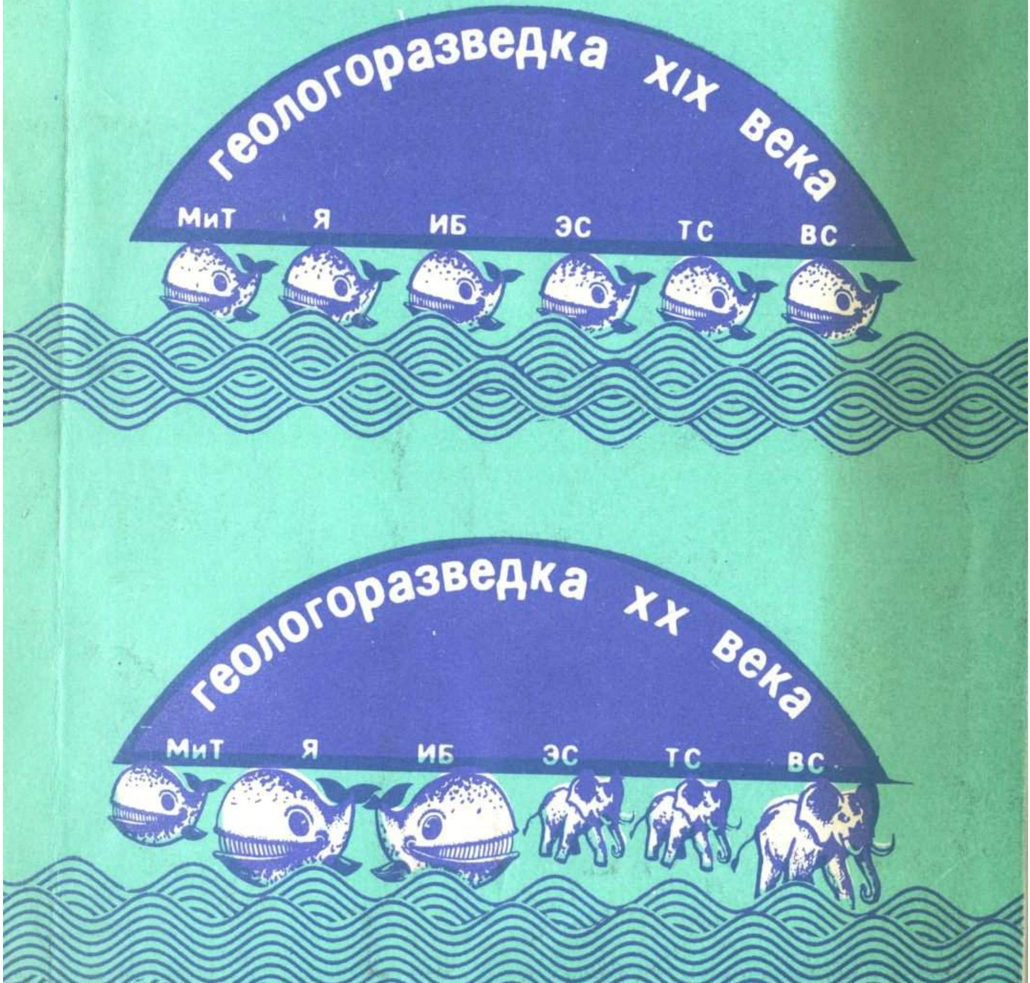
ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ МЕТОДЫ В ГЕОЛОГОРАЗВЕДКЕ



Академия наук СССР Сибирское отделение
Вычислительный центр

ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ МЕТОДЫ В ГЕОЛОГОРАЗВЕДКЕ

Сборник научных трудов

Под редакцией Ю.А.Воронина

Новосибирск 1986

От редактора

Геологоразведка переживает несомненно революционный этап, главная черта которого - использование вычислительной техники, которое идет в условиях борьбы многочисленных течений и группировок. Такая борьба в некоторой мере естественна. Однако она длится чрезмерно долго, идет слишком личностно, почти без правил, отбирая у многих все время. В разрушении старых и особенно новых "не своих" представлений геологоразведки имеются успехи, однако нельзя рассчитывать на успехи созидания, если не подменить борьбу некой разумной конкуренцией немногих хорошо развитых концепций и школ. По-видимому, такая подмена не может произойти сама. Необходимы специальные усилия по развитию в первую очередь упомянутых концепций. Одной из них, пожалуй, наиболее развитой, является концепция вычислительной геологоразведки. Она опирается на свои особые установки.

I. Толкование геологоразведки как сферы информационного обслуживания для потребляющих отраслей. Геологоразведка обеспечивает эти отрасли информацией, позволяющей им разумно выбирать объекты в земной коре и способы их использования. Она производит наглядно-словесные модели таких объектов земной коры, которые важны для потребляющих отраслей, являются промышленными, а также таких, которые интересны для самой геологоразведки, являются информационными.

2. Представления о существе использования вычислительной техники. Это существо связано с переходом от производства наглядно-словесных моделей объектов земной коры к производству их математических моделей (переход к новой продукции лучшего качества, но более дорогой).

3. Весьма пессимистические отношения к существующим методолого-теоретическим и организационно-управленческим основам

геологоразведки. Изменение этих основ (переход от заданий к задачам) объявляется главным условием успешного использования вычислительной техники.

4. Представления о правильном использовании вычислительной техники при решении конкретных вопросов геологоразведки. Доминирующее внимание уделяется постановке задач, а не их решению, рационализации получения данных, а не их эффективной обработке, надежности и обоснованности решений задач, а не скорости их получения, созданию базы знаний, а не банков данных. Главным при доказательствах считается моделирование на ЭВМ, а не полевые наблюдения.

Данный сборник посвящен дальнейшему развитию вычислительной геологоразведки как в общем, так и в конкретных планах. Необходимо обратить особое внимание на статьи И.П.Шарапова, А.Н.Бугайца с соавторами и В.В.Веселова с соавторами.

Ю.А.Воронин

И.П.Шарапов

ЭВОЛЮЦИЯ ЗИТОЛОГИИ (МЕТОДИКА ПОИСКОВ И РАЗВЕДКИ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ)

Методикой поисков и разведки месторождений полезных ископаемых называют одну из геологических дисциплин, сущность и эволюцию которой мы хотим здесь проанализировать. Для удобства описания этой дисциплины дадим ей краткое название "геозитология", или "зитология" [I].

Чтобы не очень нарушать терминологическую традицию, наряду с термином "зитология" будет употребляться и термин "методика разведки".

Методику разведки уже много десятилетий (точнее, с 1924 г.) преподают на геологических факультетах вузов и разрабатывают в научно-исследовательских институтах, но до сих пор неясен ее статус. Одни считают ее разведочным "делом" (подобно столярному или кузнечному), другие - наукой (но какой именно наукой - чисто геологической, геолого-экономической или геолого-технической - об этом идет спор), третьи перевернули понятие геологической разведки, придумав разведочную геологию и т.д. Те, кто считают методику разведки наукой, однако, отказывают ей в самостоятельности. Они рассматривают ее лишь в виде какой-то приправы к учению о полезных ископаемых, т.е. раздробили методику разведки на части и каждую из них включили в различные подразделения учения о месторождениях.

В свое время, когда зитологию нужно было вывести из подчинения горному искусству и ввести в семейство геологических наук, это было обосновано потребностями жизни, но ныне, в связи с развитием науки, это стало анахронизмом.

Вполне можно согласиться с теми, кто считает зитологию наукой, но очень молодой и несовершенной. Ее специфические теоретические положения от гипотез (относящихся к частным случаям) до общей теории поисково-разведочного процесса только сейчас начинают формироваться и встречают недоверие многих ученых, привыкших к эмпиризму и практицизму.

Таким образом, во взглядах на методику разведки существует разнобой. Между тем, от выявления статуса этой дисциплины зависит выбор путей ее развития. Если это - "дело", то его развитие должно идти по пути совершенствования индивидуального мастерства геологов. Если - наука, то у нее должны быть: свой особый предмет и свой метод, и, что еще важнее, свои теории и законы, относящиеся к поискам и разведке месторождений всех видов полезных ископаемых, а не одних только рудных или нерудных, или угольных, или нефтяных и т.д. месторождений (порознь).

Для каждой науки естественно, по мере развития, переходить от эмпирической стадии к анализу, а затем к синтезу. Зитология как молодая наука развивала до сих пор эмпирическое и аналитическое направления. Ныне настала необходимость искать общее в методах разведки разных типов месторождений. На синтетической стадии развития наука сильно взаимодействует с другими науками, влияет на них. Именно на этой стадии ученый открывает законы [2].

Зитология развивалась тоже по этой схеме.

В начале текущего столетия в недрах горного искусства родилось "разведочное дело". Оно считалось частью этого искусства [3]. В то же время геологи привлекали элементы горного искусства в создаваемые ими курсы разведочного дела [4, 5]. Но вскоре, с накоплением материала, от разведочного дела отпочковалась "техника разведки" (проходка горных выработок и бурение скважин), а то, что осталось, получило название "методики разведки". Уйдя из горного искусства, эта методика приблизилась к геологии или, более конкретно, – к учению о месторождениях полезных ископаемых. Свой современный вид методика разведки получила в классических курсах И.С.Васильева [6, 7], а также в работах [8 – II].В дальнейшем работа [II], содержащая большой фактический материал, подверглась сокращениям и шлифовке [I2–I4]. В.М.Крейтер в 1940 г. назвал интересующую нас дисциплину поисково-разведочным делом и одновременно геолого-экономической наукой, кроме того наукой о поисках и разведке, а также прикладной геологической наукой. Несогласованность этих четырех названий новой для того времени дисциплины отражает неясность представления о ее статусе.

Описывая состояние методики разведки в 1956 г., В.М.Крейтер [I5] окрестил ее "беспризорной наукой", так как она не самостоятельна и не имеет своего научно-исследовательского центра. Ею занимались отдельные ученые в разных учебных, научных и производственных учреждениях. Таково положение методики разведки и в настоящее время.

Работа [I6] не имеет существенных отличий от курсов В.М.Крейтера и группы авторов с участием С.В.Кумпана. Таких отличий нет и в анонимном учебнике для техникумов [I7].

Работы [I6, I9] наводят на мысль, что сами поиски и разведка – не геологические (у них только основы геологические) и что, по-видимому, есть также какие-то другие (негеологические) основы поисково-разведочной геологии или науки о рудных месторождениях, их поисках и разведке, т.е. зитология приобрела аналитический характер. Работы [20, 2I] также имеют крейтеровский характер.

Подчинение зитологии учению о месторождениях полезных ископаемых А.А.Якжин [22] довел до предела. Полезные ископаемые он разделил на десять классов: I) ископаемое топливо; 2) черные металлы; 3) цветные; 4) редкие; 5) благородные; 6) легкие металлы; 7) радиоактивные элементы; 8) рассеянные элементы; 9) редкие земли и I0) неметаллическое минеральное сырье. В этой как бы классификации полезных ископаемых слабо представлены неметаллические полезные ископаемые,методика разведки раздроблена на десять частей, каждая из которых привязана к той или иной группе полезных ископаемых. По существу, это не методика разведки, а курс месторождений полезных ископаемых с дополнениями зитологического характера.

В работе [23] концепция Крейтера выражена с максимальной яркостью, может быть, даже достигла вершины своей эволюции. В ней все прогрессивные и регрессивные стороны школы Крейтера видны совершенно отчетливо. Поэтому нужно внимательно рассмотреть этот труд. В ней сказано, что в книгах В.М.Крейтера "все стороны" учения о поисках и разведке вскрыты не полностью и что данный труд "призван восполнить этот пробел", т.е. полностью вскрыть "все стороны" учения о поисках и разведке. В этой же работе указано, что "внедрение математических методов отработки поисково-разведочных материалов" позволяет "упрочить научный фундамент учения о поисках и разведке", но на самом деле этих методов в книге нет (есть лишь несколько формул из физической химии). К тому же, хотя основы поисков и разведки названы теоретическими, в книге нет ни одной разработки, которую можно было бы назвать теорией.

Авторы отказались от названия "Методика поисков и разведки", заменив его словами "Учение о поисках и разведке" (без "методики"). Это учение они квалифицируют как самостоятельную "науку геологического цикла" и обосновывают это следующими ее "признаками": I) наличием особого предмета исследования (таким предметом они считают "промышленные типы месторождений полезных ископаемых"); 2) наличием специфического метода исследования("оценка геолого-экономической обстановки потенциально рудоносных площадей") и 3) возможностью предвидения или, более конкретно, "прогнозирования запасов и условий их залегания".

Под промышленным типом месторождений авторы понимают совокупность таких месторождений, каждое из которых дает не менее одного процента от объема мировой добычи соответствующего полезного ископаемого. Непромышленные же типы месторождений, т.е. месторождения с возможной добычей полезного ископаемого менее I% от мировой добычи, по-видимому, не должны интересовать учение о поисках и разведке, но, как замечают сами авторы, месторождение промышленного типа может оказаться и непромышленным, а месторождение непромышленного типа бывает и промышленным. Из этого видно, что первый признак "науки" о поисках и разведке представляет собой что-то непонятное, но ясно одно - это не способ отыскания и разведки месторождений, а нечто, относящееся к учению о месторождениях.

Касаясь второго "признака" науки, можно заметить, что понятие оценки "геолого-промышленной обстановки" - неопределенное. Возможно, авторы хотят сказать о "критериях поисков", но они, эти критерии, не определены, а просто описаны. Слово "критерий" в русском языке означает меру оценки. Следовательно, речь идет о том, какой мерой оценивать поиски (именно поиски, а не месторождения). По описанию же этих критериев можно понять, что имеется в виду не мера оценки, а установление закономерностей пространственного распределения месторождений. Эти закономерности точнее можно было бы назвать факторами локализации месторождений (термин "факторы локализации" употребляет сам В.М.Крейтер, но в другом контексте).

Третий признак тоже неясен, так как для успешного прогнозирования любого события нужно знать закон наступления этого события, а в работе [23] ни одного закона нет. К тому же слова "прогнозирование запасов и условий их залегания" тоже непонятны. Прогнозировать нужно (на основании закона, когда он открыт) не запасы, а встречу тела полезного ископаемого. Условия же залегания есть у геологического тела.

В работе [23] проявился аналитический характер зитологии или, быть может, даже не зитологии, а учения о полезных ископаемых, рассматриваемого с позиции зитологии. Данная работа представляет определенный интерес как результат естественной эволюции школы Крейтера.

В работах [24,25] наукой названо учение не о методах поисков и разведок, а о самих этих поисках и разведках. Так, учение о методах исследования предмета представлено как учение о нем самом. Большое внимание в работе [24] уделено природным типам месторождений и способам ведения геолого-раздочных работ. В то же время сделана попытка найти специфические проблемы зитологии (изменчивость залежи, система разведки, геологическая документация, новое направление в опробовании и др.). В этом можно увидеть переходную фазу от учения о месторождениях к учению о разведках, т.е. шаг вперед в зитологии. Работа [25] не имеет специальной части, в которой поиски и разведка были каким-то придатком к описанию отдельных типов месторождений полезных ископаемых. Зато сюда включены новые разделы: "Основы теории поисков, разведки и оценки месторождений" и "Рудничная (шахтная) геология". Кроме того, расширены другие разделы. При этом допущены некоторые ошибки. Поиски и разведка рассматривались в работе [25] как "геологическое производство", хотя они ничего, кроме геологических отчетов, не производят. Задача поисков определена как "нахождение промышленных месторождений, хотя известно, что непромышленные месторождения с развитием техники иногда превращаются в промышленные,и игнорировать их нельзя. Кроме того, не проведя разведки, вообще нельзя сказать, какое это будет месторождение - промышленное или непромышленное. Основным способом исследования поисков и разведки назван "метод логического анализа явлений в их исторической последовательности и воссоздания таким образом условий и истории процессов, определяющих эти явления". Но так ли это в действительности? Не лучше ли основным способом исследования в данном случае считать организованное наблюдение естественных и искусственных обнажений, дополненное логическим выводом из фактов. Большую роль играет также синтез, математизация и другие методологические операции. Спорно и такое положение: "Сущность объекта поисков и разведки может быть вскрыта и описана методами трех наук: экономики, геологии и математики". Характерно, что экономика поставлена на первое место, а геология - на второе. Что же касается логики, названной выше основой исследования, то она не упомянута совсем! Оказывается, авторы работы основой зитологического исследования считают в одном месте логику, а в другом - экономику. Есть и некоторые другие ошибки, но, несмотря на них, его все же можно считать наиболее приемлемым курсом из ныне существующих. В нем наметился переход от аналитической стадии зитологии к синтетической.

В работе [26] поставлены некоторые вопросы о теоретических основах разведки, т.е. об изменчивости месторождений в разведке, об оценке разведанных объектов и др. Эта постановка вопросов заслуживает положительной оценки, но в их решении нет заметного успеха.

Авторы работы [27], рассматривая проблему оценки месторождений, уделили много внимания качеству минерального сырья, но оставили открытым вопрос о том, какие сведения геолог должен дать проектировщику горного предприятия о геологическом строении месторождения. Способы оценки месторождений довольно простые (см. [26]).Они опираются на "здравый смысл". Между тем, у каждого геолога - свой "здравый смысл". Авторы не использовали прекрасную книгу о логике оценок [28].

Автор работ [29, 30] заинтересовался теоретическими вопросами "разведочной геологии", которую он называет "самостоятельной прикладной наукой", но в чем эта самостоятельность, читатель должен найти сам.

Этот же автор в работе [31] изложил "методологические основы разведки полезных ископаемых" и издал курс "Разведка месторождений полезных ископаемых" [32]. В этих двух работах особое внимание уделено исследованию неоднородности в строении рудных тел.

Из многих методологических операций А.Б.Каждан отдал предпочтение одному лишь моделированию предмета исследования, причем математическому. Все другие методологические операции (наблюдение, документация, описание, объяснение, классификация, конкретизация, абстрагирование, формализация, аксиоматизация, идеализация и т.д.) он оставил без внимания.

В целом работы [29 - 32], несмотря на некоторые недостатки, стимулируют развитие зитологии и в этом их положительное значение.

В работах [33, 34] есть интересная проблема принципов учения о поисковых и разведочных работах. В остальном изложение построено в духе школы Крейтера. Принципы же описаны, но не определены.

В работах Ю.А.Воронина [35 - 37] разработана формализованная теория поисков месторождений. Впрочем, если говорить более строго, то это - лишь первый шаг формализации, а именно - символизация. Изобилие аббревиатур и математико-логических обозначений, затрудняет чтение. Если эти работы перевести на естественный язык геологии, они могут быть весьма полезны. В нынешнем виде они доступны лишь весьма малому числу геологов. Некоторые идеи этих работ очень хороши (например, мысль о том, что разведка - не материальное производство, а научное исследование), зато другие идеи ошибочны (разведка - это разновидность прогнозирования).

Автор работы [38] изложил основы поисков и разведки, обратив особое внимание на практичность предлагаемых им рекомендаций.

За рассматриваемый период времени кроме общезитологических работ, рассмотренных выше, было издано много работ по частным вопросам этой дисциплины, но их рассмотрение - особая задача.

За все время своего существования зитология изменялась мало. В ней не было скачков. Она просто эволюционировала. Более или менее заметным событием было появление работы [39].

В работе [40] было отмечено, что стагнирующая зитология стала заметно отставать от общего развития геологии и от потребностей практики. В 1958 г. К.И.Кроливацкий заявил: "Застой в науке о методах разведки месторождений полезных ископаемых... наблюдается в ... последние 15-20 лет" [41]. На эти замечания школа Крейтера не ответила.

Лишь в более поздних работах [25, 31, 32] были сделаны попытки изменить основную концепцию зитологии, но они оказались робкими и непоследовательными.

В настоящее время зитологические исследования, не связанные в систему, ведутся, главным образом, в Москве, Ташкенте, Новосибирске, Ленинграде, Свердловске, Воронеже, Иркутске, Томске, Магадане и других центрах науки. Единого же центра зитология не имеет, хотя и существует Институт методики и техники разведок (ВИТР) в Ленинграде. Последний занят в основном техникой разведки.

Из приведенного выше обзора истории зитологии видно, что в этой науке все время функционировала только одна школа. У нее не было противников. В таких условиях любая, даже самая прогрессивная, научная система неизбежно должна отставать от жизни, и школа Крейтера действительно отставала.

Как известно, любое развитие в науке происходит в борьбе противоречивых идей, а если такой борьбы нет, то прогресс постепенно превращается в стагнацию, а затем в регресс. Историю науки иногда рассматривают как историю заблуждений и их преодоления. Это верно и в данном случае.

Наличие регресса в методике разведки никем не оспаривается. Неясность лишь в причинах, а следовательно, и в способах устранения этого. Авторы работ [42] заявили: "В истекшие годы объем и направленность в организации исследований по методике разведки не отвечают требованиям практики и не могут существенно влиять на повышение эффективности разведочных работ... Исследования в этой области резко отстают от уровня развития геологической науки... Само понятие методики разведки еще отчетливо не определено." По мнению этих авторов, причина отставания методики разведки в том, что объем и направленность исследований в этой области не отвечают требованиям практики.

В нашей стране существуют весьма благоприятные условия для развития зитологии: огромная территория, на которой можно наблюдать различные геологические явления и проверять различные гипотезы.

Однако во всех руководствах по подсчету запасов нет методики подсчета запасов элементов-примесей в комплексных рудах. И вот, геологи не подсчитывают эти запасы, технологи не предусматривают их извлечение из руд, и идут эти элементы в отвал, промышленный слив и в дым, загрязняя, а иногда и отравляя среду обитания людей. Между тем валовая стоимость этих теряемых элементов выше стоимости извлеченных основных элементов.

Курс методики разведки, представленный автором в 1954 г., был отклонен, поскольку основан на другой концепции, нежели книги, издаваемые школой Крейтера. А ныне всем стало ясно, что эта школа исчерпала положительное содержание, заложенное в ней, и должна уступить место чему-то новому. В зитологии нужна революция [44] и она непременно произойдет.

Во всем вышеизложенном преследовались цели - преодолеть трудности в развитии зитологии и укрепить те прогрессивные тенденции, которые отмечены в рассмотренных работах.

Литература

I. Древнегреческо-русский словарь / Сост. И.Х.Дворецкий. т.I - М.: ГИЗ, I958.

2. Шарапов И.П. Исследование законов геологии. - I983, Деп. ВИНИТИ № 977-84. - I70 с.

3. Бокий Б.В. Основы горного дела. - М.-Л.: ГИЗ, I939.

4. Арсентьев А.В. Разведочное дело. - М.: ГОНТИ, I93I.

5. Домарев В.С. Поиски и разведка полезных ископаемых. - М.-Л.: ГОНТИ, I93I.

6. Васильев И.С. Курс разведочного дела. - Литографическое издание "Кубуч", I929.

7. Васильев И.С. и др. Курс методики разведочного дела. - М.: ОНТИ, I933.

8. Глебов С.М. и др. Курс разведочного дела. Ч. 2. Методика. - М.-Л.: Гл.ред.Горно-топл.лит., I937.

9. Разведочное дело./ Под ред. С.В.Кумпана. - I934, ч.I.

I0. Разведочное дело / Под ред. С.В.Кумпана. - I947, ч.2.

II. Крейтер В.М. Поиски и разведка полезных ископаемых. - М.-Л.: Госгеолиздат, I940.

I2. Крейтер В.М. Поиски и разведка месторождений полезных ископаемых. - М.: Госгеолтехиздат, I960.

I3. Крейтер В.М. Поиски и разведка месторождений полезных ископаемых. - М.: Госгеолтехиздат, I96I.

I4. Крейтер В.М. Поиски и разведка месторождений полезных ископаемых. - М.: Недра, I969.

I5. Крейтер В.М. Учение о поисках и разведке месторождений полезных ископаемых и его основные задачи. - Советская геология, I956, № 53, с. 22-28.

I6. Великий А.С. Поиски и разведка. - Л.: Изд. ЛГУ, I949.

I7. Методы поисков и разведки полезных ископаемых/Под ред. Г.Д.Ажгирея и др. - М.: Госгеолтехиздат, I954.

I8. Смирнов В.И. Геологические основы поисков и разведки рудных месторождений. - М.: Изд. МГУ, I954.

