28—29. 7. 76 в Грозном. ДАН СССР, т. 235, 1977, № 2.
  161. Кучер М. И. [и др.]. Использование вариаций изотопного состава углерода природных газов в качестве предвестников землетрясений. Тезисы докл. VII Всесоюз. симпозиума по стаб. изотопам в геохимии, М., 1978.
  162. Кравцов А. И., Кучер М. И., Фридман А. И. Об изменении изотопного состава углерода природных газов в зависимости от сейсмической активности. «Геохимия», 1979, № 3.
  163. Войтов Г. И. [и др.] Вариации химического состава природных газов и содержаний углерода  $^{13}\text{C}$  в  $\text{CO}_2$  и  $\text{CH}_4$  в газах минеральных источников Зурамакент при заполнении водохранилища Чиркейской ГЭС. (Дагестан). «Геохимия», 1979, № 3.
  164. Есиков А. Д. [и др.]. Вариации изотопного состава углерода и водорода в углеводородах при землетрясениях, сопровождающих заполнение Чиркейской ГЭС. Тезисы докл. VII Всесоюз. симпозиума по стаб. изотопам в геохимии, М., 1978.
  165. Виноградов А. П., Кропотова О. И. Об изотопном фракционировании углерода в геохимических процессах «Изв. АН СССР», сер. геол. 1967, № 11.
  166. Кропотова О. И. Геохимия эндогенного углерода в свете изотопных данных. В сб. «Разделение элементов и изотопов в геохимических процессах», М., 1979.
  167. Y. Bottinga. Calculated fractionation factors for carbon and hydrogen isotope exchange in the system calcite—carbon dioxide-graphite-methane-hydrogen-water vapor — Geochim. Cosmochim. Acta., 33, N 1, 49, 1969.
  168. Наумов Г. Б., Миронова О. Ф., Наумов В. Б. Соединения углерода во включениях гидротермальных кварцев. «Геохимия», 1976, № 8.
  169. Кучер М. Н., Мацапулин В. У. Изотопы углерода газово-жидких включений в минералах рудных тел. Тезисы докл. VII Всесоюз. симпозиума по стаб. изотопам в геохимии, М., 1978.
  170. Андерсон Т. Введение в многомерный статистический анализ и временные ряды. М., 1976.
  171. Дженкинс Г., Ваттс Д. Спектральный анализ и его приложения. М., 1968.
  172. Ландер А. В. [и др.]. О спектрально-временном анализе колебаний. «Вычислительные и статистические методы интерпретации сейсмических данных», 1973, № 6.
  173. Феллер В. Введение в теорию вероятностей и ее приложения. М., 1967.
  174. Митропольский А. К. Техника статистических вычислений. М., 1971.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение . . . . .	3
Краткий обзор современного состояния изученности гидрогеоэссмологических методов поиска предвестников землетрясений. . . . .	5
Гидрогеохимические предвестники землетрясений. . . . .	11
Глава I. Вариации газохимического состава подземных вод глубоких водоносных горизонтов Ташкентского геодинамического полигона. . . . .	12
Глава II. Вариации макро- и микрокомпонентного состава подземных вод Ташкентского геодинамического полигона. . . . .	38
Гидрогеофизические предвестники землетрясений. . . . .	57
Глава III. Результаты гидрогеодинамических исследований на Ташкентском геодинамическом полигоне. . . . .	57
Глава IV. Некоторые количественные зависимости содержания радона от параметров землетрясения. Радон — предвестник тектонических землетрясений. . . . .	64
Распространенность изотопов углерода и аргона в газах подземных вод в связи с сейсмичностью. . . . .	84
Глава V. Отбор проб газа и подготовка к изотопному анализу на масс-спектрометре. . . . .	85
Глава VI. Результаты наблюдений за изотопным составом аргона в газах подземных вод. . . . .	87
Глава VII. Результаты наблюдений за изотопным составом углерода в $\text{CO}_2$ в газах подземных вод. . . . .	102
Статистическая обработка геохимических предвестников землетрясений. . . . .	110
Заключение . . . . .	124
Литература . . . . .	128

ГИДРОГЕОСЕЙСМОЛОГИЧЕСКИЕ ПРЕДВЕСТНИКИ  
ЗЕМЛЕТРЯСЕНИИ

*Утверждено к печати*

*Ученым советом Института сейсмологии и Отделением наук о Земле АН УзССР*

Редактор *Р. Б. Якубович*  
Художник *В. С. Тий*  
Художественный редактор *Р. И. Кривошей*  
Технический редактор *В. М. Тарахович*  
Корректор *О. В. Вахнина*

ИБ № 1875

Сдано в набор 28.03.83. Подписано к печати 19.04.83 P05588. Формат 60×90<sup>1/16</sup>. Бумага типографская № 1. Гарнитура литературная. Печать высокая. Усл. печ. л. 8,5. Уч. изд. л. 8,8. Тираж 1000. Заказ 77. Цена 1 р. 50 к.

Издательство «Фан» УзССР, Ташкент, 700047, ул. Гоголя, 70.  
Типография Издательства «Фан» УзССР, Ташкент, проспект М. Горького, 79.

Цена 1 р. 50 к.

4003