I9. Смирнов В.И. Геологические основы поисков и разведки рудных месторождений. - М.: Изд. МГУ, I957.

20. Марков П.Н. Геолого-разведочное дело. - М.: Изд. МГУ, 1956.
21. Марков П.Н. Геолого-разведочное дело. - М.: Изд. МГУ, 1967.
22. Якжин А.А. Поиски и разведка месторождений полезных ископаемых. - М.: Госгеолтехиздат, 1959.
23. Теоретические основы поисков и разведки твердых полезных ископаемых. - М.: Недра, 1968.
24. Погребицкий Е.О. и др. Поиски и разведка месторождений полезных ископаемых. - М.: Недра, 1968.
25. Погребицкий Е.О. и др. Поиски и разведка месторождений полезных ископаемых. - М.: Недра, 1977.
26. Погребицкий Е.О. Теоретические основы разведки. - В кн.: Материалы конф. ЛГИ. Л., 1973, с. 3-19.
27. Погребицкий Е.О., Терновой В.И. Геолого-экономическая оценка месторождений полезных ископаемых. - М.: Наука, 1974.
28. Ивин А.А. Основания логики оценок. - М.: Изд. МГУ, 1970.
29. Каждан А.Б. О теоретических основах разведки месторождений полезных ископаемых. - Изв. вузов. Геология и разведка, 1970, № 4, с. 87-89.
30. Каждан А.Б. Пути совершенствования методики геолого-разведочных работ и повышения их экономической эффективности.- Советская геология, 1972, № 2, с. 13-18.
31. Каждан А.Б. Методологические основы разведки полезных ископаемых. - М.: Недра, 1974.
32. Каждан А.Б. Разведка месторождений полезных ископаемых. - М.: Недра, 1977.
33. Бирюков В.И., Куличихин С.Н., Трофимов Н.Н. Поиски и разведка месторождений полезных ископаемых. - М.: Недра, 1973.
34. Бирюков В.И., Куличихин С.Н., Трофимов Н.Н. Поиски и разведка полезных ископаемых. - М.: Недра, 1979.
35. Воронин Ю.А. К проблеме создания автоматизированной системы для решения задач поисков полезных ископаемых. - В кн.: Применение математических методов и ЭВМ при поисках полезных ископаемых. Новосибирск, 1973, с. 115-167.

36. Воронин Ю.А. Теория поисков полезных ископаемых. - Алма-Ата: Мингео.КазССР, 1975.
37. Воронин Ю.А. Исследование операций при поисках и разведке месторождений полезных ископаемых. - Новосибирск: Наука, 1983.
38. Прокофьев А.П. Основы поисков и разведки месторождений твердых полезных ископаемых. - М.: Недра, 1973.
39. Шарапов И.П. Применение математической статистики в геологии (статистический анализ геологических данных). - М.: Недра, 1965.
40. Шарапов И.П. Преодолеть отставание методики разведки. - Разведка недр, 1952, № 6, с. 16-18.
41. Кроливацкий К.И. О принципах разведки месторождений полезных ископаемых. - Алма-Ата: Мингео. Каз ССР, 1958.
42. Роговер Г.В., Хрущов Н.А.О состоянии исследований в области методики поисков и разведки месторождений твердых полезных ископаемых. - Разведка и охрана недр, 1966, № 12, с. 3-10.
43. Шарапов И.П. Элементы-примеси в комплексных рудах, их опробование и подсчет запасов. Курс лекций. - Молотов: Изд. Молотовского ун-та, 1957.
44. Шарапов И.П. Проблема научной революции в геологии. - В кн.: Применение математических методов и ЭВМ при поиске полезных ископаемых. Новосибирск, 1973, с. 40-62.

Ю.А.Воронин

СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ РАСПОЗНАВАНИЯ В ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ ГЕОЛОГОРАЗВЕДКЕ

I. В последние годы вновь возник интерес к методолого-теоретическим аспектам распознавания образов (РО), к анализу состояния и перспектив его развития как с общих позиций, так и с позиций отдельных областей знаний [I - 3 и др.] . Предпримем попытку такого анализа применительно к вычислительной геологоразведке (ВГ) [4 - 6 и др.].

2. Напомним, что, говоря о ВГ, имеют в виду отличные от принятых толкования геологоразведки [4] и ориентации в применении вычислительной техники в ней [6].

3. Необходимо оговорить, в чем заключается специфика РО в ВГ [2,5].В ВГ главное - не само по себе РО, а его использование для решения последовательности взаимосвязанных задач выделения, разделения, ранжирования, технологической характеристики и экономической оценки, а также спецификации геологических тел разного ранга (ГТ). В связи с этим оценка результатов РО не может опираться на то, как распознавали и распознают выдающиеся геологоразведчики, она может опираться только на то, зачем и как будут использоваться результаты РО. Это дополнительно предполагает выбор критериев оценки эффективности РО, в частности, определения цены ошибок распознава-

ния разных родов. В ВГ при РО имеют дело с ГТ, которые представляются как системы проб, фиксированных с точки зрения неких дифференциальных свойств ГТ. На основе этого представления, за счет неких процедур, получают описание уже самих ГТ с точки зрения неких интегральных свойств. Это дополнительно предполагает выбор процедур перехода от дифференциальных свойств ГТ к интегральным (формально говоря, от матриц "тела-пробы-координаты-время-свойства" к матрицам "тела-координаты-время-свойства"). Существенно, что имеются в виду только алгоритмические процедуры перехода. В ВГ при РО первоначально оперируют с различными образами "внутри сознания" различных геологоразведчиков, различно толкующих, например, технологические особенности и экономическую значимость ГТ. Это дополнительно предполагает выбор алгоритмов организации (формализации) образов. В ВГ при РО с самого начала приходится иметь дело с многими индивидуально-региональными материалами обучения (полученными разными геологоразведчиками в разных регионах и в разное время), которые необходимо "сшивать" в единый глобальный материал обучения. Это, помимо прочего, дополнительно предполагает сокращение индивидуально-региональных материалов обучения (в частности, для освобождения от индивидуальных ошибок в них) и расширение глобального материала обучения (за счет дополнительных эмпирических исследований, в основном над неперспективными ГТ).

4. По нашему мнению, в любом случае не имеет смысла обсуждать состояние и перспективы развития РО, не зафиксировав некие "заповеди" прикладного математика. Они предопределяют его "религию", которую можно принимать или отвергать. Только внутри единой "религии" уместны дискуссии [7 - 9] . Для ВГ примем следующие восемь "заповедей" [I0 - I2] :

I) не доверяй излишне ни одному геологоразведчику с любым опытом и авторитетом (возможно, для него твои цели понятны, но твои методы для него всегда непонятны);

2) подробно и честно описывай, откуда и как выбиралась математическая модель (хороших математических моделей не бывает, бывают только посредственные и плохие);

3) ясно различай математическую постановку и решение задачи, исследование решения и оценку - за постановку ты не отвечаешь;

4) рассматривай всегда, как минимум, две конкурирующие математические постановки;

5) получай прежде всего теоретические следствия из решения, в первую очередь - не зависящие от частностей конкретной математической постановки задачи;

6) всегда заботься об улучшении и увеличении исходных данных - они в первую очередь определяют надежность результатов внутри математической модели;

7) главное для тебя выяснять и уточнять базу знаний геологоразведки, а предсказывать, открывать и закрывать - дело геологоразведчика;

8) прежде чем строить автоматизированную систему для потребителей, построй ее для себя и укажи критерий оценки эффективности первой системы.

Как легко видеть, основу этих заповедей составляет представление о задачах (имеющих решение и не имеющих его). Для каждого из нас есть нечто, что в интеллектуальном плане сложнее, чем задача (проблема), и нечто, что в этом плане проще, чем задача (задание). Есть нечто, что больше, чем задача (надзадача), и есть нечто, что меньше, чем задача (подзадача). Все отличают постановку задачи (хорошую и плохую) и ее решение (хорошее и плохое), различают построение и реализацию алгоритма от создания и реализации инструкций и т.д. Используемые нами представления о задачах ВГ рассматривались ранее [2] .

5. Сформулируем исходные методологические посылки для анализа состояния и перспектив развития РО в РГ [5, 13]. Более чем 20-летний опыт применения РО в ВГ не привел к изменению или уточнению каких-либо основных геолого-разведочных концепций и понятий, к созданию более совершенных теоретических и экспериментальных средств геолого-разведочного исследования, к возникновению новых организационных и управленческих форм в геологоразведке. Однако РО в ВГ позволило решить массу практических распознавательских вопросов геологоразведки. Наши ответы на эти вопросы принимались в геологоразведке во

внимание тогда и только тогда, когда они совпадали с ожиданиями и желаниями геологоразведчиков [2, 14, 15]. Применение РО в ВГ до сих пор было связано с ошибкой нулевого рода: использованием традиционной базы знаний геологоразведки и ошибочных представлений о постановке и решении задач РО [6, 11]. До настоящего времени РО в ВГ опирается на стихийно сложившуюся и, видимо, неудачную технологию действий, которая не позволяет в конкретной геолого-разведочной ситуации, например, получить обоснованные ответы на вопросы, когда имеет смысл заниматься РО, а когда нет, как можно и как нельзя заниматься РО, как оценивать результаты и сравнивать различные алгоритмы РО, за что и как должны отвечать геологоразведичики и прикладные математики. Есть острая необходимость в новой технологии РО в ВГ [2, 5].

Эффективное развитие РО в ВГ - это, прежде всего, согласованное развитие методологии и теории РО, с одной стороны, и методологии и теории ВГ, с другой [4, 12]. Ясно, что определяющими факторами являются именно методология и теория ВГ [5]. Если говорить об эффективном развитии отдельно РО в ВГ, то следует вести речь прежде всего о создании теории классифицирования и ее приложения для решения классификационных вопросов РО, а именно - о построении классификаций образов, материалов обучения, априорных предположений, алгоритмов, критериев оценки РО и др. [2, 12, 16].

6. Представляется очевидным, что РО актуально тогда и только тогда, когда имеем дело с множеством объектов, уже освоенным для РО. Наши представления о таких множествах объектов фиксировались ранее [2, 12], их можно пояснить, опираясь на иллюстративный пример [3, с. 8-10], следующим образом.

Для того чтобы говорить о сортировке томатов (для продажи, консервирования, переработки) за счет РО,необходимо, но еще не достаточно уметь

- при необходимости точно отделять за счет измерения задающих свойств и задающего алгоритма экземпляры томатов от прочих экземпляров, например, огурцов и яблоков,
- нумеровать экземпляры томатов,
- при необходимости точно сортировать экземпляры томатов

за счет измерения организующих свойств и за счет организующего алгоритма,

- измерять распознающие (косвенные) свойства экземпляров томатов (форма, размер, цвет и пр.),

- перечислять все возможные экземпляры томатов с учетом всех возможных значений их распознающих свойств.

При этом на выбор и процедуры измерения задающих, организующих и распознающих свойств должны быть наложены некоторые ограничения [5,I2]. Ясно, что база знаний о сортировке томатов предопределяет успех применения РО в таких целях больше, чем все остальное.

7. Вполне очевидно, что эффективное РО в ВГ предполагает фиксированные представления об образах , необразах и различных категориях образов. Эти представления обсуждались ранее в [2, I2, I3]. Их можно пояснить так. Образы суть такие классы объектов, которые могут быть получены без явного перечисления всех своих объектов, за счет фиксации значений неких организующих свойств объектов и неких организующих алгоритмов. Категории образов различаются так.

Во-первых, на основании каких именно организующих свойств, с точки зрения способов определения их значений, они получены. Напомним [5, I2, I3] , что с этой точки зрения любые свойства объектов различаются на объективные (определяются прибором или формулой с теорией), квазиобъективные (определяются прибором или формулой без теории), экспертные (определяются одним экспертом или однородной по интересам группой экспертов), торговые (определяются разнородной по интересам группой экспертов) и директивные.

Во-вторых, на основании каких именно организующих алгоритмов образы получены [2, 5, I2]: неявных или явных, основанных или на отношениях неотличимости (элементарные), или отношениях несущественной неотличимости (простые), или функциональной неотличимости (сложные), см. таблицу *).

---

*) В первом случае образы представляют собой классы неотличимости по организующим свойствам, во втором - компоненты связности этих классов, в третьем - подкомпоненты этих компонент [2, I3].

<table>
<tr><th rowspan="3">Виды органи-зующих свойств</th><th colspan="4">Виды организующих алгоритмов</th></tr>
<tr><th colspan="3">Явные</th><th rowspan="2">Неявные</th></tr>
<tr><th>Элемен-тарные</th><th>Простые</th><th>Сложные</th></tr>
<tr><td>Объектив-ные</td><td>I</td><td>2</td><td>3</td><td rowspan="5">I6</td></tr>
<tr><td>Квазиобъ-ективные</td><td>4</td><td>5</td><td>6</td></tr>
<tr><td>Экспертные</td><td>7</td><td>8</td><td>9</td></tr>
<tr><td>Торговые</td><td>I0</td><td>II</td><td>I2</td></tr>
<tr><td>Директив-ные</td><td>I3</td><td>I4</td><td>I5</td></tr>
</table>

Не зная категории образов, нельзя говорить об осмысленном оперировании с ними. В случае томатов имеем дело с тремя скрытыми образами (продажей, консервированием, переработкой), организующие свойства - торговые (эксперты: производители и потребители), организующие алгоритмы - неявные.

В ВГ почти всегда имеем дело со скрытыми образами, экспертными организующими свойствами и неявными организующими алгоритмами.

При РО в ВГ, конечно, предпочтительнее иметь дело с ясными образами, объективными организующими свойствами и организующими алгоритмами - явными, желательно, элементарными и простыми. В [2, I2, I3] обсуждалась необходимость принятия следующей методологической установки: распознавать можно только ясные образцы, имея дело со скрытыми образами, в первую очередь необходимо ставить задачу организации ясных образов и только во вторую - задачу распознавания, при этом нужно учитывать два обстоятельства.Во-первых,переход от скрытых образов к ясным.Организация образов всегда связана с известным произволом, которым можно распорядиться так, чтобы облегчить себе в дальнейшем распознавание, т.е. получить не только ясные, но и правильные образы. Во-вторых, организующих свойств, как правило, мало, а распознающих свойств - много: интуиция геологоразведчиков должна учитываться при организации образов, а не при их распознавании.

8. Разумеется, что эффективное РО в ВГ предполагает фиксированное разделение ясных и правильных образов на типы [2,I7].

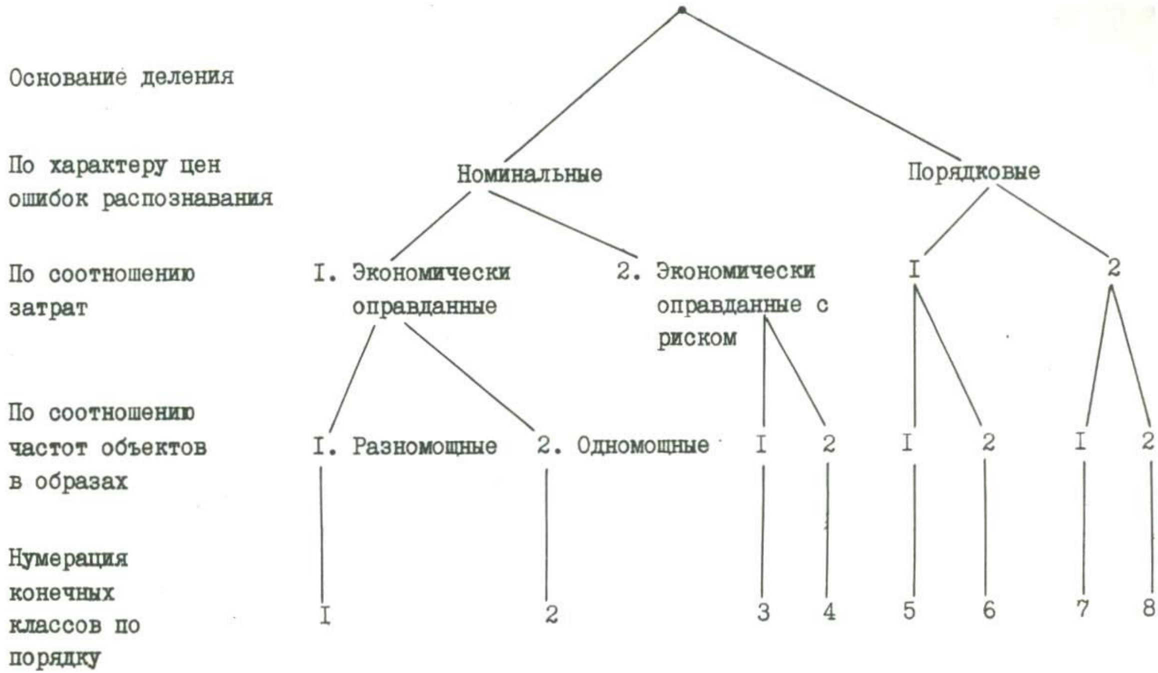
Во-первых, типы образов можно выделять по характеру цен ошибок распознавания родов $k-1$ на номинальные (нет зависимости этих цен от $k-1$) и порядковые (есть зависимость этих цен от $k-1$). Ясно, что при сортировке томатов (продажа, консервирование и переработка) имеем дело с порядковыми образами. Например, цены ошибки объявления продажного экземпляра томата ($k = 1$) консервированным ($l = 2$) или перерабатываемым ($l = 3$) различны.

Во-вторых, типы образцов можно выделять по соотношению затрат на отнесение объектов к образам на основе организующих свойств и организующего алгоритма (C_{Φ}) и распознающих свойств и распознающего алгоритма (C_F), с учетом вероятности и цены ошибок распознавания родов $k-l$ ($p(kl)$, HC_{kl}) на экономически оправданные ($C_{\Phi} \gg C_F + \overline{p(kl)C_{kl}}$) и экономически оправданные с риском ($C_{\Phi} > C_F + \overline{p(kl)C_{kl}}$).

При сортировке томатов имеем дело с экономически оправданными образами.

Можно разделять образцы на типы и по соотношению частот объектов разных образов на разномощные и одномощные. При сортировке томатов соотношение этих трех частот может быть самым разным (положим, в зависимости от способов и сроков доставки томатов на сортировку). Ясно, что нет смысла говорить о постановке задач РО в ВГ, если не известно, с каким типом образов имеем дело (см. рисунок) [I7].

9. Эффективное РО в ВГ должно опираться на фиксированные представления о типах, родах, классах и видах исходного эмпирического материала $A_{исх}$. Такие представления подробно описаны в [2, 4, I2]. Пусть



Типы образов (ясных и правильных)

$$A_{исх} : \{a_i;\ F_i;\ l_i\},\ i = 1,2,\ldots,n,\ l_i = 1,2.$$

Здесь a_i – объекты из A, F_i – значения распознающих свойств F на a_i, $F = (f_k)$, $f_k = (f_k^h)$, $k = 1 \div K, h = 1 \div H(k)$, l_i – показатель принадлежности a_i к образу A_1 или A_2, $n = n_1 + n_2$, где n_1 и n_2 – число a_i, принадлежащих A_1 и A_2. Фиксируем некие меру сходства $\lambda_F(a_i, a_j)$ и меру связи $\sigma_A(f_l, f_m)$ [5, I2]. Предполагалось разделять $A_{исх}$ на типы по текстуре – либо детерминированной ($l_i \neq l_j$ $F_i \neq F_j$), либо вероятностной ($l_i \neq l_j \neq F_i \neq F_j$), и по структуре – либо полной ($n_1, n_2 \neq 0$), либо неполной (n_r, $n_o \neq 0$, $r,p = 1,2$).

Роды $A_{исх}$ выделялись по матрице сходства $\lambda[A^2_{исх}]$: либо связной (для любых a_i, a_j из $A_l^{исх}$, $l = 1,2$, имеет место $\lambda_F(a_i, a_j) > 0$), либо несвязной (для некоторых a_i, a_j из $A_l^{исх}$, $l = 1,2$, имеет место $\lambda_F(a_i, a_j) = 0$). Классы $A_{исх}$ предполагалось выделять по матрице связи $\sigma_{A_{исх}}[F^2]$ за счет некоего показателя связности для F и по символу шкальности F – $k_1 k_2 k_3$ фиксирующему число f_l из F, измеренных в номинальной, порядковой и арифметической шкалах.

Виды $A_{исх}$ выделялись на основе неких показателей компактности $A_{исх}$ (компактные, мало компактные, некомпактные) и представительности $A_{исх}$ (представительные, мало представительные, непредставительные). Конкретные выражения для показателей связности, компактности и представительности, предложенные нами [5, I2, I8], конечно, нуждаются в проверке и совершенствовании. Нет никакой уверенности в том, что предлагаемые способы выделения типов, родов, классов и видов $A_{исх}$ не нуждаются в коренном пересмотре. Сейчас важно, что нет смысла говорить о разумном накоплении опыта РО в ВГ без введения типов, родов, классов и видов $A_{исх}$.

I0. Эффективное РО в ВГ обязано опираться на фиксированные представления о полигонах РО. Пусть в нашем распоряжении имеются различные множества объектов $A(m)$, освоенные для РО, состоящие из образов $A_1(m)$ и $A_2(m)$ фиксированной категории α и фиксированного типа β. Положим, что имеются исходные эмпирические материалы $A_{исх}(m):(a_i(m) F_i(m) l_i(m))$,

$i = 1 \div n(m)$; $n(m) = n_1(m) + n_2(m)$; $l_i(m) = 1(m), 2(m)$; $F(m) = (f_k(m))$, $f_k(m) = (f_k^h)$, $k = 1 \div k(m)$, $h = 1 \div H(m)$, $m = 1 \div M$, которые с учетом мер сходства $\lambda_F(a_i, a_j)$ и мер связи $\sigma_A(f_l, f_m)$ относятся к типу γ, роду δ, классу ε и виду $\varkappa$. В таком случае будем говорить, что имеем дело с полигоном РО вида $(\alpha - \varkappa)$, содержащим M конкретных ситуаций РО вида $(\gamma - \varkappa)$ [2, I7].

Разумеется, сортировка томатов (продажа, консервирование, переработка) и разбраковка нефтеносных структур (высокая перспективность, средняя и низкая) могут быть связаны с конкретными ситуациями РО одного вида, а сортировка томатов, русских и болгарских, может быть связана с конкретными ситуациями РО разного рода.

II. Эффективное РО в ВГ следует связывать с наличием некоторого алгоритма многократного, случайного и допустимого разбиения исходного эмпирического материала $A_{исх}(m)$ на материал обучения и материал экзамена ($A_{об}(m)$ и $A_{эк}(m)$), отвечающих конкретной ситуации распознавания одного и того же вида $(\alpha - \varkappa)$:

$$A_{исх}(m) : \{A_{об}(m,s),\ A_{эк}(m,s),\ m = 1 \div M,\ s = 1 \div S\}.$$

При этом будем говорить о полигоне РО вида $(\alpha - \varkappa)^1_M$, содержащем $\sum_{m=1}^{M} S(m)$ конкретных ситуаций РО вида $(\alpha - \varkappa)$ [2].

I2. Для эффективного РО в ВГ, в частности, для классифицирования алгоритмов РО, необходимо фиксировать, какие два алгоритма R следует считать относящимися к одному виду (почти одинаковыми с практических и теоретических позиций). Пусть R' и R'' – два алгоритма РО, формально применимых в одних и тех же конкретных модельных ситуациях РО видов $\{\alpha, \varkappa\}$, т.е. имеющих одну и ту же область формальной применимости. Если R_1 и R_2 во всех конкретных ситуациях РО дают одно и то же относительное число ошибок на всех объектах экзамена, то их следует считать относящимися к одному классу. Если же они при этом ошибаются на одних и тех же объектах экзамена, то их следует считать относящимися к одному виду. Естественно, что можно формулировать принадлежность R_1 и R_2 к одному классу и одному виду, ориентируясь на конкретные ситуации РО какого-либо одного вида $(\alpha - \varkappa)$. Заметим, что наличие фиксированных представлений о принадлежности R_1 и R_2 к одному классу и виду является необходимым, но еще далеко не достаточным условием создания теории алгоритмов РО в ВГ [2,I2].

I3. Опыт показывает, что известные сейчас алгоритмы РО R в ВГ во многих конкретных ситуациях РО дают одно и то же число ошибок на экзамене, но ошибаются на разных объектах экзамена [I3, I9, 20 и др.]. В связи с этим эффективное РО в ВГ должно исходить из возможности привлечения в одной и той же конкретной ситуации РО для распознавания объектов разных "категорий" разных алгоритмов РО в целях повышения надежности их распознавания. Для этого необходимо ввести представления о категориях объектов экзамена и оценках надежности их распознавания фиксированным алгоритмом РО.

I4. Поясним используемые представления о категориях объектов экзамена [2, I7, 2I]. Пусть имеем дело с $F(m)$ и с $A_{исх}(m):\{A_{об}(m, s), A_{эк}(m, s)\}$. Рассмотрим объект a_i из $A_{эк}(m, s)$ и $A_{об}(m, s)$ в $F(m)$. Относительно $A_{об}(m, s)$ объект a_i из $A_{эк}(m, s)$ может в $F(m)$ занимать разные позиции: быть далеко или близко относительно $A_{об}(m, s)$, находиться "между", "сбоку","слева", "справа" или "сверху-снизу" относительно $A^1_{об}(m, s)$ и $A^2_{об}(m, s)$. Если ввести $\mu_F(a_i, A(m, s))$ – некую функцию принадлежности a_i к $A(m, s)$ в $F(m)$, например, так, как это сделано в [2, 2I], то можно за счет $\mu_F(a_i, A_{об}(m,s))$, $\mu_F(a_i, A^1_{об}(m,s))$ и $\mu_F(a_i, A^2_{об}(m, s))$ формализовать представления о "разных позициях" объекта a_i из $A_{эк}(m, s)$ относительно $A_{об}(m, s)$ в $F(m)$, например, так, как это сделано в [I7]. За счет этого получим представления о категориях объектов a_i из $A_{эк}(m,s)$ относительно $A_{об}(m, s)$ в $F(m): a_i = a_i(p)$, $p=1 \div P$. Вопрос о том, как оценивать разумность того или иного введения категорий обсуждаться здесь не будет [2].

I5. Отметим, как вводятся представления о надежности РО в конкретной ситуации РО вида $(\alpha - \varkappa)$ алгоритмом R для объектов a_i категории p. Пусть имеем дело с полигоном РО вида $(\alpha - \varkappa)$:

$$A_{исх}(m) : \{A_{об}(m, s), A_{эк}(m, s)\}, m = 1 \div M, \quad s = 1 \div S(m).$$

Рассмотрим $A^{p}_{эк}(m,s)$. Положим, что из $n_p(m, s)$ объектов из $A^{p}_{эк}(m, s)$ правильно распознано R только $n^{+}_{p}(m, s)$ объектов. Интересующую нас надежность можно определить как [2]

$$\omega(\alpha - \varkappa); R; p \equiv \frac{1}{S(m)} \sum_m \sum_s \frac{n^{+}_{p}(m, s)}{n_p(m, s)}.$$

16. Эффективное РО в ВГ требует введения представлений о допустимых, рациональных и эффективных алгоритмах РО. Ранее под допустимыми алгоритмами РО понимали такие алгоритмы R, которые удовлетворяют неким заранее фиксированным общим методолого-теоретическим требованиям. Эти требования сформулированы, в частности, в [2, с. 116 , 117]. Дополнительно необходимо потребовать, чтобы алгоритмы R включали в себя алгоритмы описания (переход от дифференциальных свойств ГТ к их интегральным свойствам) [22]. Под рациональными алгоритмами РО понимали такие алгоритмы R, которые удовлетворяют неким заранее фиксированным методолого-теоретическим требованиям, отвечающим полигону РО фиксированного вида $(\alpha - \varkappa)$. Конкретно об этих требованиях речь шла, в частности, в [2,12]. Дополнительно необходимо потребовать, чтобы для таких алгоритмов R время на распознавание t объектов экзамена – $T(R, t)$ – увеличивалось с ростом n (числа объектов в материале обучения), k (числа распознающих свойств) и q (среднего числа возможных значений этих свойств) известным образом и не быстрее, положим, чем $an^2 + bk + cq$. Заметим, что для полигона РО фиксированного вида $(\alpha - \varkappa)$ в качестве показателя сложности алгоритма R можно взять "нормированное" $T(R, t)$ [2, 9].

Под эффективными алгоритмами РО R понимаем такие алгоритмы R, которые удовлетворяют некоторым заранее фиксированным условиям, отвечающим конкретной ситуации фиксированного вида $(\alpha - \varkappa)$. Конкретно об этих условиях говорилось, в частности, в [2]. Важно, что критерии эффективности алгоритмов R должны, помимо прочего, зависеть от цен организации и распознавания объектов C_Φ и C_F и определяться отдельно для объектов распознавания разных категорий. Существенно, что из предыдущего вытекает, что сравнивать между собой алгоритмы R_1 и R_2 на конкретном материале экзамена если и можно, то только при некоторых условиях, для фиксации которых необходимо предварительно задаться некоторой классификацией алгоритмов R_i [2].

Для всей теории РО в ВГ важна следующая методологическая посылка: объектом теоретического анализа могут быть не отдельные алгоритмы R_i ("отдельные особи"), а только множества алгоритмов $\{R_i\}$ ("множества особей"), представляющие собой "виды", "классы" и другие "таксоны" [2, 12].

17. Не имеет смысла говорить об эффективном РО в ВГ при отсутствии классификации алгоритмов РО R_i. И сейчас дело не в том, чтобы предложить ту или иную "разумную" классификацию R_i, что сделать не так и сложно [1, 3, 23 и др.], а в том чтобы хотя бы осознать задачу на построение "разумной" классификации R_i [2, 12]. С этой целью необходимо:

- во-первых, фиксировать общее конструктивное представление для множества всех допустимых R_i, т.е. $\langle R_i \rangle$;
- во-вторых, уточнить представления о классах и видах R_i, которые были даны в п.12;
- в-третьих, сформулировать достаточно большой набор оснований (признаков) для деления $\langle R_i \rangle$, которые являются существенными ("не режут виды"), почти не зависимыми между собой и просто реализуемыми.

В настоящее время речь можно вести только о формировании упомянутого набора. Начало этому было положено в [2]. Как там отмечалось, это формирование требует предварительного построения классификации математических конструкций, используемых для конструирования R_i, например, мер сходства и связи [1, 11, 24 и др.].

18. Можно считать очевидным, что эффективное РО в ВГ возможно только на базе заранее фиксированной общей схемы РО (или сценария) [2, 12, 13]. По поводу этой схемы, один из

вариантов которой был использован в [15, 20], заметим следующее.

Общая схема РО в ВГ должна выделять следующие стадии РО: 1) формулировку задачи; 2) конкурирующие математические постановки; 3) решения; 4) исследования; 5) оценку качества конкурирующих постановок задачи; 6) оценку рациональности и эффективности решений задачи; 7) анализ экспериментальных и теоретических возможностей повышения эффективности решений задачи; 8) получение методолого-теоретических следствий из решения задачи; 9) объяснение результатов решения задачи.

Эта схема должна давать некое описание всех стадий РО через описание их подстадий, этапов и подэтапов. При создании общей схемы РО в ВГ необходимо учитывать общие установки новой технологии РО в ВГ [2]. Например, изменение функции геологоразведчиков: необходимость их включения в стадии РО, связанные с формулировкой задачи и выработкой конкурирующих математических постановок задач, и исключения из всех стадий РО, связанных с оценкой результатов. В частности, изменяются цели РО для геологоразведчиков: на первое место должны выходить уточнение методолого-теоретических представлений, связанных с образами, устранение ошибок в исходном эмпирическом материале и его эффективное расширение. Например, изменение отношения геологоразведчиков к организации и распознаванию образов (основное внимание следует обратить именно на организацию образов).

Литература

1. Васильев В.И. Распознающие системы. - Киев: Наукова думка, 1983.
2. Воронин Ю.А. Теория классифицирования и ее приложение. - Новосибирск: Наука, 1985.
3. Горелик А.Л., Гуревич И.Б., Скрипник В.А. Современное состояние проблемы распознавания. - М.: Радио и связь, 1985.

4. Воронин Ю.А. Исследование операций при поисках и разведке месторождений полезных ископаемых. - Новосибирск: Наука, 1983.
5. Воронин Ю.А. Вычислительная геологоразведка и ее вклад в разрешение проблемы комплексного прогнозирования. - Тр. Международного симпоз."Основные направления разработки количественного прогнозирования месторождений". Алма-Ата, 1985, с. 36-38.
6. Лаврентьев М.М. От редактора. - В кн.: Вычислительные методы геологоразведки. Новосибирск; 1984.
7. Краснощеков П.С., Петров А.А. Принципы построения моделей. - М.: Изд-во МГУ, 1983.
8. Моисеев Н.Н. Учить общению с машиной. - Наука и жизнь, 1973, № 7, с. 6-11.
9. Юдин А.Б., Юдин А.А. Число и мысль. - М.: Знание, 1985.
10. Блехман И.И., Мышкис А.Д., Пановко А.Г. Прикладная математика, предмет, логика, особенности подходов. - Киев: Наукова думка, 1976.
11. Дородницын А.А. Проблемы математического моделирования в описательных науках. - Кибернетика, 1983, № 4, с.6-10.
12. Воронин Ю.А. Введение в теорию классификаций. - Новосибирск, 1982.
13. Воронин Ю.А. и др. Геология и математика. Задачи диагноза и распознавания в геологии, геофизике и геохимии. - Новосибирск: Наука, 1968.
14. Бугаец А.Н. Применение автоматизированных систем при прогнозе месторождений (на примере твердых полезных ископаемых). - В сб.: Задачи оптимизации выбора объектов и способов воздействия на них. Новосибирск, 1983, с.26-40.
15. Воронин Ю.А. и др. О построении автоматизированных систем для решения задачи распознавания при поисках и разведке полезных ископаемых. - В сб.: Применение математических методов и ЭВМ при поисках и разведке полезных ископаемых. Новосибирск, 1976, с. 78-89.
16. Воронин Ю.А., Гафуров Д.З., Шевченко Н.Г. Некоторые классификационные вопросы распознавания: Препринт № 380.- Новосибирск, 1982. - 38 с. - В надзаг.: ВЦ СО АН СССР.

17. Воронина Н.Ю., Зверинский К.Н. О полигонах распознавания. - В сб.: Вычислительные методы геологоразведки. Новосибирск, 1984, с. 106-113.
18. Воронин Ю.А. Введение мер сходства и связи для решения геолого-геофизических задач. - Докл. АН СССР, 1971, т.139, № 5, с. 64-70.
19. Губерман Ш.А. Анализ эффективности различных программ узнавания при решении геологических задач. - В кн.: Комплексная интерпретация геолого-геофизических данных на ЭВМ. М.: 1966, с. 51-70.
20. Шевченко Н.Г. Разработка АС и ее использование в решении диагностических задач: Автореф. дис. на соиск. учен. степ. канд. физ.-мат.наук. - Новосибирск, 1984. - 16 с.- (НЭТИ).
21. Воронин Ю.А. Зверинский К.Н. Проективная мера сходства между объектом и множеством объектов. - В сб.: Вычислительные методы геологоразведки. Новосибирск, 1984, с. 113-124.
22. Сергеев В.А. Проблема описания в геологоразведке. - В кн.: Вычислительные методы в геологоразведке. Новосибирск, 1984, с. 162-170.
23. Липецкий А.М. Алгоритмы диагностики заболеваний в свете общей теории распознавания. - Владивосток, 1981.
24. Воронина Н.Ю. Классификация видов мер сходства между объектами по одному свойству. - Настоящий сб., с. 84-88.

А.Н.Бугаец, Е.П.Вострокнутов, А.И.Вострокнутова

НОВЫЙ ПОДХОД К ПОСТРОЕНИЮ СИСТЕМ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОГНОЗИРОВАНИЯ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

За последние десятилетия добыча рудных полезных ископаемых резко возросла. Это было достигнуто в большей степени за счет применения комплексных методов исследования, расширения площадей опоискования, увеличения глубины исследования, т.е. за счет увеличения затрат на поиски и разведку. Однако в условиях перевода народного хозяйства на интенсивный путь развития, все большее значение приобретает разработка методов, увеличивающих эффективность геолого-разведочных работ без существенного повышения их стоимости. Поскольку принципиально важным этапом, определяющим геологическую эффективность всего цикла работ, является прогнозирование, наиболее реальной целью интенсификации следует считать увеличение эффективности геологического прогноза.

Эта проблема традиционно решалась путем развития методов металлогенического анализа: построения генетических моделей образования месторождений, уточнения закономерностей их размещения, выявления основных прогнозных признаков [I]. Однако при прогнозировании на ЭВМ получил распространение другой подход выявления пространственных закономерностей размещения геологических объектов [2, 3]. Это объясняется тем, что для постановки задачи на ЭВМ ее необходимо было представить как имеющую вычислительную, количественную природу. Однако металлогения, как и вся геология, является, в значительной степени, описательной наукой, модели которой имеют качественный характер. Этим объясняется то, что сложившаяся методика автоматизированного решения прогнозных задач основывается не на традиционном подходе, а на количественных вычислительных моделях, применяемых в методах математической статистики, теории распознавания образов и др. На основе этих методов был реализован ряд систем, позволяющих решать конкретные прогнозные задачи [3].

Однако проблема существенного увеличения эффективности процесса прогнозирования не может быть решена без устранения некоторых принципиальных трудностей, препятствующих широкому внедрению автоматизированных методов прогноза в геологическую практику, и в первую очередь без использования всех достижений металлогении. Теоретические трудности большинства используемых сейчас методик связаны с тем, что методы, подобные методам распознавания образов, являются по существу формальными методами выявления закономерностей в сложных данных, вне зависимости от их природы. Это приводит к тому, что часто без внимания остаются принципиальные ограничения используемых математических моделей, например, по типам используемых распределений, классам объектов в пространстве признаков и т.д. Математические методы часто используются для решения широкого круга задач, несмотря на несоответствие характера используемых исходных данных условиям применимости подобных алгоритмов.

Это же представляет основную сложность и при практическом применении систем прогнозирования. Здесь проблемы математической формулировки исходной задачи, выбор алгоритмов решения, интерпретация полученных результатов, формулируются как проблемы создания "человеко-машинной" технологии автоматизированного прогнозирования [4, 5]. Целью создания человеко-машинной системы является возможность разделения реализуемых системой функций (и введения вспомогательных функций) так, чтобы, оставив за геологом постановку математических задач, поручить их дальнейшее решение машине. Предполагается также существование обратной связи, позволяющей геологу переформулировать задачу, если полученные результаты не получают четкой содержательной интерпретации. Вопросы, возникающие при переходе от геологической постановки прогнозной задачи к ее формальному представлению в автоматизированной системе, обычно вызывают наибольшие трудности, однако именно они определяют качество прогноза. Это формирование признакового пространства, выбор объектов прогнозирования, выбор эталонов и др.

Решение рассмотренных вопросов еще более осложняется теми специальными требованиями, которые накладывают используемые формальные методы на количество и качество имеющейся геологической информации. Поскольку прогноз проводится в условиях недостатка информации, это затрудняет использование принятых методик прогнозирования. Например, хотя наиболее полно прогнозная оценка перспективной территории реализуется при ее сплошном разбиении на элементарные ячейки, а не при оценке по случайно выделенным в ее пределах рудопроявлениям, такая информация имеется лишь по небольшому числу районов. Часто трудно подобрать удовлетворительные по качеству рудные и безрудные эталоны в количестве, необходимом для обеспечения надежности прогноза и оценки его точности, что также приводит к снижению точности прогноза. Другой, относящейся к данным проблемам, является проблема создания информационной базы существующих автоматизированных систем. Поскольку обрабатывается большое количество признаков, снятых по регулярной сети, требуется кодирование и ввод очень больших объемов информации. Затраты на создание информационной базы достигают 80-90% общих затрат на эксплуатацию системы [5].

Применение количественных методов при анализе информации в процессе прогнозирования дает ряд несомненных преимуществ, так как позволяет упорядочить процедуру прогнозирования, ограничить субъективизм, присущий процессу прогноза, учесть практически неограниченный материал, что невозможно при традиционном анализе. Однако следует подчеркнуть [2, 5, 4], что при использовании формальных схем нельзя полностью учесть опыт поисков и достижения теории рудообразования, известные закономерности пространственного размещения месторождений, являющиеся основой, определяющей качество прогнозных работ.

В последнее десятилетие широкое распространение в различных областях науки и техники получили методы искусственного интеллекта [6], представляющие математическую основу для реализации на ЭВМ задач, требующих для их решения знаний и опыта специалиста и способностей человека к разумным выводам. Для решения таких задач был развит подход, заключающийся в построении определенного типа систем искусственного интеллекта так называемых экспертных систем. Экспертные системы успешно используются в таких прикладных областях, где ЭВМ раньше не применялись или их использование было связано с существенными трудностями, например, в постановке медицинского диагноза, управлении сложными системами, обработке естественного языка [6-8]. Цель применения экспертных систем при геологическом прогнозировании должна состоять в том, чтобы предоставить в формальном виде и использовать знания, которыми, очевидно, располагает и пользуется геолог, решающий прогнозные задачи. Методы искусственного интеллекта сформировались как методы решения таких интеллектуальных проблем - они имитируют процесс решения задач человеком. Такой подход, являясь принципиально новым по сравнению с используемыми математическими методами, будет обладать рядом существенных преимуществ.

Принципиальным преимуществом использования методологии экспертных систем является возможность реализации металлогенических моделей, т.е. возможность представления реальных профессиональных знаний [8]. Причем экспертные системы в состоянии усваивать именно эвристическое знание, т.е. знание, как правило, не зафиксированное явно, а представляющее именно те, часто упоминаемые опыт и интуицию геолога, которые являются основой прогнозных представлений. Использование моделей такого типа позволит реализовать все преимущества формальных моделей, которые неоднократно отмечались [9]: сделает возможным отчуждение прогнозных представлений от геолога, сравнение различных моделей между собой, их широкую экспериментальную проверку, согласование имеющихся прогнозных теорий между собой.

Использование всей суммы геологических знаний о размещении месторождений полезных ископаемых конкретного типа, накопленной в металлогенической теории, позволит существенно увеличить точность и надежность прогноза. Повысится и обоснованность прогноза, поскольку реализация прогнозных моделей на

ЭВМ позволит одновременно учитывать неограниченное количество признаков и применять для прогнозирования сложные логические процедуры. К тому же может быть использована вся имеющаяся по району прогноза геологическая информация, т.е. качество геологических данных может быть гораздо ниже, чем данных, используемых при применении статистических методов, поскольку отпадают специальные требования об однородности выборок, приведении их к ячейкам равномерной сети и т.д.

Использование подхода, основанного на технологии экспертных систем, позволит принципиально изменить организацию автоматизированных систем прогнозирования. Если в существующих автоматизированных системах прогнозирование является сложным многоступенчатым процессом, наличие в системе естественной для геолога модели исключает многие этапы, делая возможным непосредственное взаимодействие геолога с ЭВМ без участия программиста или математика. Этому способствуют также такие возможности, реализуемые подходом, основанным на технике экспертных систем, как способность объяснить пользователю, почему потребовалась та или иная информация и способность к гибкому ведению диалога [7]. Проблема организации такого взаимодействия ставится в искусственном интеллекте как проблема создания интеллектуального интерфейса [10].

Немаловажной особенностью является также то, что вычислительную основу моделей, основанных на принципах экспертных систем, составляют методы оперирования символами; ими, по существу, не выполняется никаких численных расчетов. Отказ в некоторых случаях от трудоемких в вычислительном отношении статистических методов позволит снизить требования к вычислительным ресурсам. Таким образом, станет возможной реализация систем автоматизированного прогнозирования на мини- и микроЭВМ, что сделает их более доступными.

Опыт применения методологии экспертных систем в области геологического прогнозирования уже имеется. В конце 70-х годов в International Stanford Research Institute (SRI International), USA была разработана экспертная система PROCPECTOR.

Имеющиеся геологические сведения о том или ином типе рудных месторождений моделируются в системе в виде некоторого множества правил и умозаключений. В системе формальные модели месторождений представляются как сеть отношений между целевыми характеристиками и геологическими гипотезами, которые "соединяются" в виде отдельных сетей умозаключений или правил. Эти правила определяют изменение состояния знаний об одной геологической гипотезе при изменении состояния знаний о другой. Состояние знаний о гипотезе оценивается величиной вероятности, которая измеряет степень соответствия данной гипотезы истине или достоверному геологическому факту. Вначале каждой геологической гипотезе, сформированной в соответствии с моделью того или иного типа месторождения, приписывается априорная вероятность, как правило, достаточно низкая. При получении полевых данных происходит корректировка этих вероятностей по методам оценки апостериорных вероятностей Байеса.

Описанный подход можно продемонстрировать, рассмотрев часть сети умозаключений для получения выводов о степени сходства выявленного в поле объекта (экзаменуемого объекта) с моделью меднопорфировых месторождений типа Съерра-де-Паско. В этой части модели наиболее "высокое" по иерархии место занимает гипотеза, что экзаменуемый объект - это благоприятная интрузивная система. Априорная вероятность этой гипотезы - одна стотысячная процента. Чтобы придти к этой гипотезе и одновременно оценить ее апостериорную вероятность, для экзаменуемого объекта вначале проверяются: I) гипотеза о благоприятности штоков внутри интрузивов (априорная вероятность этой гипотезы для модели - 0,05%); 2) гипотеза о благоприятности даек (априорная вероятность этой гипотезы для модели - 0,I%).

Вначале по полевым данным оценивается апостериорная вероятность этих двух гипотез. Так, если получены данные - "дайки образуют рои", "дайки внутри интрузивов", "мощность даек до 20 м", то логическое пересечение этих фактов, т.е. их одновременное присутствие, изменяет априорную вероятность гипотезы о благоприятности даек с 0,I до 60%. Для переоценки вероятности гипотезы о благоприятности штоков внутри интрузивов необходимы полевые факты, что диаметр массива не менее I км и что в таком массиве есть штоки других интрузивных пород. Логическое пересечение этих фактов переоценивает вероятность гипотезы о благоприятности штоков внутри интрузивов с 0,05 до 60%. Для окончательной оценки апостериорной вероятности гипотезы о благоприятности интрузивной системы для данного экзаменуемого объекта необходимы полевые данные о наличии в массиве интрузивных брекчий и их благоприятности, о порфировых породах внутри интрузивной системы. Тогда, если эти факты имеют место все вместе и если апостериорные вероятности гипотез о благоприятности штоков внутри интрузивов и о благоприятности даек получили на предыдущих шагах высокие оценки, то апостериорной вероятности гипотезы о благоприятности интрузивной системы для рассматриваемого объекта присваивается значение 100%.

В общем виде по [II] правило вывода тех или иных умозаключений в "PROSPECTOR" имеет следующий общий вид: Если E, то (со степенью LS, LN)H , что можно интерпретировать следующим образом: "Наблюдаемый факт E подсказывает (с некоторой степенью уверенности) гипотезу H". Параметры LS и LN характеризуют "силу" вывода о гипотезе H, в частности, оценку вероятности гипотезы H в зависимости от факта E .

За период с 1978 по 1983 гг. в "PROSPECTOR" были включены следующие модели:

- дотретичные россыпи золота;
- месторождения массивных сульфидных руд кипрского типа;
- свинцово-цинковые месторождения в стратифицированных карбонатных породах;
- эпитермальные месторождения серебра;
- месторождения урана в карбонатизированных песчаниках;
- месторождения бурых железняков;
- медно-свинцово-цинковые месторождения в граувакковых толщах;
- молибденовые месторождения штокверкового типа;
- сульфидно-никелевые месторождения в коматиитах;
- месторождения урана в карбонатизированных алевролитах;
- эвапориты, связанные с озерными сланцами;

- эпигенетические плащеобразные рудные залежи в карбонатных породах;
- современные россыпи;
- медноколчеданные месторождения типа Куроко;
- свинцово-цинковые месторождения Миссисипского типа;
- медно-порфировые месторождения;
- медно-порфировые месторождения Йерингтонского типа в близконтинентальных окраинах;
- медно-порфировые месторождения типа Съерра-де-Паско в близконтинентальных окраинах;
- медно-порфировые месторождения островных дуг;
- модель размещения буровых скважин для разведки медно-порфировых месторождений;
- медно-свинцово-цинковые месторождения, связанные со сланцами, образовавшимися в морских условиях;
- обобщенная модель урановых месторождений в песчанниках в целом для региона Западных штатов США;
- цинковые месторождения в карбонатных породах Южных Аппалачей;
- вольфрамоносные скарны;
- месторождения молибденита в гранит-порфирах;
- месторождения молибденита в монцонит-порфирах;
- медно-свинцово-цинковые месторождения, связанные с мелководными морскими сланцами;
- сульфидные месторождения типа Сьюпериор;
- эпигенетические месторождения типа Тинтик в карбонатных породах;
- месторождения молибдена в трубообразных штокверках;
- разведуемые месторождения урана в песчаниках Западных штатов США.

За последние три года в SRI International в PROSPECTOR внесены следующие дополнения [II]: I) введена процедура "выбора консультационного меню"; 2) введена выдача заключений на запросы геолога в количественной форме; 3) усилена возможность помощи эксперту-геологу, если он не очень хорошо может разобраться в оценке "силы" того или иного заключения по своим вопросам. PROSPECTOR может выдавать оценку "силы заключения" в "CHE < che > CHNE <chne>, где CHE и CHNE - оценки уверенности в гипотезе, первая - если сообщаемый факт считается верным, вторая - если он может быть неверен.

Кроме того, добавлена консультационная экспертная система HYDRO для оценки водных региональных потенциальных ресурсов.

В [II] приведено описание еще одного дополнения системы PROSPECTOR так называемый muPROSPECTOR, созданный по образцу PROSPECTOR, но ориентированный на использование микроЭВМ. В muPROSPECTOR введены описания следующих моделей:

I. Латериты, обогащенные никелем и хромом, россыпи минералов платиновой группы.

2. Толейитовые массивы с медно-никелевым оруденением (месторождения типа Печенга, СССР и Пеура-Ахо, Финляндия).

3. Медно-никелевые месторождения в коматиитах зеленокаменных архейских поясов (типа месторождения Камболда, Австралия).

4. Медно-никелевые месторождения в протерозойских коматиитах (месторождения типа Скелетта, Швеция или Томпсон, Канада).

5. Рифтогенные глубинные интрузивы с медно-никелевым оруденением (месторождения типа Дулут, Миннесота).

6. Рифтогенные малоглубинные интрузивы и экструзивы с медно-никелевым оруденением и элементами платиновой группы (тип Норильских месторождений, СССР).

7. Массивы с титаномагнетитовым оруденением (месторождения типа Гусевогорского, Урал, СССР).

8. Комплексные сульфидные месторождения, обогащенные элементами платиновой группы (месторождения Уральского или Аляскинского типов).

9. Синорогенные интрузивы с медно-никелевым оруденением (месторождения типа Квикне, Норвегия).

I0. Интрузивы с сульфидным оруденением (месторождения типа Кипрских).

II. Месторождения с линзообразными залежами хромитов типа месторождений Кипра, Филиппин, Новой Каледонии и Турции.

I2. Месторождения с линзообразными залежами хромитов типа месторождений Боуаза, Марокко или месторождений Кипра.

I3. Месторождения магнетитовых руд, обогащенных ванадием и связанных с офиолитовыми поясами.

I4. Медно-никелевые месторождения типа Сёдбери.

I5. Медно-никелевые месторождения типа месторождений, находящихся в основании комплекса Стилватер (Бушвельд).

I6. Месторождения хромитовых руд, типа месторождений, находящихся в основании комплексов Стилватер и Бушвельд.

I7. Месторождения сульфидных руд, обогащенных элементами платиновой группы, типа месторождений комплексов Стилватер и Бушвельд.

Приведем образец части диалога геолога, консультирующегося с muPROSPECTOR:

.

.

.

3. Есть ли изверженные породы, которые можно рассматривать как синорогенные? (Да, нет) ....Нет

4. Есть ли изверженные породы с признаками их образования в рифтовых зонах? (Да, нет)................................?

Пояснение системы: На условия рифтов могут указывать следующие признаки: толейитовый вулканизм, наличие мантийных базальтов, характерная тектоника.

4. Есть ли изверженные породы с признаками их образования в рифтовых зонах? (Да, нет)...............................Да

5. Есть ли изверженные породы с признаками течения или близповерхностные интрузии?....................................А

(Символ А обозначает ответ: "Я не понимаю, повторите").

6. Есть ли данные или о внешних источниках серы или о тектонических условиях формирования пород? (Да, нет).......?

Следует пояснение системы о сути вопроса.

.

.

.

Заключение системы. Основываясь на ответах, возможности для нахождения в Вашей области месторождений, связанных с ультрамафическими комплексами, следующие: потенциально можно ожидать месторождения типа месторождений Норильской группы в СССР. Благоприятные факторы (в порядке убывания степени благоприятности): I) нет пород - индикаторов устойчивых петротектонических условий; 2) нет пород, образовавшихся в синорогенную фазу; 3) имеются породы - индикаторы рифтогенеза; 4) имеются породы с флюидальной текстурой и близповерхностные интрузивы.

Во Франции на основе математических моделей теории нечетких множеств и теории возможностей создана экспертная система ELFIN для оценки потенциальных ресурсов углеводородов [I2].

Значительное число параметров, используемых при оценке потенциальных ресурсов нефти и газа, весьма субъективны, неточны и неопределенны, для них, как правило, вводятся некоторые функции распределения их значений и для оценки используются затем методы моделирования по Монте-Карло. В качестве альтернативы вероятностному подходу в системе использованы методы теории нечетких множеств и теории возможностей.

При обработке неточных и неопределенных данных при таком подходе посылки и заключения в правилах вывода имеют следующий общий вид:

$$(A_1, X_1, \pi_{A_1(X\ )}) \wedge \ldots \wedge (A_n, X_n, \pi_{A_n(X_n)}) \to (C, Y, \pi_{C(Y)}),$$

где $A_1, \ldots, A_n$, C - некоторые свойства или характеристики (неточные или неопределенные) объектов оценки потенциальных ресурсов $X_1, \ldots, X_n, Y$, а $\pi_{A_1(X_1)}, \ldots, \pi_{A_n(X_n)}, \pi_{C(Y)}$ - некоторые экспертные распределения возможностей значений свойств или характеристик $A_1, \ldots, A_n, C$ для объектов $X_1, \ldots, X_n, Y$.

На недавно прошедшем Международном симпозиуме по количественным методам прогнозирования нефтяных и рудных месторождений (Алма-Ата, 23-29 сентября I985 г.) [I3] в ряде докладов были продемонстрированы подходы к прогнозу месторождений, близкие к технологии экспертных систем. Технология прогноза и оценки прогнозных ресурсов месторождений урана США, описанная Д.П.Харрисом, включает в себя: некоторую формальную систему, состоящую из геолога, геологической решающей модели; некоторые дополнительные отношения и вычислительные алгоритмы.

Наибольшие трудности связаны с конструированием геологической решающей модели. Она включает в себя сеть или множество влияющих на оценку геологических факторов, правила назначения весов для каждого фактора, оценки условных функций распределения для количества месторождений и вычислительные алгоритмы для оценки безусловных функций распределения количества месторождений.

Основа этой технологии - экспертные сети влияющих геологических факторов и весов факторов, на основе которых эксперт-геолог строит условные функции распределения вероятностей месторождений.

Далее экспертом выбираются некие эталонные области с хорошо изученными геологией и месторождениями урана. Для каждой контрольной, эталонной области эксперт-геолог уточняет первоначальную сеть влияющих факторов и по вычислительным алгоритмам оценивает функцию распределения вероятностей числа месторождений. Она сравнивается с функцией распределения, полученной по априори заданным весам факторов, и веса факторов в случае необходимости корректируются. После этого геологическая решающая модель готова для оценки необнаруженных урановых месторождений.

Д.П.Харрси сравнил результаты работы данной технологии с неформальной технологией оценки ресурсов урана, обычно используемой в исследовательских программах США "Оценка национальных ресурсов урана". Эта неформальная технология, или неформальный субъективный геологический анализ,заключается в выполнении следующих этапов:

I. Выделение экспертом-геологом благоприятных стратиграфических подразделений.

2. Разделение того или иного стратиграфического подразделения на подгруппы, гомогенные в отношении: а) источника урана, б) путей и механизма транспорта соединений урана, в) механизма отложения руд урана, г) условий сохранности минерализации урана.

3. Оценка экспертом-геологом для каждого гомогенного подразделения квантилей ресурсов урана (значение оценки ресурсов урана - субъективные вероятности, что в исследуемом регионе будут такие же или меньшие оценки ресурсов урана).

4. Оценка по квантилям среднего значения, подбор вида плотности распределения (как правило, логнормального), моделирование по заданным параметрам распределений оценок квантилей и сравнение их с назначенными квантилями, подгонка параметров кривой плотности распределения, дающих при моделировании оценки квантилей, ближайших к назначенным экспертом-геологом.

Сравнение результатов использования этих двух технологий показало, что по первой технологии оценки ресурсов урана почти вдвое больше, а функции плотности распределений ресурсов почти вдвое шире, чем по второй, так как при второй технологии эксперт-геолог всегда подстраховываясь дает и меньшие оценки ресурсов и меньшие квантили (например, 98-процентный квантиль второй технологии соответствует обычно 50-процентному квантилю первой технологии).

В докладе Чень-Циньлань (КНР) для целей прогноза рассмотрен способ генетического моделирования на ЭВМ, когда та или иная геологическая генетическая модель представляется в форме так называемого дерева успеха. При этом экспертом-геологом вначале выделяются основные и промежуточные металлогенические факторы. Например, для одной из генетических моделей образования урановых месторождений КНР в качестве основных факторов фигурируют содержание урана в гранитах, торий-урановое отношение, генетический тип гранита и т.п., а в качестве промежуточных - гипотетический источник урана, метасоматические изменения в гранитных массивах, тектоническая обстановка и т.п.

То или иное взаимодействие между основными и промежуточными факторами в той или иной генетической модели устанавливает наличие уранового месторождения. Эти взаимодействия в модели отображаются в виде цепочек основных и промежуточных факторов, связанных между собой отношениями "и", "или", "нет" и т.п. Так, например, в одной из моделей фактор "в пределах гранитного массива много проявлений тантало-ниобиевой минерализации" связан отношением "нет" с фактором "в пределах массива может быть урановое месторождение".

Задав генетическую модель в виде дерева основных и промежуточных факторов, связанных между собой определенными отношениями типа "и", "или", "нет" и более сложными, и задав субъективные вероятности возможности осуществления того или иного фактора, можно оценить вероятность наличия уранового месторождения (так называемого окончательного события) для данной модели в зависимости от наблюденных в поле факторов.

Для оценки вероятностей окончательных событий по исходным оценкам вероятностей основных и промежуточных событий используются: метод дискретных переключательных функций и метод аппроксимации оценки вероятности окончательного события в условиях гипотезы статистической независимости исходных событий.

Так, например, для первого метода пусть имеются три события X_1, X_2 и X_3 и следующие возможные связи между ними могут привести к реализации окончательного события:

$$F = (x_1 \wedge x_2 \wedge x_3) \vee (x_1 \wedge x_2 \wedge \bar{x}_3) \vee (x_1 \wedge \bar{x}_2 \wedge x_3) \vee$$

$$\vee (\bar{x}_1 \wedge x_2 \wedge x_3) \vee (\bar{x}_1 \wedge \bar{x}_2 \wedge x_3) \vee (\bar{x}_1 \wedge x_2 \wedge \bar{x}_3) \vee$$

$$\vee (x_1 \wedge \bar{x}_2 \wedge \bar{x}_3) \vee (\bar{x}_1 \wedge \bar{x}_2 \wedge \bar{x}_3) .$$

Тогда вероятность окончательного события определяется первым методом следующим образом:

$$p = p_1p_2p_3 + p_1p_2(1 - p_3) + p_1p_3(1 - p_2) + p_2p_3(1 - p_1) +$$

$$+ p_1p_2 + p_2p_3 + p_1p_3 - 2p_1p_2p_3 .$$

По второму методу, если к окончательному событию могут привести связи событий $x_1,\dots,x_n$ вида $X_1 \wedge X_2 \wedge \dots \wedge X_n$, то его вероятность определяется выражением вида

$$p = \prod_{i=1}^{n} P(X_i).$$

Весьма отчетливое выражение указанная ранее тенденция нашла в докладе Б.А.Чумаченко, Э.А.Немировского и В.В.Марченко, посвященного основным концепциям автоматизированной системы Регион-Скандинг, которые являются развитием хорошо известной автоматизированной системы Регион в следующих направлениях:

- ориентация математических методов и средств использования вычислительной техники на конечного пользователя-геолога, не имеющего специальной подготовки в области использования математических методов и ЭВМ;
- реализация полностью интерактивного характера работы при накоплении, ведении, обработке данных и анализе результатов;
- включение в систему наряду со средствами текстового диалога средств организации графического диалога;
- обеспечение возможности накопления и использования экспертных геологических моделей в процессе формирования экспертных заключений.

Схема диалога - граф, вершинами которого являются состояния диалога, а помеченные дуги графа задают направления переходов и выбор связанных с этими переходами вычислительных процедур. В каждом состоянии пользователь получает порцию текстовой информации, относящейся к данному состоянию, и одновременно система предлагает пользователю вопрос, связанный либо с необходимостью ввода некоторых числовых данных, либо с выбором одной из нескольких альтернатив.

Предложенная структура и программно-математическое обеспечение системы дают возможность на более высоком уровне реализовать весь процесс геологического прогноза - от накопления первичных данных до формирования прогнозных заключений с включением непосредственно геолога в процесс обработки данных, что приводит к более полному использованию творческого потенциала геолога.

В основе технологии количественной оценки ресурсов полезных ископаемых, доложенной на симпозиуме А.Н.Бугайцом и О.Е.Лобовой, также заложен принцип широкого использования и формализации знаний и опыта эксперта-геолога. Эта технология включает в себя следующие наборы: некоторых утверждений (аксиом); математических моделей; правил интерпретации результатов.

Предложено двенадцать аксиом. Среди них центральное место занимает аксиома, суть которой можно пояснить следующим неформальным образом. В основе ее лежит соображение - пусть имеются два объекта: k и l. Тогда разница ресурсов этих объектов тем больше, чем больше разница их геологического строения и, наоборот, разница ресурсов тем меньше, чем меньше разница их геологического строения.

На основе этих соображений вводятся три понятия:

- мера общей согласованности объектов k и l - μ;

- мера истинности утверждения "разница геологического строения объектов k и l велика - μ_1;

- мера истинности утверждения "разница ресурсов k и l велика - μ_2 ".

Аксиома в неформальном виде гласит:

"Мера общей согласованности объектов k и l велика, если одновременно велики меры истинности утверждений μ_1 и μ_2".

"Мера общей согласованности объектов k и l велика, если одновременно малы меры истинности утверждений μ_1 и μ_2".

"Мера общей согласованности объектов k и l мала, если оценки мер истинности утверждений μ_1 и μ_2 противоречивы".

Система математических моделей технологии включает в себя:

I) группу моделей, основанных на теории нечетких множеств и теории возможностей;

2) группу моделей, связанных с оптимизацией отображений описаний объектов из многомерных пространств в одно и двумерное пространства;

3) модели генерации методом Монте-Карло случайных величин с заданными функциями распределения;

4) модели теории идентификационных уравнений;

5) модели оценки метризованных и неметризованных групповых упорядочений.

Заметим, что авторы ни в коей мере не призывают к отказу от традиционных формальных схем прогнозирования. В совершенствовании методики поисков и разведки месторождений полезных ископаемых методы искусственного интеллекта сыграют свою положительную роль наряду с широко применяемыми математическими методами. Наиболее полно программа совершенствования основ геологоразведки на базе современной вычислительной техники и математики изложена в работах Ю.А.Воронина. В [9, с.109] предусматриваются два возможных направления исследований. В тактическом направлении предполагается совершенствование методики использования профессиональных экспертов путем создания для них "подходящих систем понятий и инструкций, а также построение моделей для их тренинга". В стратегическом же направлении предлагается "прежде всего, тщательно поставить задачу оценки месторождений полезных ископаемых". Технология экспертных систем дает возможность совершенствовать методику прогнозирования тактически и подготавливать базу для ее стратегического совершенствования.

Таким образом, по степени участия геолога в процессе решения прогнозных задач, все существующие прогнозные системы могут бытьо отнесены к одной из следующих технологий.

1. Формализованная технология. Суть этого подхода состоит в том, что на основе использующихся математических методов пытаются максимально формализовать исходные понятия и построить строго формальные модели в расчете на получение, в оговоренных условиях, некоторого "оптимального решения". При этом делается попытка установить непосредственную связь между рудоносностью территории и комплексом имеющихся геолого-геофизических данных, не рассматривая содержательные аспекты этой связи. Примеры систем, в которых делается попытка такого типа прогноза, приведены в [5].

2. Человеко-машинная технология. При этом подходе широко используются методы математической статистики, теории распознавания образов и др., но геологу представляется возможность участвовать в процессе прогнозирования на всех его стадиях. Основываясь на известной ему содержательной информации о районе исследований, геолог формулирует такие статистические гипотезы, проверка которых автоматизированной системой дает возможность делать заключения о достоверности содержательных прогнозных предположений. В качестве примера такого подхода можно привести работу [4]. В автоматизированной системе прогнозирования, описанной в [5], человеко-машинный подход ис-

пользуется для обработки геолого-картографической информации, полученной специалистом-геологом.

3. Технология экспертных систем. В этом случае основой прогнозирующей системы являются содержательные модели формирования месторождений полезных ископаемых в том виде, как они представляются геологом. База знаний экспертной системы должна содержать также геологическую информацию, характеризующую район исследования. Прогнозной системой используется механизм вывода логических заключений из имеющихся знаний, позволяющий имитировать процесс принятия прогнозных решений специалистом-геологом. При этом последний взаимодействует непосредственно с машиной, расширяя базу знаний в режиме "эксперта" или решая прогнозные задачи в режиме "пользователя". Примеры такого подхода позволяют говорить о возможности представления геологических знаний в прогнозной системе [11, 12].

В настоящее время в отделе математических методов КазИМСа ведутся работы, направленные на создание автоматизированной системы прогноза и оценки прогнозных ресурсов, объединяющей преимущества технологии экспертных систем и человеко-машинного подхода. Разрабатываемая система должна включать все компоненты экспертной системы: базу знаний, подсистему логического вывода, подсистему объяснений, диалоговый процессор. База знаний должна включать набор содержательных моделей, позволяющих осуществлять как традиционный процесс прогнозирования, так и прогнозирование, основанное на математических моделях. Среди существующих металлогенических моделей формирования месторождений рудных полезных ископаемых, наиболее перспективным следует считать, по-видимому, комплекс моделей, сформированных в рамках методологии "прогноз-поиск-оценка", разработанный в последние годы А.И.Кривцовым и др. [14, 15]. Для использования существующих методов математического прогнозирования необходимо включение в систему моделей, позволяющих формировать на основе имеющейся прогнозной задачи ее математическую формулировку, обеспечивающую эффективное решение последней. При этом могут использоваться, например, методы "прикладной статистики" [16]. В геологическом прогнозировании примером подобной гуманитаризации методов математической статистики можно отметить работу [17]. Сформулированная математическая задача может затем решаться одним из существующих математических методов [2, 3]. Полученный результат снова переводится в содержательные понятия.

Объединяя таким образом традиционный подход к геологическому прогнозированию и подходы, основанные на применении математических методов, система прогноза и оценки прогнозных ресурсов должна позволять пользователю решать самый широкий круг интересующих его проблем.

Литература

I. Прогнозирование рудоносных площадей /Под ред. В.В.Иванова, Г.М.Мейтува. - М.: Недра, 1976.

2. Бугаец А.Н., Дуденко Л.Н. Математические методы при прогнозировании месторождений полезных ископаемых. - М.: Недра, 1976.

3. Бугаец А.Н. Автоматизированные системы геологического прогнозирования /Обзор ВИЭМС. - М., 1979. - 60 с. - В надзаг.: Постоянная комиссия СЭВ по геологии.

4. Добрынин В.Н., Черемисина Е.Н. Диалоговые системы геологического прогнозирования. - Тез.докл.Международного симпоз. "Основные направления разработки количественных методов прогнозирования нефтяных и рудных месторождений". - Алма-Ата, 1985, с.48-50.

5. Чумаченко Б.А., Власов Е.П., Марченко В.В. Системный анализ при геологической оценке перспектив рудоносности территорий. - М.: Недра, 1980.

6. Нильсон Н. Принципы искусственного интеллекта. - М.: Радио и связь, 1985.

7. Basden A. On the application of expert systems. - Int. J. of Man-Machine Studies, 1983, vol. 19, N 5, p. 461-477.

8. Feigenbaum E.A. Expert systems: Looking back and looking Ahead. - Informatik-Fachberichte, 1980, vol. 33, p. 1-14.

9. Воронин Ю.А. Исследование операций при поисках и разведке месторождений полезных ископаемых. - Новосибирск: Наука, 1983.

I0. Кузин Е.С. Интеллектуальный интерфейс. Общие принципы организации и проблемы реализации. - Техническая кибернетика, I985, № 5, с.90-I02.

II. McCammon R. Recent developments in PROSPECTOR and future expert systems in regional resource evaluation. - IEEE Comp. Soc. Reprint, 1984, p. 243-248.

I2. Martin-Clonaire R. Le moteur d'inference ELFIN: conception et premieres realisations. - Intern. Rep. LSI, ENSEEIT, Toulose, 1984.

I3. Основные направления разработки количественных методов прогнозирования нефтяных и рудных месторождений: (Тез. докл. международного симпоз.). - Алма-Ата, I985, I44 с.

I4. Кривцов А.И. Геологические основы прогнозирования и поисков медно-порфировых месторождений. - М.: Недра, I983.

I5. Прогнозно-поисковые комплексы. Вып.II /Методические рекомендации по комплексированию работ по прогнозу и поискам медно-порфировых месторождений. - М.: Недра, I983.

I6. Айвазян С.А., Енюков И.С., Мешалкин Л.Д. Прикладная статистика. - М.: Статистика, I983.

I7. Chang-Jo F. Chang. SIMSAG: Integrated computer system for use in evaluation of Mineral and energy Resources.- Math. Geology, 1983, vol. 15, p. 47-58.

В.В.Веселов, В.М.Мирлас, В.П.Степаненко

ЗАДАЧИ ОПТИМАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ ГЕОФИЛЬТРАЦИОННЫМИ СИСТЕМАМИ

Современный уровень развития гидрогеологической науки и производства геолого-разведочных работ должен удовлетворять постоянно растущую потребность народного хозяйства в достоверных научных прогнозах изменения природной гидрогеологической обстановки. Если до сих пор основные задачи в гидрогеологии сводились к оценке ресурсов подземных вод, выяснению условий их формирования, то в настоящее время на первый план выдвигаются задачи управления режимом эксплуатации подземных вод, целенаправленным и обоснованным вмешательством человека в природные процессы, обеспечивающие рациональное использование водных ресурсов, их охрану от истощения, загрязнения, а, при необходимости, и восстановление требуемых свойств подземных вод и их количества. В этих случаях возникает обширный класс практических гидрогеологических задач, таких как оценка потенциальных и перспективных эксплуатационных ресурсов [I], осушение месторождений твердых полезных ископаемых, поддержание оптимального уровня подземных вод на орошаемых (осушаемых) массивах и застраиваемых территориях, поддержание оптимального водоизвлечения.

Вопросы оптимального управления месторождениями подземных вод обсуждались в работах [2 - 5]. Традиционный подход состоит в постановке и решении задач, сводящихся к задачам линейного программирования, в которых целевой функцией (критерием качества) является линейная функция от искомых дебитов.

В работе [6] был предложен подход к проблемам управления процессом движения подземных вод с позиции теории детерминированных распределенных систем автоматического управления [7], или систем с распределенными параметрами. Система с распределенными параметрами (СРП) описывается уравнениями в частных производных. Состояние системы характеризуется некоторой функцией $Q(x, t)$, где x - пространственный аргумент n-мерного евклидова пространства R^n, t - время. Состояние в момент $t = 0$, $Q(x, 0) = Q_0(x)$ называется начальным состоянием СРП, $Q(x, \tau)$ (τ - заданное значение времени) - конечным сотоянием. Требуется перевести СРП из некоторого заданного начального состояния $Q_0(x)$ в требуемое конечное состояние $Q(x, \tau) = Q^*(x)$, причем время перевода $t = \tau$ может быть фиксированным или свободным.

Для перевода СРП из одного состояния в другое необходимо иметь способ активного воздействия на движение системы $W(x, t)$, который называется управляющим воздействием, или управлением, и математически входит в соотношение, описывающее СРП. Дополнительно имеют место различные ограничения на состояние $Q(x, t)$ и управление $W(x, t)$. Состояния и управления, совместимые с указанными ограничениями, называются допустимыми. Задача управления СРП состоит в отыскании допустимого управления $W(x, t)$, под действием которого совершится переход $Q_0(x)$ в $Q^*(x)$. Если существует более одного управления из класса допустимых, каждое из которых обеспечивает переход СРП, то можно потребовать, чтобы из всех таких управлений было выбрано одно - наилучшее. Для этой цели формулируется критерий качества управления - функционал управления. Задача в такой постановке является задачей оптимального управления СРП.

Перевод гидрогеологических систем из одного состояния в другое в большинстве случаев осуществляется с помощью водозаборных скважин или других типов искусственных сооружений (дренажей). С их помощью производится извлечение воды из водоносных горизонтов. Поэтому наиболее актуальными на сегодняшний день являются задачи управления геофильтрационными системами, в которых отыскиваются оптимальные дебиты водозаборных (дренажных) сооружений.

В рамках данного подхода представляется целесообразным рассмотреть задачи оптимального управления с критерием оптимальности, характеризующим отклонение получаемого распределения напора (уровня) подземных вод от того, которое должно быть достигнуто на гидрогеологическом объекте.

Дадим математическую постановку задачи оптимального выбора дебитов дренажных сооружений. На дебиты могут быть наложены ограничения, которые обусловлены, например, возможностями имеющегося в наличии насосного оборудования или другими соображениями практического характера.

Пусть геофильтрационная система имеет планово-пространственную структуру фильтрационного потока и описывается уравнениями

$$\mu_i \frac{\partial H_i}{\partial t} = L_i H_i + \frac{k_{i-1,i}}{m_{i-1,i}}(H_{i-1} - H_i) + \frac{k_{i,i+1}}{m_{i,i+1}}(H_{i+1} - H_i) + W_i, \tag{1}$$

где $L_i \equiv \frac{\partial}{\partial x}(T_i \frac{\partial}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(T_i \frac{\partial}{\partial y})$; H_i – уровень (напор) подземных вод; T_i – коэффициент водопроводимости i-го водоносного слоя; $k_{i+1,i}$ – коэффициент фильтрации слоя, разделяющего i-й и $i+1$-й водоносные слои; $m_{i+1,i}$ – мощность этого разделяющего слоя; μ_i – коэффициент водоотдачи.

Свободные члены уравнений системы, описывающие управляющие воздействия, представим в виде

$$W_i(x, y, t) = \gamma_i \sum_{k=1}^{p_i} U_{ik}(t)\delta(x - x_{ik})\delta(y - y_{ik}), \tag{2}$$

где γ_i – коэффициент пропорциональности; $U_{ik}(t)$ – функция, пропорциональная дебиту k-й скважины, расположенной в i-м водоносном горизонте; $(x_{ik}, y_{ik}) \in D_i$ – координаты расположения k-й скважины i-го водоносного слоя;

$\delta(x - x_{ik})$ – дельта-функция с полюсом в точке x_{ik};

$D = \bigcup\limits_{i=1}^{n} D_i$ – область геофильтрации.

Предполагается, что координаты скважин заранее заданы, а величинами, подлежащими определению, являются функции $U_{ik}(t)$, $k = 1,\ldots, p_{ij}, i = 1,\ldots, n$. Фильтрационный процесс на такой модели определяется также граничными условиями, воспроизводящими природные и искусственные возмущения фильтрационного поля:

$$\left(\alpha_i H_i + \beta_i \frac{\partial H_i}{\partial n_i}\right)\Big|_{\Gamma_i} = f_i(x, y), \ i = 1,\ldots, n, \qquad (3)$$

где Γ_i – граница области D_i; $\partial/\partial n_i$ – производная по нормали к Γ_i.

Математическая постановка задачи оптимального управления состоит в следующем. Требуется найти такие функции $U_{ik}(t)$, $k = 1,\ldots, p_i$, $i = 1,\ldots, n$, $t \in [0,\tau]$, чтобы геофильтрационная система, описываемая соотношениями (I)-(3), за фиксированное время τ перешла из заданного начального состояния $H_i(x, y, 0) = H_i^0(x, y)$, $i = 1,\ldots, n$, в некоторое конечное $H_i(x, y,\tau)$, при котором достигает минимума заданный функционал, характеризующий отклонение полученного от заданного требуемого состояния $H_i^*(x, y)$, $i = 1,\ldots, n$. Этот функционал играет роль критерия качества управления, и его конкретный вид зависит от цели решения задачи.

Рассмотрим два вида критерия качества управления:

$$I_0(W) = \sum_{i=1}^{n} \iint\limits_{D_i} [H_i(x, y, \tau) - H_i^*(x, y)]^2 dx\, dy, \qquad (4)$$

$$I_1(W) = \sum_{i=1}^{n} \sum_{m=1}^{M_i} [H_i(x_{im}, y_{im}, \tau) - H_i^*(x_{im}, y_{im})]^2. \qquad (5)$$

Здесь $W = \{W_i(t)\}_{i=1}^{n}$.

Критерий I_0 характеризует отклонение от требуемого состояния по всей области геофильтрации D, критерий I_1 –

только на заданном множестве точек $\{(x_{im}, y_{im})\}_{m=1}^{M_i}$, $i = 1,\dots,n$, называемом в дальнейшем множеством точек определения критерия I_1.

Рис. I иллюстрирует выражения (4) и (5) для одномерной (профильной) геофильтрации с граничными условиями первого рода и двумя скважинами, расположенными в точках A и B. Величина критерия I_0 равна площади заштрихованной области, I_1 - сумме длин отрезков AC и BD.

Авторами разработаны два взаимодополняющих метода решения рассматривемой задачи на ЭВМ: последовательных приближений [8] и функций влияния.

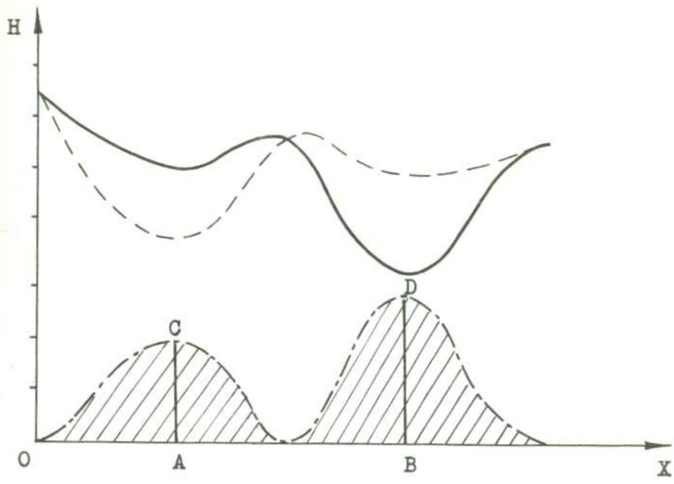


Рис. I. Графическое представление критериев качества решения задачи оптимального управления: - требуемое распределение уровня H^*; - полученное на модели распределение уровня $H(\tau)$; - квадратичное отклонение от требуемого уровня $[H(\tau) - H^*]^2$; - площадь, соответствующая величине критерия I_0

М е т о д   п о с л е д о в а т е л ь н ы х   п р и б л и ж е н и й реализует итерационный алгоритм минимизации критерия качества, основанный на построении (на каждом шаге итерационного процесса) допустимой вариации управляющего воздействия, которая строится с использованием решения сопряженной задачи.

Предполагается, что на функции $U_{ik}(t)$ наложены ограничения $0 \le U_{ik}(t) \le C_{ik}$, где C_{ik} характеризует максимальный дебит k-й скважины i-го водоносного горизонта. Управляющее воздействие, удовлетворяющее этим ограничениям, считаем допустимым. Метод базируется на выборе такой вариации управления $\delta U_{ik}(t)$, чтобы выполнялись условия

$$
\begin{gathered}
I(W + \delta W) \le I(W), \\
0 \le U_{ik}(t) + \delta U_{ik}(t) \le C_{ik}, \ k = 1,\dots, p_i, \ i=1,\dots,n.
\end{gathered} \tag{6}
$$

Здесь $\delta W = \{\delta W_i\}_{i=1}^{n}$, $\delta W_i(t) = \gamma_i \sum_{k=1}^{p_i} \delta U_{ik}(t) \times \delta(x - x_{ik}) \times \delta(y - y_{ik})$; $I(W)$ – критерий вида (4) или (5). Для численной реализации метода на ЭВМ переходят к дискретным значениям времени и пространственных координат. В области геофильтрации D строится прямоугольная сетка, а отрезок $[0, \tau]$ делится на N интервалов точками $0 = t_0 < t_1 < \dots < t_{N-1} < t_N = \tau$. Управление считается кусочно-постоянным $U_{ik}(t) \equiv U_{ik}^{j}$ при $t \in (t_{j-1}, t_j)$.

Тогда для вариации функционала $I(W)$ имеем

$$
\delta I = \sum_{j=1}^{N} \sum_{i=1}^{n} \sum_{k=1}^{p_i} \Psi_{ik}^{j} \, \delta U_{ik}^{j}, \tag{7}
$$

где

$$
\Psi_{ik}^{j} = \gamma_i \int_{t_{j-1}}^{t_j} \Psi_i(x_{ik}, y_{ik}, t)\,dt, \tag{8}
$$

$\Psi_i(x,y,t)$ – решение сопряженной системы

$$\mu_i \frac{\partial \Psi_i}{\partial t} + L_i \Psi_i + \frac{k_{i-1,i}}{m_{i-1,i}}(\Psi_{i-1} - \Psi_i) + \frac{k_{i,i+1}}{m_{i,i+1}}(\Psi_{i+1} - \Psi_i) = 0, \tag{9}$$

$$\left.\left(\alpha_i \Psi_i + \beta_i \frac{\partial \Psi_i}{\partial n_i}\right)\right|_{\Gamma_i} = 0, \tag{10}$$

$$\Psi_i(x, y, \tau) = \theta_i(x, y), \; i = 1, \dots, n, \tag{11}$$

$$\theta_i(x, y) = \begin{cases} 2 \dfrac{H_i(x, y, \tau) - H_i^*(x, y)}{\mu_i(x, y)} & \text{для критерия I;} \\ 2 \sum\limits_{m=1}^{M_i} \dfrac{H_i(x,y,\tau) - H_i^*(x,y)}{\mu_i(x, y)} \delta(x - x_{im}) \delta(y - y_{im}) & \\ & \text{для критерия I;} \end{cases} \tag{12}$$

$H_i(x, y, \tau)$ – решение задачи (I)-(3).

Таким образом, исходная задача после дискретизации сводится к задаче отыскания минимума функции $N \times \sum\limits_{i=1}^{n} p_i$ переменных $I(U_{11}^1, U_{12}^1, \dots, U_{np_n}^N)$, причем для вычисления градиента этой функции можно использовать соотношение (7).

На основании изложенного строится следующий алгоритм метода последовательных приближений:

I. Задается некоторое допустимое управление

$$U^o = \{U_{ik}^{jo}\}_{k=1}^{p_i} \; {}_{i=1}^{n} \; {}_{j=1}^{N}.$$

2. Численными методами решается система (I)-(3) с заданным управлением и определяются $\Psi_i(x, y, \tau)$ по формулам (II), (I2).

3. Производится расчет значения критерия качества и проверяется условие останова $I \le \varepsilon$. При выполнении условия останова процесс завершается.

4. Численными методами решается сопряженная система (9)-(I2) и определяются величины ψ^j_{ik} по формуле (8).

5. Строится вариация управления методом градиентного спуска

$$\delta U^j_{ik} = - \varkappa \frac{\psi^j_{ik}}{\left[\sum\limits_{j=1}^{N} \sum\limits_{i=1}^{n} \sum\limits_{k=1}^{p_i} (\psi^j_{ik})^2\right]^{1/2}}. \qquad (13)$$

6. Формируется новое управление по формуле

$$U^{jp+1}_{ik} = \begin{cases} U^{jp}_{ik} + \delta U^{jp}_{ik}, & \text{если } 0 < U^{jp}_{ik} + \delta U^{jp}_{ik} < C_{ik}; \\ C_{ik}, & \text{если } U^{jp}_{ik} + \delta U^{jp}_{ik} \geq C_{ik}; \\ 0, & \text{если } U^{jp}_{ik} + \delta U^{jp}_{ik} \leq 0, \end{cases}$$

и производится переход к выполнению п.2.

Таким образом, на каждом шаге итерационного процесса необходимо решить прямую задачу геофильтрации (I)-(3) и сопряженную задачу (9)-(I2).

Скорость сходимости метода существенно зависит от величины коэффициента $\varkappa$ в соотношении (I3). Если этот коэффициент выбран слишком малым, процесс будет сходиться медленно, при слишком большом $\varkappa$ перестает быть справедливой формула (7).

Алгоритм реализован в программе на языке Фортран ОС ЕС. Программа позволяет производить расчеты на моделях, содержащих до пяти слоев (трех водоносных и двух разделяющих).

М е т о д   м а т р и ц ы   в л и я н и я может быть использован в случае, когда дебиты скважин не зависят от времени $U_{ik}(t) \equiv \mathrm{const}$, причем на эти константы не накладывается никаких ограничений.

Основная идея метода матрицы влияния заключается в сведении исходной задачи оптимизации к системе линейных уравнений на основе использования совокупности решений прямых задач геофильтрации специального вида. Эти решения могут быть получены, например, хорошо разработанными численными методами.

Общее решение прямой задачи (I)-(3) с некоторыми фиксированными дебитами U_{ik} можно, согласно методу суперпозиции [9], представить в виде

$$H_j(x, y, \tau) = \sum_{i=1}^{n} \sum_{k=1}^{p_i} U_{ik} h_j^{ik}(x, y, \tau) + h_j^o(x, y, \tau), \qquad (14)$$

$$j = 1, \ldots, n.$$

Здесь $h_j^{ik}(x, y, \tau)$ – распределение уровня, полученное на момент времени τ в j-м слое модели при воздействии источника единичной мощности в точке расположения k-й скважины i-го водоносного слоя при нулевых начальных и граничных условиях, т.е. h_j^{ik} удовлетворяет системе уравнений

$$\mu_i \frac{\partial h_j^{ik}}{\partial t} = L_j h_j^{ik} + \frac{k_{j-1,j}}{m_{j-1,j}} (h_{j-1}^{ik} - h_j^{ik}) + \frac{k_{j,j+1}}{m_{j,j+1}} (h_{j+1}^{ik} - h_j^{ik}) +$$

$$+ \gamma_i \delta(x - x_{ik}) \delta(y - y_{ik}) \delta_{ij},$$

$$\left(\alpha_j h_j^{ik} + \beta_j \frac{\partial H_j^{ik}}{\partial n_j}\right)\Big|_{\Gamma_j} = 0, \quad h_j^{ik}(x, y, 0) = 0, \qquad (15)$$

$$i = 1, \ldots, n, \quad k = 1, \ldots, p_i, \quad j = 1, \ldots, n,$$

где δ_{ij} – символ Кронекера.

Распределение уровней, полученное воздействием начальных и граничных условий $h_j^o(x, y, \tau)$ на момент времени τ, удовлетворяет системе уравнений

$$\mu_j \frac{\partial H_j^o}{\partial t} = L_j h_j^o + \frac{k_{j-1,j}}{m_{j-1,j}} (h_{j-1}^o - h_j^o) + \frac{k_{j,j+1}}{m_{j,j+1}} (h_{j+1}^o - h_j^o),$$

$$\left.(\alpha_j h_j^o + \beta_j \frac{\partial H_j^o}{\partial n_j})\right|_{\Gamma_j} = f, \quad h_j^o(x, y, 0) = H_j^o(x, y). \qquad (16)$$

Начнем рассмотрение метода с критерия качества вида (4). Подставив в него выражение для общего вида решения прямой задачи (I4), получим

$$I_o(W) = \sum_{j=1}^{n} \iint_{D_j} [\sum_{i=1}^{n} \sum_{k=1}^{p_i} U_{ik} h_j^{ik}(x,y,\tau) + h_j^o(x,y,\tau) - H_j^*(x,y)]^2 dxdy. \qquad (17)$$

Нетрудно заметить, что в данном случае $I_o(W)$ является функцией $R = \sum_{j=1}^{n} p_j$ переменных U_{ik}.

Необходимым условием экстремума функции многих переменных являются

$$\frac{\partial I_o}{\partial U_{ql}} = 0, \quad q = 1,\dots, n, \quad l = 1,\dots, p_q. \qquad (18)$$

Из (I8), учитывая (I7), получим

$$\frac{\partial I_o}{\partial U_{ql}} = \sum_{j=1}^{n} 2 \iint_{D_j} [\sum_{i=1}^{n} \sum_{k=1}^{p_i} U_{ik} h_j^{ik} + h_j^o - H_j^*] h_j^{ql} \, dxdy = 0,$$

откуда

$$\sum_{i=1}^{n} \sum_{k=1}^{p_i} U_{ik} \sum_{j=1}^{n} \iint_{D_j} h_j^{ik} h_j^{ql} dxdy = \sum_{j=1}^{n} \iint_{D_j} (H_j^* - h_j^o) h_j^{ql} \, dxdy. \qquad (19)$$

Введем новые индексы по формулам

$$\xi = \sum_{i=1}^{r-1} p_{i+k}, \; k = 1,\dots, p_r, \; r = 1,\dots, n,$$

$$\eta = \sum_{l=1}^{q-1} p_{l+k}, \; k = 1,\dots, p_q, \; q = 1,\dots, n.$$

Обозначим

$$A = (a_{\eta\xi}),\ a_{\eta\xi} = \sum_{j=1}^{n} \iint_{D_j} h_j^{ik}\, h_j^{ql}\, dx\, dy,$$

$$C_\eta = \sum_{j=1}^{n} \iint_{D_j} (H_j^* - h_j^o) h_j^{ql}\, dxdy;\ U = (U_1, \ldots, U_R),\ U_\xi = U_{ik}.$$

Тогда соотношение (I9) примет вид

$$\sum_{\xi=1}^{R} a_{\eta\xi}\, U_\xi = C_\eta,\quad \eta = 1, \ldots, R, \tag{20}$$

или в матричном виде

$$AU = C. \tag{21}$$

Таким образом, необходимым условием оптимальности является система линейных алгебраических уравнений (2I) для постоянных по времени дебитов U_ξ.

Перейдем к рассмотрению критерия качества вида (5), ограничиваясь случаем, когда точки определения критерия качества и расположения скважин совпадают. Подставив выражение для общего вида решения прямой задачи (I4) в (5) и обозначив

$$h_{jm}^{ik} = h_j^{ik}(x_{jm}, y_{jm}, \tau),\ z_{jm} = H_j^*(x_{jm}, y_{jm}) - h_j^o(x_{jm}, y_{jm}, \tau),$$

получим

$$I_1(W) = \sum_{j=1}^{n} \sum_{m=1}^{p_j} \Big[\sum_{i=1}^{n} \sum_{k=1}^{p_i} U_{ik} h_{jm}^{ik} - z_{jm}\Big]^2. \tag{22}$$

Необходимое условие экстремума принимает вид

$$\frac{\partial I_1}{\partial U_{ql}} = 2 \sum_{j=1}^{n} \sum_{m=1}^{p_i} \Big[\sum_{i=1}^{n} \sum_{k=1}^{p_i} U_{ik} h_{jm}^{ik} - z_{jm}\Big] h_{jm}^{ql} = 0,$$

$$q = 1, \ldots, n,\quad l = 1, \ldots, p_q,$$

откуда получаем R соотношений

$$\sum_{i=1}^{n}\sum_{k=1}^{p_i} U_{ik}\Big(\sum_{j=1}^{n}\sum_{m=1}^{p_q} h_{jm}^{ik}\, h_{jm}^{ql}\Big) = \sum_{j=1}^{n}\sum_{m=1}^{p_q} z_{jm}\, h_{jm}^{ql},$$

$$q = 1,\ldots,n,\; l = 1,\ldots,p_q. \tag{23}$$

Вводя новые индексы аналогично вышеописанному и обозначая

$$D = (d_{\eta\xi}),\; d_{\eta\xi} = \sum_{j=1}^{n}\sum_{m=1}^{p_j} h_{jm}^{ik}\, h_{jm}^{ql},\; q_\eta = \sum_{j=1}^{n}\sum_{m=1}^{p_q} z_{jm}\, h_{jm}^{ql},$$

получим

$$\sum_{\xi=1}^{R} d_{\eta\xi}\, U_\xi = q_\eta\,,\quad \eta = 1,\ \ldots,\ R, \tag{24}$$

или в матричном виде

$$DU = G. \tag{25}$$

В случае критерия I_1 также получена система линейных алгебраических уравнений (25) для искомых дебитов U_ξ.

Программная реализация изложенных методов входит в состав банка процедур автоматизированной системы управления моделированием гидрогеологических процессов [10].

Практическая реализация решения задачи оптимального управления геофильтрационными системами методом последовательных приближений осуществлена при моделировании гидрогеологических условий Качарского месторождения комплексных магнетитовых руд в Кустанайской области. Основная цель моделирования - гидродинамический прогноз водопритоков в горные выработки при отработке месторождения. Формально задача прогноза водопритоков сводилась к нахождению таких значений дебитов условных дренажных сооружений, расположенных на площади разрабатываемого карьера, которые обеспечивали бы снижение напоров подземных вод до отметки дна карьера в соответствии с графиком его отработки. В такой постановке она рассматривалась как задача оптимального управления геофильтрационной системой.

Месторождение расположено в западной части Северо-Тургайской (Кустанайской) равнины в междуречье рек Тобол и Уй. Геолого-гидрогеологическое строение района характеризуется двумя структурными этажами. Первый (нижний) сложен палеозойскими метаморфизованными и докембрийскими осадочными, эффузивными и интрузивными породами, которые собраны в складки и осложнены разрывными нарушениями. Месторождение магнетитовых руд приурочено к нижнему структурному этажу. Второй (верхний) этаж представляет собой глинисто-песчаную толщу мезокайнозойского возраста, залегающую почти горизонтально на палеозойском фундаменте. К верхнему структурному этажу приурочены отложения четвертичного, олигоценового, эоценового и мелового возрастов (рис. 2).

В гидрогеологическом строении района выделяются четыре основных водоносных горизонта (комплекса), отделенных друг от друга водоупорами. Верхний водоносный комплекс, представленный четвертичным и олигоцен-четвертичными водоносными горизонтами, практически повсеместно отделяется от нижележащих региональной выдержанной толщей слабопроницаемых глин чеганской свиты палеогена. Воды горизонта в формировании водопритоков в карьер практически не участвуют.

Основной водоприток образуется за счет нижележащих эоценового и меловых водоносных горизонтов, разделенных слоем глин мелового возраста. Воды этих горизонтов напорные, с минерализацией от 3-5 до 10 г/л. Самый нижний водоносный комплекс приурочен к зоне открытой трещиноватости палеозойских пород. Мощность зоны максимальной водообильности составляет 100 м; воды соленые. От вышележащих горизонтов палеозойский водоносный комплекс отделяется глинами коры выветривания, мощность которых достигает 10 м.

В районе месторождения довольно четко прослеживаются три гидродинамические зоны, имеющие свои пьезометрические поверхности. Первая зона связана с эоценовыми и, частично, с маастрихтскими водоносными горизонтами. Глубина залегания уровня подземных вод этих горизонтов - 5-18 м. Вторая зона приурочена к меловым водоносным горизонтам. Глубина залегания уровня - 20-25 м. Третья зона связана с трещиноватыми

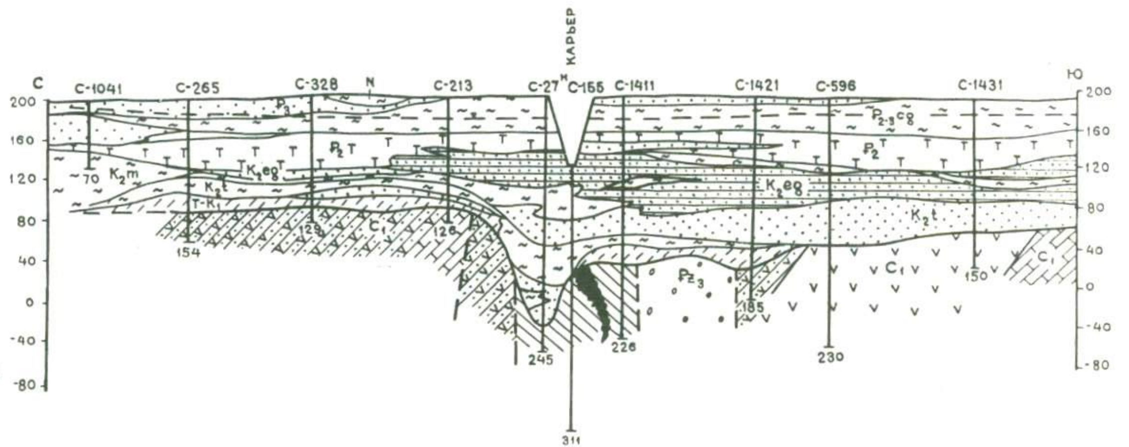


Рис. 2. Гидрогеологический разрез Качарского месторождения: [legend symbol] – пески; [legend symbol] – глины; [legend symbol] – опоки; [legend symbol] – песчаники; [legend symbol] – глины коры выветривания; [legend symbol] – известняки; [legend symbol] – порфириты; [legend symbol] – туфопесчаники; [legend symbol] – конгломераты и гравелиты; [legend symbol] – руда; [legend symbol] – скважина, цифры: вверху – номер; внизу – глубина, м; [legend symbol] – положение уровня подземных вод в ненарушенных условиях

скальными породами палеозойского возраста. Напоры в этой зоне устанавливаются на глубине 21-38 м от поверхности земли.

Учитывая гидрогеологические условия месторождения, на модели была реализована пятислойная фильтрационная схема с тремя напорными водоносными горизонтами и двумя разделяющими слоями. Верхняя граница модели проходила по подошве чеганских глин, нижняя - по подошве зоны активной трещиноватости палеозойских пород. Размер моделируемой области в плане определялся радиусом влияния дренажных сооружений, а на внешних границах задавались граничные условия первого рода. В естественных условиях формирования на месторождении подземные воды движутся в виде плановых напорных потоков юго-восточного направления; расходы потоков формируются, в основном, за счет притока со стороны внешних северо-западных границ. При отработке карьера возникает процесс разгрузки подземных вод в бортах карьера, формируются водопритоки к дренажным системам. Разгрузка подземных вод в дно карьера схематизировалась в виде отрицательного питания, определяемого в соответствующих узлах модели. Вокруг карьера задавались граничные условия второго рода.

Временное пространство характеризуется начальным и конечным временем развития гидрогеологических процессов. За начальное время был принят 1975 г. - момент начала разработки карьера. С 1981 г. начал отрабатываться верхний (эоценовый) водоносный горизонт, а с 1983 г. - меловый. По плану развития карьера с 1986 г. должна быть начата промышленная добыча руды, т.е. разработка "нижнего" горизонта модели. В качестве эпигнозного был определен период с 1981 по 1984 гг. включительно. Началом прогнозного периода принят 1985 г., а конец соответствует 2007 г. Временное пространство при решении задачи аппроксимировалось согласно структуре данных по дренажному водоотбору, этапам отработки карьера, в виде полугодовых отрезков времени. Это позволило более точно учесть изменения в водопроводимости пластов и в размере карьера при оценке прогнозных водопритоков (рис. 3).

Изучение и подтверждение модели месторождения проводилось на этапе решения обратных стационарной и нестационарной задач с использованием разработанной в Казахстанской опытно-методической экспедиции автоматизированной системы обработки гидрогеологических данных при оценке эксплуатационных запасов подземных вод на ЭВМ ЕС (АСОЗ) [II]. При этом на модели осуществлялся комплексный подбор таких значений параметров фильтрационной среды, составляющих баланса подземных вод и граничных условий, при которых обеспечивалась адекватность полученной модели природным условиям месторождения. Подбор параметров проводился итерационным методом при многократном решении прямой задачи. Точность и достоверность решения обратных задач проверялись по разности между значениями напоров подземных вод, замеренных на месторождении и полученных на модели. Кроме того, адекватность модели гидрогеологическим условиям месторождения оценивалась по соответствию:

I) модельных распределений фильтрационных параметров геолого-структурным и литолого-фациальным особенностям месторождения;

2) модели объекту по структуре водного баланса как в целом по всей области, так и по отдельным участкам;

3) модели объекту по условиям формирования и динамике развития понижений напоров в водоносных горизонтах в эпигнозный период.

При оценке достоверности модели месторождения по результатам решения обратных задач использовалась методика, изложенная в [I2]. Систематическая погрешность решения обратных задач составила +I7,6%, случайная - 2I,9%. Полученные погрешности входят в пределы допустимых при проведении гидрогеологических расчетов на модели и отражают общую достоверность полученных результатов.

После уточнения параметров на модели выполнялась прогнозная оценка водопритоков в горные выработки. Постановка задачи заключалась в следующем. Определялось питание водоносного горизонта (водопритоки к системе дренажных сооружений), которое должно обеспечивать требуемое распределение напоров. Требуемое положение напоров рассчитывалось линейной интерполяцией между отметками напоров подземных вод в

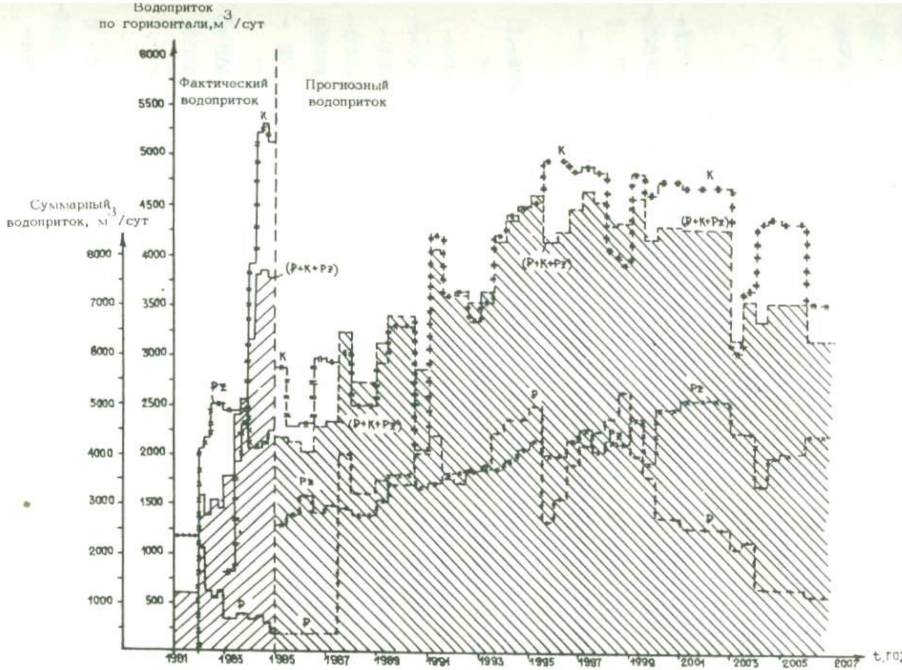


Рис. 3. Водопритоки по водоносным горизонтам Качарского месторождения с I.0I.I98I по 2007 гг.

конце эпигнозного периода и отметками поверхности карьера в 1996 и 2007 годах отработки. Согласно проектным схемам отработки в качестве исходных задавались значения питания горизонтов, полученные на предыдущем отрезке решения задачи. Начальное распределение питания соответствовало дебитам водопонизительных, восстающих скважин, карьерного и шахтного водоотлива, задаваемых на конец эпигнозного периода. Задание точек подбора питания (координаты управлений) соответствовало местам расположения дренажных галерей, водопонизительных, восстающих скважин и контуру карьера. Точки задания критерия качества решения задачи (т.е. точки, в которых задавались требуемые значения напора) пространственно либо совпадали, либо не совпадали с точками, в которых подбиралось питание, в зависимости от конкретных условий решения задачи на данном отрезке прогнозного периода. Весь прогнозный период с 1985 по 2007 гг. разбивался на полугодовые отрезки, для которых определялось прогнозное питание горизонтов. По мере снижения напоров и осушения горизонтов уменьшалась водопроводимость отложений вплоть до полного исключения их из расчета. Шаг временной итерации при работе программы - одни сутки.

Полученные на модели прогнозные водопритоки по водоносным горизонтам представлены на рис. 3. Значения водопритоков по абсолютной величине закономерно уменьшаются по мере осушения горизонтов и стабилизируются к 2007 году. Суммарный водоприток в карьер порядка 6500 м^3/сут к 2007 году соответствует реальным условиям обводненности месторождения, а порядок цифр подтверждается аналитическими расчетами, выполненными гидрогеологами.

Полученные на модели прогнозные оценки водопритоков к горным выработкам для довольно сложных гидрогеологических условий реального объекта подтвердили правильность программной реализации одного из методов решения задач оптимального управления геофильтрационными системами и позволили наметить пути дальнейшего его совершенствования.

Опробование алгоритма и программы решения задачи управления, основанных на методе функций влияния, осуществляется в настоящее время и станет предметом обсуждения в последующих публикациях. Ведутся также математические и алгоритмические проработки решения задач по определению оптимального местоположения водозаборных сооружений.

Литература

1. Фролов Н.М., Язвин Л.С. Основные термины и определения в области изучения ресурсов и запасов подземных вод. - Водные ресурсы, 1984, № 5, с. 142-146.
2. Гусева Е.В. Алгоритм оптимизации в системе управления региональными эксплуатационными ресурсами подземных вод. - Водные ресурсы, 1981, № 3, с. 167-175.
3. Игнатьева И.Ю. Оптимизация эксплуатации подземных вод в условиях безнапорной фильтрации. - Водные ресурсы, 1983, № 4, с. 118-124.
4. Bachmat Y., et.al. S. Groundwater Management: The use of numerical models - water Besour. Monogr. Ser., 1980, vol.5, AGU, Washington.D.C.
5. Gorelick S.M. A review of distributecl parameter Groundwater management moclelling methods.- Water Besour. Research, 1983, vol. 19, N 2, p.305-319.
6. Веселов В.В. и др. Автоматическое управление фильтрацией подземных вод. - Вестн. АН КазССР, 1977, № 12, с. 41-45.
7. Бутковский А.Г. Методы управления системами с распределенными параметрами. - М.: Наука, 1975.
8. Степаненко В.П. Расчет оптимального управления процессом многослойной геофильтрации. - В кн.: Тез. докл. УШ республиканской межвузовской научн. конф. по математике и механике. Ч. П. Вычислительная и прикладная математика. Алма-Ата, 1984, с. 162.
9. Арсенин В.Я. Методы математической физики и специальные функции. - М.: Наука, 1984.
10. Веселов В.В. и др. Перспективы развития автоматизированных систем моделирования процессов геофильтрации на ЭВМ. Водные ресурсы, 1985, № 4, с. 177-184.

II. Веселов В.В. и др. Автоматизированная система обработки гидрогеологических данных для оценки эксплуатационных запасов месторождений пресных подземных вод методом моделирования на ЭВМ. - В сб.: Разработка и создание АСУ-Геология. М., I984, вып. 2(5I), с. I0-I02.
I2. Гавич И.К. Теория и практика применения моделирования в гидрогеологии. - М.: Недра, I980.

Б.К.Алабин, Ю.А.Воронин

О ВВЕДЕНИИ МЕР СХОДСТВА И МЕР ВЕРОЯТНОСТИ НА МНОЖЕСТВЕ НУЛЬ-ЕДИНИЧНЫХ ВЕКТОРОВ

I. Предварительные замечания

Множества нуль-единичных векторов успешно используются как инструмент для решения многих задач прикладной математики. При этом оказывается необходимым вводить меры сходства на парах векторов и меры вероятности на векторах. Давно известны многие частные приемы введения этих мер. Вопрос о неком регулярном подходе к их введению впервые был поставлен в [I, 2].В этой статье речь пойдет о развитии и конкретизации такого подхода.

2. Общие представления о мерах сходства и мерах вероятности на множестве нуль-единичных векторов

Пусть x_i - i-я логическая переменная, принимающая значения 0 или I, а X_α - вектор n логических переменных x_i, $X_\alpha = (x_1^\alpha, x_2^\alpha, \ldots, x_n^\alpha)$. Когда говорится о множестве нуль-единичных векторов, то имеется ввиду множество

$$X = \{X_\alpha\}, \qquad X_\alpha = (x_1^\alpha, x_2^\alpha, \ldots, x_n^\alpha), \tag{1}$$

$$x_i^\alpha = 0,1, \quad i = 1 \div n, \quad \alpha = 1 \div 2^n.$$

Обозначим:

$$x_i^\alpha = 0,1, \quad \bar{x}_i^\alpha = 1,0,$$

$$X_\alpha = (x_1^\alpha, x_2^\alpha, \ldots, x_n^\alpha), \ \bar{X}_\alpha = (\bar{x}_1^\alpha, \bar{x}_2^\alpha, \ldots, \bar{x}_n^\alpha),$$

$$(X_\alpha \ X_\beta): \begin{cases} X_\alpha = (x_1^\alpha \ x_2^\alpha \ \ldots \ x_k^\alpha \ \ldots \ x_n^\alpha), \\ X_\beta = (x_1^\beta \ x_2^\beta \ \ldots \ x_k^\beta \ \ldots \ x_n^\beta), \end{cases}$$

$$(X'_\alpha \ X'_\beta|_k): \begin{cases} X'_\alpha = (x_1^\alpha \ x_2^\alpha \ \ldots \ x_k^\beta \ \ldots \ x_n^\alpha), \\ X'_\beta = (x_1^\beta \ x_2^\beta \ \ldots \ x_k^\alpha \ \ldots \ x_n^\beta), \end{cases} \tag{2}$$

$$X(0) = (0, 0, \ldots, 0), \ X(1) = (1, 1, \ldots, 1).$$

Когда речь идет о мере сходства на X, то имеются в виду отображения

$$\{(X_\alpha \ X_\beta)\} \to \{\lambda\}, \tag{3}$$

где $\{\lambda\}$ – множество чисел или номеров; когда же речь идет о мере вероятности на X, то имеются в виду отображения

$$\{X_\alpha\} \to \{p\}, \tag{4}$$

где $\{p\}$ – тоже множество чисел или номеров. Предполагается, что отображения (2) и (3) удовлетворяют неким аксиомам. Для них известны многие частные выражения [3–5].

3. Фиксация множества допустимых мер сходства на множестве нуль-единичных векторов

Как и ранее [I, 5 - 7], будем считать, что $\lambda(X_\alpha\ X_\beta)$ - допустимые меры сходства на X - должны удовлетворять следующей системе аксиом:

- ограничению по интервалу $0 \le \lambda(X_\alpha\ X_\beta) \le 1$;
- симметрии: $\lambda(X_\alpha\ X_\beta) = \lambda(X_\beta\ X_\alpha)$;
- полному сходству: $\lambda(X_\alpha\ X_\beta) = 1 \Leftrightarrow X_\alpha = X_\beta$;
- полному различию:

$$X_\alpha = X(0), \quad X_\beta = X(1) \Rightarrow \lambda(X_\alpha\ X_\beta) = 0; \qquad (5)$$

- возрастанию: $\lambda(X_\alpha\ X_\beta) > \lambda(X_\gamma\ X_\delta)$, если $n_{\alpha\beta} > n_{\gamma\delta}$,

где $n_{\alpha\beta}$ и $n_{\gamma\delta}$ - число совпадающих значений x_i в парах $(X_\alpha\ X_\beta)$ и $(X_\gamma\ X_\delta)$, из них общих $n_{\gamma\delta}$;

- наследованию:

$$\lambda(X_\alpha\ X_\beta) = \varphi(X'_\alpha\ X'_\beta),$$

если X'_α и X'_β - полные подвекторы, отвечающие несовпадающим x_i.

В [I, 7] уже обсуждался вопрос "непротиворечивости", "независимости", "полноты" и "разумности" аксиом (5). Сейчас важно, что множество допустимых $\lambda(X_\alpha\ X_\beta)$ охватывает все известные "усложненные" $\lambda(X_\alpha\ X_\beta)$, содержит много неизвестных "усложненных" $\lambda(X_\alpha\ X_\beta)$, позволяет надеяться на построение теории $\lambda(X_\alpha\ X_\beta)$. Можно сформулировать следующие теоремы.

Т е о р е м а I. Нули $\lambda(X_\alpha\ X_\beta)$ могут быть только на второй главной диагонали матрицы мер сходства $\lambda(X_\alpha\ X_\beta), \alpha, \beta = 1 \div 2^n$ (на первой главной диагонали - единицы). Нулей $\lambda(X_\alpha\ X_\beta)$ на второй главной диагонали либо один, либо n:

$$\lambda(X_\alpha\ X_\beta) > \lambda(X_\alpha, \bar{X}_\alpha) \ge 0.$$

Т е о р е м а 2. Матрица мер сходства $\lambda(X_\alpha\ X_\beta)$, $\alpha, \beta = 1 \div 2^n$, симметрична относительно и второй главной диагонали: $\lambda(X_\alpha\ X_\beta) = \lambda(\bar{X}_\alpha\ \bar{X}_\beta)$.

4. Фиксация представлений о принципиально различных мерах сходства на множестве нуль-единичных векторов

Учитывая, что допустимые $\lambda(X_\alpha\ X_\beta)$ интересуют нас только как инструмент для решения задач распознавания образов и задач эффективного кодирования [I-6], введем представления о принципиально различных $\lambda(X_\alpha\ X_\beta)$ следующим образом [I].

Среди допустимых $\lambda(X_\alpha\ X_\beta)$ есть:

I) сильно симметричные $(\lambda(X_\alpha\ X_\beta) = \lambda(X'_\alpha\ X'_\beta|_k)$ и слабо симметричные;

2) имеющие один нуль $(\lambda(X_\alpha\ X_\beta) = 0$ только при $X_\alpha = X(0)$ и $X_\beta = X(1))$ и имеющие n нулей;

3) содержащие мало параметров $(p \leq n)$ и содержащие много параметров.

Имеет место

Т е о р е м а 3. Все сильно симметричные $\lambda(X_\alpha\ X_\beta)$ имеют n нулей.

Это позволяет получить шесть возможных принципиально различных категорий $\lambda(X_\alpha\ X_\beta)$ (см. рисунок).

5. Фиксация представлений о простых мерах сходства на множестве нуль-единичных векторов

В наших целях не имеет смысла рассматривать множество всех допустимых $\lambda(X_\alpha\ X_\beta)$. Достаточно рассмотреть только его некое "собственное" подмножество (содержащее $\lambda(X_\alpha\ X_\beta)$ всех принципиально различных категорий). Фиксируем множество всех простых $\lambda(X_\alpha\ X_\beta)$ следующим образом.

Среди допустимых $\lambda(X_\alpha\ X_\beta)$ есть [5]:

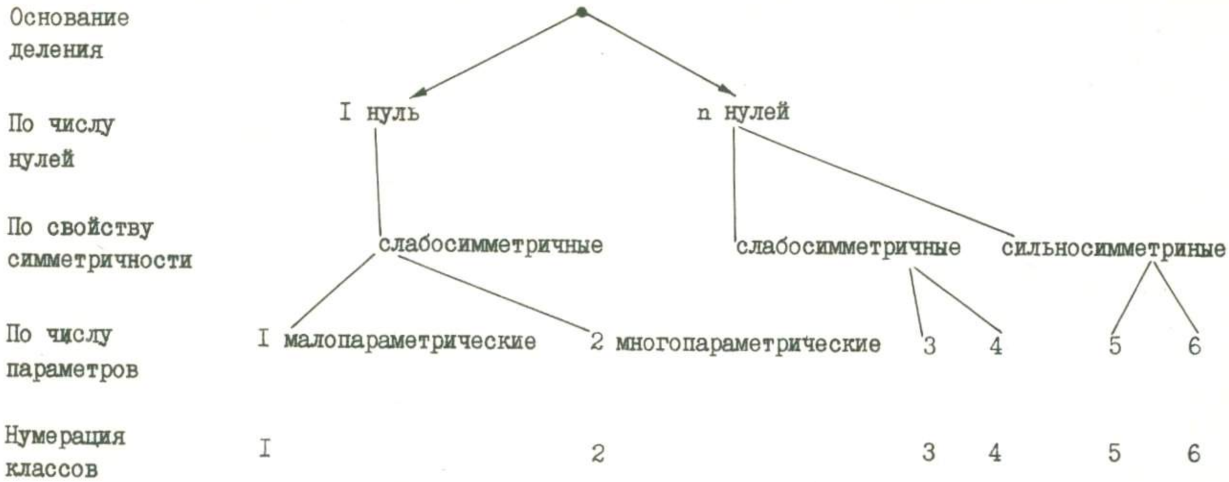
I) детерминированные (область определения λ не связана с вероятностями X_α и X_β) и вероятностные;

2) аналитические (λ задается как функция) и неаналитические;

3) непрерывные (λ - непрерывная функция) и разрывные;

4) просто зависящие от параметров (λ квазилинейно зависит от параметров) и сложно зависящие от параметров;

5) просто интерпретируемые (уравнение $\lambda(X^*, X_\alpha) = \lambda$ явно разрешимо, без полного перебора X_α) и сложно интерпретируемые.



Категории мер сходства (принципиально различных)
на нуль-единичных векторах

Будем говорить, что допустимая $\lambda(X_\alpha\ X_\beta)$ является простой, если она детерминированная, аналитическая, непрерывная, просто зависящая от параметров и просто интерпретируемая.

Учтем, что параметры $\lambda(X_\alpha\ X_\beta)$ могут определяться по задаче и выборке и только по выборке [I,5].Имеется в виду их определение по задаче и выборке.

6. Фиксация представлений о простейших мерах сходства на множестве нуль-единичных векторов

Легко видеть, что паре $(X_\alpha\ X_\beta)$ можно привести в однозначное соответствие переменные

$$n^{\alpha\beta}(s,\ t) \equiv \sum_{i=1}^{n} \delta_i^{st}\, \lambda(x_i^\alpha,\ s)\lambda(t,\ x_i^\beta), \qquad s,t = 0,1, \tag{6}$$

где $\delta_i^{st} > 0$ должны определяться, помимо прочего, с учетом условий

$$0 \le n^{\alpha\beta}(s,\ t) \le n, \tag{7}$$

$$\sum_{s,t} n^{\alpha\beta}(s,\ t) \equiv n. \tag{8}$$

С учетом (8) паре $(X_\alpha\ X_\beta)$ можно привести в однозначное соответствие независимые переменные

$$n^{\alpha\beta}(s,\ s),\ \ \max\{n^{\alpha\beta}(s,\ t),\ n^{\alpha\beta}(t,\ s)\}, \qquad s,t = 0,1. \tag{9}$$

Это позволяет считать, что без ущерба для общности простые $\lambda(X_\alpha\ \ X_\beta)$ можно представить так:

$$\lambda(X_\alpha\ X_\beta) = \lambda(\gamma_+^{\alpha\beta},\ \ \gamma_-^{\alpha\beta}) , \tag{10}$$

где $\gamma_+^{\alpha\beta}$ - "относительное число взвешенных совпадений" между X_α и X_β:

$$\gamma_+^{\alpha\beta} = \frac{1}{n}[n^{\alpha\beta}(1,\ 1) + n^{\alpha\beta}(0,\ 0)], \tag{11}$$

а $\gamma_-^{\alpha\beta}$ – обратное относительное число взвешенных несовпадений между X_α и X_β:

$$\gamma_-^{\alpha\beta} = 1 - \frac{1}{n}\max[n^{\alpha\beta}(1,\ 0),\ n^{\alpha,\beta}(0,1)]. \tag{12}$$

Будем говорить, что простая $\lambda(X_\alpha\ \ X_\beta)$ является простейшей, если она представима в виде

$$\begin{gathered}\lambda(X_\alpha\ X_\beta) = \pi_+\ \gamma_+^{\alpha\beta} + \pi_-\ \gamma_-^{\alpha\beta} + \pi_-^+\ \ \gamma_+^{\alpha\beta}\ \gamma_-^{\alpha\beta}, \\ \pi_+ > 0,\ \pi_- \geq 0,\ \pi_-^+ \geq 0,\ \pi_+ + \pi_- + \pi_+^- = 1.\end{gathered} \tag{13}$$

В дальнейшем будем иметь в виду только линейные простейшие $\lambda(X_\alpha\ \ X_\beta)$, представимые как

$$\begin{gathered}\lambda(X_\alpha\ X_\beta) = \pi_+\ \gamma_+^{\alpha\beta} + \pi_-\ \gamma_-^{\alpha\beta}\ , \\ \pi_+ > 0,\ \pi_- \geq 0,\ \pi_+ + \pi_- = 1.\end{gathered} \tag{14}$$

Как можно показать, из (4) следует, что

$$\delta_i^{11} = \delta_i^{00},\ \ \delta_i^{10} = \delta_i^{01}\ . \tag{15}$$

Поэтому в (II) и (I2) будем иметь

$$n^{\alpha\beta}(s,\ s) = \sum_{i=1}^{n} \delta_i^+\ \lambda(s,\ x_i^\alpha)\lambda(x_i^\beta,\ s),\ s = 0,1, \tag{16}$$

$$n^{\alpha\beta}(s,\ t) = \sum_{i=1}^{n} \delta_i^-\ \lambda(s,\ x_i^\alpha)\lambda(x_i^\beta,\ t),\ s,\ t = 0,1,\ \ s \neq t, \tag{17}$$

причем

$$0 < \delta_i^+ \le n, \qquad 0 < \delta_i^- \le n ,$$
$$\Sigma\delta_i^+ = n, \qquad \Sigma\delta_i^- = n. \qquad (18)$$

Как можно убедиться, среди простейших $\lambda(X_\alpha\ X_\beta)$ имеются представители всех принципиально различных $\lambda(X_\alpha\ X_\beta)$ (см.п.4). Легко видеть, что исходя из простейших $\lambda(X_\alpha\ X_\beta)$ можно за счет некоторых операций получать производные простейшие $\hat{\lambda}(X_\alpha\ X_\beta)$. Например:

$$\hat{\lambda}(X_\alpha\ X_\beta) = \frac{2\lambda(X_\alpha\ X_\beta)}{1 + \lambda(X_\alpha\ X_\beta)} , \qquad (19)$$

$$\hat{\lambda}(X_\alpha\ X_\beta) = 1 - \{\alpha|\lambda(X(0)X_\alpha) - \lambda(X_\beta X(0))| +$$
$$+ \beta|\lambda(X(1), X_\alpha) - \lambda(X_\beta, X(1)|\} , \qquad (20)$$
$$\alpha, \beta > 0 , \alpha + \beta = 1 .$$

Это позволяет утверждать, что любые известные сейчас меры сходства или близости между X_α и X_β(см., например, сводки в [3 , с. 176-179] и в [5 , с. 176-180]) могут быть получены через простейшие $\lambda(X_\alpha\ X_\beta)$.

7. О классификации простейших мер сходства на множестве нуль-единичных векторов

Имея конструктивное выражение для простейших $\lambda(X_\alpha\ X_\beta)$ (см. (11), (12), (14), (16) - (18)), можно говорить о постановке задачи на построение их классификации. При этом необходимо предварительно, во-первых, фиксировать цели построения такой классификации $\lambda(X_\alpha\ X_\beta)$, во-вторых, сформулировать представления о видах $\lambda(X_\alpha\ X_\beta)$ и подходящих основаниях (признаках) для классифицирования $\lambda(X_\alpha\ X_\beta)$, в-третьих, получить подходящий набор подходящих оснований для классифицирования $\lambda(X_\alpha, X_\beta)$[5].

Будем считать, что классификация $\lambda(X_\alpha\ X_\beta)$ нужна для обеспечения

- систематизации уже известных $\lambda(X_\alpha X_\beta)$ (и их аналогов) и выработки приемов их исследования,

- построения новых $\lambda(X_\alpha X_\beta)$ и их исследования,

- выбора типов, родов, классов и видов $\lambda(X_\alpha X_\beta)$ при решении конкретных задач.

Напомним следующее [5, 7]. Для простейшей $\lambda(X_\alpha X_\beta)$ можно определить гистограмму ее различных значений $R(\lambda)$ и ее подробность $r(\lambda) = 2\frac{m(n)+1}{n(n-1)}$, где $m(n)$ - число различных значений $\lambda(X_\alpha X_\beta)$, $\alpha, \beta = 1 \div 2^n$, $\alpha \le \beta$. Для любого X_α можно найти наиболее сходные с ним X_β с учетом $\lambda(X_\alpha X_\beta)$, ближайших соседей к X_α по $\lambda(X_\alpha X_\beta)$ или X_β^α. Обозначим их число через $l(X_\alpha, \lambda)$, положим $\lambda(X_\alpha)=\lambda(X_\alpha, X_\beta^\alpha)$. Это позволяет каждой $\lambda(X_\alpha X_\beta)$ поставить в соответствие характеристики $l(X_\alpha)$ и $\lambda(X_\alpha)$. Говоря об исследовании простейшей $\lambda(X_\alpha X_\beta)$, будем иметь в виду определение для нее принципиально различающих свойств (см. рисунок), получение $R(\lambda)$ и $r(\lambda)$ и нахождение $l(X_\alpha, \lambda)$ и $\lambda(X_\alpha)$.

Будем говорить, что простейшие $\lambda'(X_\alpha X_\beta)$ и $\lambda''(X_\alpha X_\beta)$ относятся к одному виду (почти одинаковы с теоретических и практических позиций), если они порождают один и тот же порядок в X^2. Исходя их порядков, порождаемых $\lambda'(X_\alpha X_\beta)$ и $\lambda''(X_\alpha X_\beta)$ в X^2, можно говорить о связи между ними, о мерах близости между видами $\lambda(X_\alpha X_\beta)$ [т, 6].

Основания (признаки) для классифицирования простейших $\lambda(X_\alpha X_\beta)$ будем считать подходящими, если они являются "делящими и почти равноделящими", "существенными" ("не разрезают виды"), "эффективно определяющими" (или по изменениям λ при фиксированных изменениях X_α и X_β, с учетом (4), или по явному выражению $\lambda(X_\alpha X_\beta)$, формулы (I4), (II), (I2), (I6) - (I8), или по матрицам мер сходства $\lambda(X_\alpha X_\beta)$) и "новыми" (не использовались для введения представлений о принципиально различных и простых $\lambda(X_\alpha X_\beta)$ и их видах)ж).

ж) Таким образом, признаки (свойства) $\lambda(X_\alpha X_\beta)$ различаются "по чему они определяются", "как они делят" и "зачем они используются ".

Набор оснований (признаков) для классифицирования простейших $\lambda(X_\alpha\ X_\beta)$ будем называть подходящим, если входящие в него основания попарно почти независимы и их заведомо достаточно, чтобы результирующие классы, получаемые за счет использования части оснований, были "почти чистыми" (почти совпадали с видами).

Предпримем попытку получить некоторую "разумную" совокупность подходящих оснований (признаков) для классицирования простейших $\lambda(X_\alpha\ X_\beta)$ с учетом формул (I4), (II), (I2), (I6) - (I8):

- по параметру π_- (см. формулу (I4)) можно выделить случаи $\pi_- = 0$, $\pi_- \neq 0$;

- по соотношению параметров δ_i^+ и δ_i^- (см. формулы (I6) и (I7))можно выделить два случая $\delta_i^+ = \delta_i^-$ и $\delta_i^+ \neq \delta_i^-$;

- по соотношению параметров δ_i^+ (см. формулу (I6)) можно выделить $h^+(n)$ случаев (с учетом произвола в нумерации x_i) : $\delta_i^+ \geq \delta_j^+$, $i, j = 1 \div n$, $i < j$;

- по соотношению параметров δ_i^- (см. формулу (I7)) можно выделить $h^-(n)$ случаев: $\delta_i^- \geq \delta_j^-$, $i,j = 1 \div n$.

Естественно первоначально строить классификацию простейших $\lambda(X_\alpha\ X_\beta)$ для $n = 2,3$.

8. О простейших мерах вероятности на множестве нуль-единичных векторов

По аналогии с [6] зададим множество простейших мер вероятности на X так:

$$P(X_\alpha) = \psi[\lambda(X_*\ \ X_\alpha)]\,, \tag{21}$$

$$\Sigma\psi[\lambda(X_*\ \ X_\alpha)] = 1,\ X_* = (x_1^*,\ x_2^*\ \dots\ x_n^*).$$

На основе (2I) оказывается возможным ставить задачи построения $p(X_\alpha)$ по заданным m эмпирическим значениям $p \in (X_\beta)$. По-видимому, все известные сейчас $p(X_\alpha)$ могут быть построены на основе

$$p(X_\alpha) = ae^{-b[1-\lambda(X_*,X_\alpha)]}\,,$$

$$P(X_\alpha) = a[\lambda(X_*, X_\alpha)]^b.$$

Литература

1. Воронин Ю.А. Теоретические основы описания и классифицирования геологических тел. - Автореф. дис. на соиск. учен. степ. докт. физ.-мат. наук. - Новосибирск, 1969. - 40 с. (ВЦ СО АН СССР).
2. Якубович С.М. Аксиоматическая теория сходства. - НТИ, 1968, № 10, с. 115-121.
3. Анализ нечисловой информации в социологических исследованиях. - М.: Наука, 1985.
4. Боровков А.А. Теория вероятностей. - М.: Наука, 1976.
5. Воронин Ю.А. Теория классифицирования и ее приложения. - Новосибирск: Наука, 1985.
6. Воронина Н.Ю. Классификация видов мер сходства между объектами по одному сильному свойству. - Наст. сб., с. 84-88.
7. Воронин Ю.А. Введение в теорию классификаций. - Новосибирск, 1982.

Н.Ю.Воронина

КЛАССИФИКАЦИЯ ВИДОВ МЕР СХОДСТВА МЕЖДУ ОБЪЕКТАМИ ПО ОДНОМУ СИЛЬНОМУ СВОЙСТВУ

I. Идея аксиоматического подхода к введению λ_F - мер сходства между объектами по заданной совокупности свойств, предложена Ю.А.Ворониным в [I] и разрабатывалась в ряде его работ, например [2], и в работах Е.Д.Москаленского, например, в [3].

Однако до сих пор эта идея остается в значительной степени только идеей, в частности, потому что не удается явно сформулировать аксиому простоты таких мер [2, 4], дать для них общее конструктивное представление, построить классификацию, установить связь с мерами вероятностей, сформулировать представления о постановке и решении задач на выбор [2].

Цель заметки - дальнейшая разработка идеи аксиоматического подхода к введению λ_F для вырожденного случая одного сильного свойства λ_f.

Будем считать, что λ_f - меры сходства между объектами по одному свойству - вводятся либо для организации образов, либо для конструирования λ_F - мер сходства между объектами по многим свойствам [I].

2. Когда речь идет о сильном свойстве f, определенном на объектах a из множества A, считается, что $\langle f_i \rangle_A$ - множество всех возможных значений f на A, представляет собой или множество чисел (арифметическая шкала измерений), или множество номеров (порядковая шкала измерений) [2]. В первом и втором случаях можно однозначно отобразить $\langle f_i \rangle_A$ на множество вещественных чисел из промежутка (0, 1):

$$\varphi_i = \frac{f^{**} - f_i}{f^{**} - f^*},\ n(f) = \frac{n(f_i)}{n}, \qquad (1)$$

где f^{**} и f^* - максимальное и минимальное значения f_i; $n(f_i)$ и n - число номеров, предшествующих номеру f_i, и общее число соответственно. В силу этого, имея в виду $\lambda_f(a_i, a_j)$ - меру сходства между объектами a_i и a_j из A по заданному одному сильному свойству f, можно говорить о $\lambda(x, y)$ - мере сходства между вещественными числами x и y, $0 \le x, y \le 1$.

3. Зададим множество всех допустимых (удовлетворяющих аксиомам I–6, см. [2], с.187) простейших мер сходства между x и y выражением

$$\lambda(x, y) = 1 - \{[q + (1 - q)(\frac{|r - r_o|}{|1/2 - r_o|})^k][\alpha_1\Delta_1 + \alpha_2\Delta_2]^l\}, \qquad (2)$$

где

$$\left.\begin{aligned} r &= \frac{x + y}{2},\quad \Delta_1 = |x - y|, \\ \Delta_2 &= (\frac{\min(x, y) + h}{\max(x, y) + h} - \frac{h}{1 + h})(1 + h), \end{aligned}\right\} \qquad (3)$$

$$\left.\begin{array}{lll} 0 < q < 2, & 0 \le r_o \le 1, & r_o \ne 1/2, \\ k = 0,1,\ldots, & l = 1,2,\ldots, & k \le l, \\ \alpha_1, \alpha_2 = 0,1, & \alpha_1 + \alpha_2 = 1, & 0 < h \le 1. \end{array}\right\} \qquad (4)$$

Заметим, что имеется возможность порождения $\mu(x, y)$ - непростейших мер сходства между x и y, например, "почти тождественных" $\lambda(x, y)$:

$$\mu(x, y) = R[\lambda(x, y)],$$

где

$$R[0] = 0,\ R[1] = 1,\ \frac{dR}{d\lambda} > 0.$$

5. В 1984 г. Ю.А.Ворониным была высказана гипотеза о λ - непрерывности дифференциальных законов распределения $p(x)$: если $\lambda(x, y) \geq 1 - \varepsilon$, то $|p(x) - p(y)| \leq \delta$. Опираясь на нее, можно задать множество всех простейших $p(x)$ выражением

$$p(x) = \phi[\lambda(x^*, x)],$$

$$\int_0^1 \phi[\lambda(x^*, x)]dx = 1.$$

На основании ϕ можно ввести представления о категориях $p(x)$, например, экспоненциальной

$$p(x) = ae^{-b[1-\lambda(x^*,x)]}$$

или степенной

$$p(x) = a[\lambda(x^*, x)]^2.$$

Внутри каждой категории $p(x)$ можно ввести представления о видах и подвидах $p(x)$ на основании представлений о видах и подвидах $\lambda(x, y)$, см.п.4. Это дает возможность получить классификацию видов $p(x)$, позволяющую "с одних позиций систематизировать ранее известные виды $p(x)$, обнаруживать и строить новые виды $p(x)$, реализовать в конкретных задачных ситуациях последовательный выбор типа, рода, класса и вида $p(x)$".

В связи с этим можно считать, что (2) задает такое подмножество мер сходства, которое является представительным по отношению к множеству почти всех допустимых мер сходства [3].

4. На основе (2) можно построить классификацию мер сходства, позволяющую с единых позиций систематизировать все ранее известные меры, обнаруживать и строить новые и реализовывать в конкретных задачных ситуациях последовательный выбор типа, отряда, рода, класса и вида меры сходства, а также оценку параметров [2]. В табл.I перечислены наименования таксонов, на которые подразделяются меры сходства и основания для их выделения. В табл.2 приведена классификация равномерных мер сходства. Подобным образом можно построить полную классификацию-перечисление видов неравномерных мер.

Т а б л и ц а I

Основания классификации мер сходства

Таксоны	Наименования и основания выделения таксонов		
Тип	равномерный, $q = 1$	неравномерный отрицательный, $q < 1$	неравномерный положительный, $q \geq 1$
Отряд	разностный, $\alpha_1 = 1$, $\alpha_2 = 0$	относительный, $\alpha_1 = 0$, $\alpha_2 = 1$	—
Род	монотонный, $r_0 = 0$	немонотонный левый, $r_0 < 1/2$	немонотонный правый, $r_0 > 1/2$
Класс	линейный (по каждому из параметров q и α) при $k = 0$, $l = 0$; $k = 0$, $l = 1$; $k = 1$, $l = 0$.	нелинейный	—

Т а б л и ц а 2

Классификация равномерных мер сходства, $q = 1$

Отряд	($\alpha_1 = 1$, $\alpha_2 = 0$)		($\alpha_1 = 0$, $\alpha_2 = 1$)	
Класс	линейный, $l = 1$	нелинейный, $l > 1$	$l = 1$	$l > 1$
Номер результирующего таксона (вида)	I	2	3	4

Напомним, что меры сходства $\lambda'(x, y)$ и $\lambda''(x, y)$ относятся к одному виду (почти одинаковы с теоретических и практических позиций), если они устанавливают один и тот же порядок на парах (x, y), $x < y$. Будем считать, что $\lambda'(x, y)$ и $\lambda''(x, y)$ эквивалентны, если они относятся к одному виду и зависят от одинакового числа параметров.

Для того, чтобы классификация мер сходства отвечала поставленной цели, т.е. таксоны самого нижнего уровня, назовем их результирующими таксонами, являлись видами, необходимо показать, что:

I) все основания для выделения таксонов табл. I существенны, т.е. две меры $\lambda'(x, y)$ и $\lambda''(x, y)$, принадлежащие разным таксонам (типам, родам и т.д.), заведомо принадлежат разным видам;

2) основания деления на таксоны являются независимыми;

3) число оснований неизбыточно, т.е. меры $\lambda'(x, y)$ и $\lambda''(x, y)$, принадлежащие одному виду по определению, не могут принадлежать разным результирующим таксонам;

4) принадлежность двух мер сходства к одному результирующему таксону гарантирует их принадлежность к одному виду, согласно определению, данному выше.

Литература

I. Воронин Ю.А. Введение мер сходства и связи для решения геолого-геофизических задач. - Докл. АН СССР, 1971, т.139, № 5, с.64-70.

2. Воронин Ю.А. Теория классифицирования и ее приложения. - Новосибирск: Наука, 1985.

3. Москаленский Е.Д. О построении мер сходства, не обладающих "избыточной симметрией". - В сб.: Вычислительные методы геологоразведки. Новосибирск, 1984, с.90-105.

4. Юдин Д.Б., Юдин А.Д. Число и мысль. (Математики измеряют сложность). - М.: Знание, 1985, вып.8.

А.А.Граусман, М.Г.Чистяков

О НЕТРАДИЦИОННОМ СПОСОБЕ ПОДСЧЕТА ЗАПАСОВ ПРИРОДНОГО ГАЗА ОБЪЕМНЫМ МЕТОДОМ

Увеличение глубин бурения и сложности геолого-разведочных работ привело к росту себестоимости разведки единицы запасов нефти и газа. Поэтому очень остро встали вопросы повышения экономической эффективности геологоразведки.

Поисково-разведочные работы и подсчет запасов нефти и газа представляют собой методологически единый процесс. Методология подсчета запасов определяет методологию разведки, и оптимизация разведки непосредственно связана с совершенствованием методологических основ подсчета запасов.

Обобщение опыта ИРМПИ позволило разработать отдельные способы (рецепты) проведения ГРР и регламентировать их многочисленными инструкциями и методологическими указаниями. Однако эмпирический подход влечет за собой индивидуализацию способов разведки, а следовательно, и индивидуализацию подсчета запасов. Такое положение приводит в конечном счете к тому, что в процессе разведки каждого МПИ производится простое накопление необходимых эмпирических параметров, входящих в формулу подсчета запасов. Правильность и достаточность накопленных данных определяется формульно-экспертной оценкой, проводимой ГКЗ.

Подсчет запасов любого ПИ сводится к вычислению интеграла

$$Q = \int_V q(x,\ y,\ z)dV\ , \qquad (1)$$

где Q - суммарные запасы, q - удельные запасы, V - объем пласта, содержащего ПИ.

Согласно уравнению реального газа, количество углеводородного газа в единице объема коллектора равно

$$dQ = \frac{T_{cm} \cdot P \cdot m \cdot K}{P_{cm} \cdot T \cdot \beta} dV . \qquad (2)$$

И, следовательно, геологические запасы природного газа могут быть подсчитаны по формуле

$$Q = \frac{T_{cm}}{P_{cm}} \int_V \frac{P \cdot m \cdot K}{T \cdot \beta} dV, \qquad (3)$$

где P_{cm} = 103 кПа, $T_{cm} = 293^{0}$К, P - пластовое давление в кПа, T - пластовая температура в градусах Кельвина, β - коэффициент сверхсжимаемости данного состава газа при P и T, m - открытая пористость в долях единицы, K - газонасыщенность в долях единицы.

Интегрирование по объему обычно заменяют двойным интегралом по площади газоносной части пласта S и эффективной мощности h.

Тогда (3) может быть представлена в виде

$$Q = \frac{T_{cm}}{P_{cm}} \int_0^S \int_0^h \frac{P \cdot m \cdot K}{T \cdot \beta} dS dh . \qquad (4)$$

Величины P, m, K, T, β, h являются переменными как по площади, так и по толщине пласта.

Однако, несмотря на это, запасы газа на практике подсчитываются по формуле

$$Q = \frac{T_{cm}}{P_{cm}} \cdot \frac{P_{cp}}{T_{cp} \beta_{cp}} \cdot m_{cp} \cdot K_{cp} \cdot h_{cp} \cdot S , \qquad (5)$$

в которой P_{cp}, T_{cp}, K_{cp}, h_{cp}, P_{cp}, m_{cp} принимаются постоянными и вычисляются путем усреднения каждого параметра в отдельности.

Исходной базой для построения геологической модели изучаемого пласта и выделения эффективных газонасыщенных мощностей при принятой методике счета служит корреляция разрезов скважин с целью выделения и прослеживания пород-коллекторов и разделяющих их пропластков.

Достоверность выделения границ коллектор-неколлектор определяется разрешающей способностью методов промысловой геофизики и составляет 0,4-I м [I], а относительные погрешности в оценке параметров могут достигать первых десятков процентов.

В основе построения карт для усреднения параметров лежит предположение о том, что поле любой количественной переменной обладает свойством локальной простоты, т.е. в ближайших окрестностях любой конкретной точки количественные изменения параметра с малой погрешностью можно описать линейной функцией или полиномом не выше третьей степени. На этом принципе основывается построение всех карт для усреднения параметров. Вместе с тем величины m, K, h могут быть не непрерывны, а дискретны, поэтому в непрерывном распространении точечных данных может скрываться источник погрешностей, особенно в случае согласования полей различных переменных.

Нахождение средней величины пористости путем взвешивания по объему пласта-коллектора не искажает физического смысла, так как величина пористости есть отношение пустот в пласте-коллекторе к общему объему коллектора. Однако величина газонефтенасыщенности отражает ее отношение не к общему объему пласта-коллектора, а к объему его порового пространства. И, следовательно, величину газонефтенасыщенности можно взвешивать только по поровому, а не общему объему, а поровой объем сам является искомой величиной.

Переменные m, K, h, входящие в формулу подсчета запасов, не являются независимыми. Между эффективной толщиной, газонефтенасыщенностью и пористостью существуют корреляционные связи, которые могут быть как прямыми, так и обратными. Следовательно, оценка запасов путем перемножения средних значений зависимых друг от друга переменных может иметь систематические ошибки (как завышение, так и занижение запасов).

Положение усугубляется еще и тем, что мы не можем определить K_{cp}, m_{cp}, h_{cp} экспериментально, поэтому всегда должны принимать какой-то способ усреднения, который не гарантирует от ошибок.

Таким образом, при принятом способе подсчета запасов сталкиваемся с трудностями, которые носят принципиальный характер и не могут быть сняты, особенно если учесть, что всегда приходится ограничиваться малым числом измерений по сравнению с рассматриваемым массивом горных пород.

Подобные трудности требуют поиска нового подхода при описании больших областей [2].

Вид функций, описывающих изменения P, T, β в недрах, известен, и, следовательно, (3) можно представить в виде

$$Q = \frac{T_{cm}}{P_{cm}} \cdot \frac{P_{cp}}{T_{cp} \cdot \beta_{cp}} \int_V m \cdot K \cdot dV. \qquad (6)$$

Авторами предлагается вычислять интегралы (6) не путем усреднения параметров m и K, а статистически, применяя интегральный способ, оперирующий фактическими значениями, накопленными в процессе поиска и разведки всех месторождений.

Значение открытой пористости m_i в любой точке пласта можно рассматривать как дискретную случайную валичину, а также принять, что каждому значению m_i соответствует определенное значение газонасыщенности – $K_i(m_i)$.

Так как каждому значению случайной величины m_i отвечает определенная вероятность ее наступления P_i^*, то выражение (6) можно записать в виде

$$Q = \frac{T_{cm}}{P_{cm}} \cdot \frac{P_{cp}}{T_{cp} \cdot \beta_{cp}} \cdot V \cdot \sum_{m_i > m_{np}} P_i^* \cdot m_i \cdot K_i(m_i) \,, \qquad (7)$$

где V – объем пород, содержащих газ; $\sum_{m_i > m_{np}} P_i^* \cdot m_i \cdot K_i(m_i)$ – доля "пустого" пространства, заполненного газом; m_{np} – предельная величина открытой пористости, характеризующей границу коллектор-неколлектор.

Решение (7) сводится, в основном, к отысканию P_i^*, т.е. установлению статистического закона распределения величин открытой пористости в изучаемом объеме пород.

В настоящее время отсутствуют какие-либо теоретические предпосылки, позволяющие отыскать вероятностный закон распределения пористости или случайной величины. Поэтому во всех случаях для выбора теоретического распределения необходимо сначала оценить статистическое.

Одной из характерных особенностей терригенных осадочных пород является неоднородность их физических свойств, которая по своему характеру может иметь случайную и закономерно изменяющуюся составляющие:

$$n = \xi + f(x, y, z), \qquad (8)$$

где n - значение изучаемого параметра; $f(x, y, z)$ - значение закономерной составляющей в точке x, y, z; ξ - случайная составляющая.

Все эмпирические зависимости изменения пористости от глубины, полученные в результате обработки опытных данных, говорят о том, что пористость при прочих равных условиях уменьшается с глубиной. Подобная закономерность позволяет считать, что для описания изменения пористости пород при погружении выражение (8) может быть преобразовано к виду

$$m_i = m_i^o - m_i(H_i), \qquad (9)$$

где m_i^o - случайная величина, которую можно рассматривать как начальное значение пористости, не зависящее от координат; $m_i(H_i)$ - закономерное изменение пористости с глубиной.

Тогда (7) можно представить в виде

$$Q = \frac{T_{cm}}{P_{cm}} \cdot \frac{P_{cp}}{T_{cp} \cdot \beta_{cp}} \cdot V \cdot \sum_{m_i > m_{np}} P_i^*[m_i^o - m_i(H_i)] \times$$

$$\times K_i[m_i^o - m_i(H_i)]. \qquad (10)$$

Для оценки величины P_i^* необходимо установить закономерность распределения m_i^o на начало уплотнения. Это можно сделать, спроектировав все результаты определения пористости по кернам скважин каждого исследуемого литолого-стратиграфического интервала на нулевую отметку (начало уплотнения)

$$m_i^o = m_i + m_i(H_i), \tag{11}$$

где H_i - палеоглубина (максимальная глубина погружения), m_i - открытая пористость, определенная по керну.

По полученным значениям m_i^o можно рассчитать эмпирический ряд распределения и построить гистограмму. Для этого необходимо определить вид функции $m_i(H_i)$.

Изменение пористости при погружении аппроксимируется логарифмической, степенной, экспоненциальной, гиперболической зависимостями, полиномами второй и более степеней.

Однако, как показано в [3], нелинейные зависимости пористости от глубины получаются в результате одновременной статистической обработки различных условий уплотнения: "сжатия с дренированием" и "сжатия без дренирования". И более правомерной представляется линейная аппроксимация зависимости "пористость-глубина" с фиксацией изломов, которые характеризуют либо прекращение, либо изменение условий уплотнения.

Как показали исследования [3], в терригенных отложениях Вилюйской синеклизы градиент изменения величины пористости с глубиной в условиях сообщающихся пор (сжатия с дренированием, $m_i > 8\%$) составляет 8% на километр погружения, а в условиях замкнутых пор (сжатие без дренирования, $m_i < 8\%$) - 4% на километр погружения.

Алгоритмы для машинной обработки результатов определения открытой пористости на кернах скважин могут быть представлены в следующем виде:

1) для образцов пород, имеющих пористость более 8%,

$$m_i^o = m_i + 8H_i, \tag{12}$$

2) для образцов пород, имеющих пористость менее 8%,

$$m_i^o = [H_i - (8 - m_i)\cdot 0,25]\cdot 8 + 8 \ , \qquad (13)$$

где m_i - в процентах, H_i - в километрах.

Для прогнозирования распределения пористости необходимо гистограмму m_i^o (I2), (I3) (модель-свертку информации) спроектировать на палеоглубину залегания исследуемого пласта. Это можно сделать по формуле

$$m_i = m_i^o - 8H_i \ , \qquad (14)$$

где m_i - значение открытой пористости в искомом ряду распределения, m_i^o - значение величины открытой пористости в модели-свертке, H_i - палеоглубина погружения пород.

Для терригенных отложений Вилюйской синеклизы выражение (I0) может быть представлено в виде

$$Q = \frac{T_{cm}}{P_{cm}} \cdot \frac{P_{cp}}{T_{cp}\cdot\beta_{cp}} \cdot V \cdot \sum_{m_i > m_{np}} \cdot P_i^*(m_i^o - 8H_i)\cdot K_i(m_i^o - 8H_i). \qquad (15)$$

Решение (I5) сводится к установлению зависимости газонасыщенности от пористости и вычислению объема песчанно-алевролитовых пород, содержащих газ.

Величина газонасыщенности для каждого класса коллекторов может быть определена с помощью линейной регрессии газонасыщенности по пористости на основе результатов лабораторных определений.

Для определения объема пород, содержащих залежь газа, необходимо решить задачу математического описания граничных поверхностей. При наличии математического описания объем может быть подсчитан методом статистических испытаний (Монте-Карло), согласно которому

$$V = \frac{n \cdot V_n}{N} , \qquad (16)$$

где V_n - известный объем, включающий искомый; N - общее число испытаний; n - число попаданий в искомый объем.

Существуют надежные генераторы случайных чисел, входящие в стандартное математическое обеспечение ЭВМ, обеспечивающее достаточно длинный ряд независимых испытаний. Метод позволяет определить отношение n/N с любой наперед заданной точностью и достаточно быстро.

Для аппроксимации многомерных поверхностей предлагается два метода:

I) экспоненциальных разложений [4]:

$$Z(x, y) = \min_i (H, \varphi(x, y, x_i, y_i)) ,$$

где

$$\varphi(x, y) = H - (H - Z_i)\exp(- \frac{|x - x_i|}{\sigma x} - \frac{|y - y_i|}{\sigma y});$$

$i = 1 \div N$; (x_i, y_i) - координаты на дневной поверхности; $Z_i = Z(x_i, y_i)$ - отметка границы стратиграфического подразделения;

2) функциональных разложений:

$$Z(x, y) = \min_i (H, \varphi(x, y, x_i, y_i)) ,$$

где

$$\varphi(x, y) = Z_i + \frac{(x - x_i)^2}{\sigma x} + \frac{(y - y_i)^2}{\sigma y} .$$

Предлагаемый машинный способ счета запасов природного газа базируется на принципиально иной основе, чем общепринятый. В основе метода - построение геологической модели изучаемой среды в виде информационной системы. В качестве модели данных реализована реляционная модель [5]. Этот подход выбран из тех соображений, что в основном данные для информационной модели представлены в виде таблицы "объекты-координаты-свойства". Связи между таблицами могут осуществляться как пространственные "по координатам", так и временные "по стратиграфической колонке". Таким образом, появляется возможность использовать преимущества реляционного подхода - представление данных в единой унифицированной форме.

Созданная в ЯФ СО АН ЦИПС для подсчета запасов природного газа в терригенных поровых коллекторах верхнего палеозоя и мезозоя Вилюйской синеклизы включает:

- сводку эмпирических данных лабораторных определений емкостных свойств пород;
- алгоритм и программу построения моделей-сверток, физических свойств пород;
- алгоритм и программу прогнозирования распределения пористости в заданном объеме пород;
- алгоритмы и программы аппроксимации многомерных поверхностей (математическое описание и графическое изображение границ геологических тел) расчета объемов исследуемых геологических тел и регрессионного анализа.

Преимущество предлагаемого машинного счета запасов состоит в:

- быстрой реализации нескольких различных вариантов, включая вариант расчета по максимуму и минимуму,
- повышении степени надежности оценки запасов на поисковой стадии,
- возможности создания обобщенной модели процесса поисковой разведки с использованием математических методов.

Основным отличием предлагаемого способа счета запасов от общепринятого является то, что запасы считаются не по "эффективным" толщинам, а по объему всего геологического тела, содержащего полезное ископаемое. Поэтому разведка, имеющая целью подсчет геологических запасов, должна строиться не на прослеживании случайно расположенных пластов и линз, которые выделяются по формальным (экономическим) признакам (граница коллектор-неколлектор, минимально рентабельный дебит), а на выявлении и оконтуривании естественных геологических тел. Эта задача является более простой и, следовательно, проще может быть формализована.

Количество газонасыщенных пластов-коллекторов в геологических телах устанавливается автоматически на основе закона распределения открытой пористости, характеризующего исследуемый литолого-стратиграфический интервал.

В области оптимизации процесса разведки актуальным является его деление на стадии:

I) поисковой разведки, основной целью которой должен стать подсчет геологических запасов. Используя предлагаемый способ, геолого-разведочные организации могут производить экономическую оценку - подсчет запасов для определения целесообразности ввода месторождения в разработку с гораздо меньшей затратой труда и средств;

2) эксплуатационной разведки, основной целью которой должен являться выбор способа разработки МПИ, обеспечивающего максимальное извлечение полезного ископаемого из недр, т.е. подсчет извлекаемых запасов.

Стадия эксплуатационной разведки в сложно построенных регионах должна осуществляться после стадии детальных геофизических исследований, цель которых - обеспечить наиболее рациональное размещение эксплуатационных скважин.

Целесообразность проведения стадии детальных геофизических исследований определяется в стадии поисковой разведки.

Л и т е р а т у р а

I. Богданов С.Д., Гаттенбергер Ю.П., Махтаренц С.О. Геологическое моделирование строения терригенных нефтеносных горизонтов. - Нефтегазовая геология и геофизика, 1979, № 6, с.18-20.

2. Воронин Ю.А., Мукимов Р.А. Общие вопросы применения математических методов и ЭВМ при подсчете запасов полезных ископаемых. - В кн.: Применение математических методов и ЭВМ при решении типовых геологических задач. Новосибирск, 1976, с.44-62.

3. Граусман А.А. Закономерности изменения пороговых коллекторов при погружении (модель гравитационного уплотнения). - Якутск: Изд. ЯФ СО АН СССР, 1984.
4. Чистяков М.Г., Мельцер М.Л. Метод аппроксимации данных при помощи экспоненциальных разложений. - Информационный сборник БНТИ: "Методы и алгоритмы прикладной математики". Якутск, 1982, с.17-19.
5. Дейт К. Введение в системы баз данных.- М.: Наука, 1980.
6. Латышева М.Г., Дьяконова Т.Ф. Оценка достоверности геолого-геофизической информации при подсчете запасов нефти и газа. - Геология нефти и газа, 1979, № 10, с.30-36.

Н.Г.Горелова, В.Е.Хиценко, В.П.Хиценко

ОЦЕНКА СУЖДЕНИЙ ЭКСПЕРТОВ В ЭКСПЕРТНЫХ СИСТЕМАХ

Анализ задачи

В настоящей статье рассматриваются вопросы, связанные с получением, верификацией и осмыслением информации, полученной от экспертов в процессе формирования базы знаний экспертной системы. Идея состоит в том, что мало "вытянуть" данные от эксперта [I], надо уметь оценить качество этих данных, понять, какими свойствами они обладают и каким путем получены, можно ли доверять им и строить на них все последующие выводы.

Современные автоматизированные системы в геологии, медицине и других слабоформализованных областях знаний часто называют экспертными системами (ЭС), предполагая, что ЭВМ не просто реализует некоторый конкретный алгоритм решения конкретной задачи, но участвует в решении, начиная с определения конкретной цели исследования некоторого множества объектов, предлагает постановку задачи, "сама" выбирает наилучшие пути решения, может анализировать результат и при неудовлетворительной оценке возвращаться к этапу постановки задачи. При этом на всех этапах происходит активное общение системы с пользователем: как пользователь может "затребовать" у системы интересующую его информацию относительно "подобных" случаев или некоторых смежных знаний и т.п., так и система может просить ответить на некоторые конкретные вопросы или рекомендовать необходимые дополнительные исследования. Таким образом, современные автоматизированные системы выступают не только как исполнители, но и как некоторые "сверхэксперты" - советчики. Такой режим работы системы называют режимом использования знаний. Но, очевидно, определяющим является режим приобретения знаний системой, который состоит в извлечении знаний у эксперта-человека, их ясном выражении, формализации, приведении к определенной структуре, принятой в данной системе [1].

Если в режиме использования от ЭС требуется умение объяснять свои выводы, накапливать данные и аккумулировать свой предыдущий опыт, то тем более эти функции должны быть присущи ЭС в режиме приобретения знаний. Зафиксируем их более четко: объяснительная функция - возможность системы указать весь ход решения, приведший к данному результату; функция накопления - любые новые данные об объекте, его свойствах и связях должны органично вписываться в структуру системы, не вызывая принципиальных изменений; функция обучения - система должна уметь анализировать предыдущий опыт, внося необходимые изменения и дополнения как в знания о самих объектах, так и, возможно, в постановки, способы решения, оценку результатов.

Формализация задачи

Вообще говоря, приобретение знаний происходит различными путями: распознаванием образов, классификацией, многомерным шкалированием и другими способами анализа данных. Применительно к процессу приобретения знаний в экспертных системах выделим следующую конкретную схему.

Имеем исследуемое множество m объектов A. Каждый объект $a \in A$ характеризуется набором признаков $x = (x_1, x_2, \ldots, x_p)$ и представляет собой точку в p-мерном пространстве наблюдений X, в общем случае неевклидовом. Будем рассматривать две фазы наблюдений множества A. Назовем условно изучение множества A в момент T_1 наблюдением до действия над объектами, а в момент T_2 - после действия. Понятно, что на разных фазах наблюдений нам доступны различные наборы свойств, характеристик, признаков объектов [2].

Например, в геологоразведке информация о месторождениях в момент T_1 - это все характеристики месторождения после разведки до эксплуатации, в момент T_2 - уточненный и расширенный набор характеристик после эксплуатации. В медицине информация о больном до лечения в момент T_1 и после лечения в момент T_2, естественно, может быть различной. В задачах производственнотехнического характера информация в момент T_1 - это условия изготовления и показатели качества изделия до эксплуатации, информация в момент T_2 - это данные, полученные в результате эксплуатации, например, надежность, эффективность.

Таким образом, в момент T_1 нам доступна только часть набора признаков объекта $x^1 = (x_1, \ldots, x_n)$, а после действия над объектом (в момент T_2) появляются новые данные: $x^2 = (x_{n+1}, \ldots$ $\ldots, x_p)$. Например, геологи-эксперты утверждают запасы полезного ископаемого в месторождениях и выбирают технологии добычи. Врачи-эксперты устанавливают диагноз больного и назначают ему лечение. Контролеры-эксперты отбраковывают и сортируют изделия, выявляя недостатки технологии, рекомендуют режим эксплуатации (см. таблицу).

Различные процедуры получения знаний, в том числе и интересующие нас, в первую очередь, экспертные процедуры, могут быть описаны моделью автоматической классификации, изложенной в [3] и в предисловии к русскому переводу [4]. В этой модели выделяется множество состояний $S(A)$, в которых может находиться множество объектов A на разных стадиях исследования, причем каждый элемент $s \in S(A)$ есть отображение множества A в множество значений классификаций Z, т.е. $S = \{s: A \to Z\}$ представляют собой набор способов классификации. Состав и структура Z определяют тип решаемой задачи при исследовании множества объектов A. Например, если Z - упорядоченное множество вида $Z = [1, 2, \ldots, m]$, то S совпадает с множеством способов строгого ранжирования объектов по предпочтительности. Для формального описания процесса получения знаний модель дополняется следующими компонентами: $P(A)$ - множество выделенных конечных подмножеств в A, т.е. наборов, порций, в которых объекты поступают для исследования, например, для проверки компетентности экспертов. В частности, $P(A)$ может представлять собой часть множества пар объектов из A, выбираемых для реализации парных сравнений в соответствии с планом экспертизы.

$L(A)$ - множество описаний совокупности A, которые могут быть получены в результате классификации, т.е. L - это подмножество в множестве всех отображений $Z \to Y$, где Y - множество значений, в терминах которых выражается результат исследо-

Знания до действия над объектом, момент времени T_1		Знания после действия над объектом, момент времени T_2
Получение различных характеристик x, R	Прогнозная оценка объекта, выбор способа действия над ним Q, w	Окончательная оценка объекта V
	В геологоразведке:	
различные характеристики месторождения, полученные в результате разведки	прогнозный запас, способ разработки, планируемые средства	добытый запас, затраченные средства
	В медицине:	
различные характеристики больного	предварительный диагноз, способ лечения	окончательный диагноз
	В технике:	
различные характеристики детали	отбраковка и сортировка	длительность и успешность эксплуатации

вания (классификации). Например, если все признаки объекта числовые и $A \subset R^p$, $Z = [1,\dots,K]$ есть список номеров классов и каждый класс описывается выборочным средним, то $Y = R^p$ и

$$L(A) = \{Z \to Y\} = R^p \times \dots \times R^p.$$

Для описания процесса проведения и обработки данных экспертизы вводятся следующие операторы:

K - оператор из $S \times L \times P \to S$, называемый классификатором, поскольку он определяет, как из предыдущего состояния s_t с описанием l_t перейти в новое состояние s_{t+1} при поступлении новой порции $p_{t+1} \subset A$, т.е. $s_{t+1} = K(s_t, l_t, p_{t+1})$.

G - оператор из $P \times S \times L \times N \to P$, называемый генератором порций, $p_{t+1} = G(p_t, s_t, l_t, t)$, $t \in N$.

D - оператор из $S \times L \to L$, называемый дескриптором, вырабатывающий новое лучшее описание l_{t+1} на основании достигнутого состояния s_{t+1} и предыдущего описания l_t, т.е. $l_{t+1} = D(l_t, s_{t+1})$.

Таким образом, модель взаимодействия экспертов с ЭС есть набор

$$(A,\ P(A),\ S(A),\ L(A);\ K,\ D,\ G),$$

описывающий алгоритм накопления знаний, учитывающий способы проведения экспертизы, проверку качества экспертных данных и обработку данных.

Как уже отмечалось выше, точность и обоснованность экспертного оценивания объектов и рекомендаций экспертов W относительно способа действия в момент T_1 могут быть проверены лишь в момент T_2, после апробации. Обозначим Q_1 множество возможных значений предварительных оценок объекта, которые назначает эксперт или экспертная группа в момент T_1. Это может быть множество рангов, баллов, сортов, прогнозов. Причем, в отличие от множества Z, элементами Q_1 могут быть наборы оценок, например, вероятности принадлежности месторождения к различным классам, прогноз мощности месторождения и т.д.

Предложенный экспертами способ воздействия w на объект определяется в общем случае оценкой этого объекта $q_1 \in Q_1$ и его характеристиками x^1. Таким образом, оператор из $X^1 \times Q_1 \to W$, раскрытие которого есть объяснительная функция. После действия над объектом появляется новая информация $x^2 \in X^2$ и накопительная функция системы есть оператор из $W \times Q_1 \times X \to Q_2$, т.е. получение окончательной оценки объекта $q_2 \in Q_2$ на основе накопления данных $X^1 \times X^2 = X$, предварительной оценки $q_1 \in Q_1$ и способа действия $w \in W$.

Рассмотрим основные проблемы использования экспертов на разных стадиях получения знаний в экспертных системах.

В и д ы э к с п е р т н ы х о ц е н о к. Наиболее распространенные виды экспертных оценок следующие: п а р н а я - когда эксперту предъявляют пару объектов и просят указать, являются ли они равноценными, и если нет, то назвать более предпочтительный, а возможно, и указать меру сходства, т.е. метризовать X^1; б а л л ь н а я - когда эксперт каждому объекту приписывает некоторый балл из заранее оговоренного диапазона; р а н г о в а я - когда все предъявляемое множество объектов упорядочивается по предпочтению, а также некоторые известные задачи классификации, осуществляемые с помощью экспертов.

Т и п ы э к с п е р т и з. Экспертная оценка может проводиться одним человеком (в таком случае стоит вопрос только о выборе вида оценок) или группой экспертов (тогда необходимо выбрать план, по которому будет проводиться экспертиза). Среди многочисленных предложенных планов наиболее практикуемые: метод "Дельфи", метод "мозговой атаки", анкетирование, "дискуссии за круглым столом" и другие [5]. В своих исследованиях мы отдаем предпочтение 2-шаговой информационной процедуре [5], которая состоит в следующем: группе экспертов предлагается оценить объекты по одному из видов оценки.

Первый шаг. Каждый эксперт оценивает объекты независимо, не обладая никакой дополнительной информацией, но давая элементарные объяснения, в силу каких свойств объектов и своих представлений о важности этих свойств для целей экспертизы он дает такие оценки.

Второй шаг. Руководитель экспертизы готовит сводку из объяснений экспертов, и каждый эксперт перед повторной оценкой объектов знакомится с этой сводкой.

Вообще говоря, информационная процедура может потребовать больше двух шагов для сходимости оценок экспертов [5], но проведение экспертизы - всегда сложная задача еще и с психологической точки зрения (только в последние годы экспертиза начинает проводиться как организованная научная процедура), поэтому мы ограничиваемся двумя шагами.

Оценка компетентности экспертов. При проведении экспертизы центральным является вопрос оценки экспертного суждения. Разрабатывая эталоны или проводя искусственные эксперименты, необходимо привлекать "внешние" оценки. Если внешних оценок получить не удается, требуется в результате экспертизы получать избыточные данные для "внутренней" оценки экспертов.

Ю.А.Воронин предложил пять показателей для оценки компетентности экспертов: I - непротиворечивость суждений, 2 - тонкость, 3 - устойчивость, 4 - простота, 5 - адаптируемость.

Поясним смысл и способы измерения каждого из показателей.

Непротиворечивость. Это, бесспорно, важнейший показатель компетентности. Нарушение транзитивности в отношении порядка на множестве объектов свидетельствует о противоречии в суждениях и может быть выявлено в методе парных сравнений. Известны распределения некоторых статистик, связанных с количеством нарушений транзитивности [6]; таким образом, можно получить меру непротиворечивости, допускающую строгую проверку гипотез.

Вместе с тем можно допустить существование в множестве объектов A подмножества A_0, элементы которого настолько близки по степени проявления свойств x^1, что эксперты устанавливают на них отношение порядка скорее под давлением экспертной процедуры, чем по внутренней убежденности. Способ учета этого обстоятельства с целью повышения объективности измерения непротиворечивости подробно рассмотрен в [7].

На некотором подмножестве $A' \subset A$ с целью получения избыточной информации все эксперты группы проводят три вида оценивания: П - парное, Р - ранговое и Б - балльное. Обозначим отношение между объектами a_i и a_j через +I, если a_i предпочтительнее a_j, через 0, если a_i и a_j равноценны, через -I, если a_j предпочтительнее a_i. Можно придавать разный вес оценкам

П, Р и Б, например, считается, что эксперту легче всего указать предпочтение на паре объектов. Рассмотрим случай, когда оценки по всем видам для нас равноценны, тогда возможны следующие соотношения между оценками П, Р, Б:

I – все три совпадения (+I, +I, +I и подобные),

2 – два совпадения предпочтений и нуль (+I, +I, 0 и подобные),

3 – два нуля и предпочтение (0, 0, +I и подобные),

4 – два совпадения предпочтений и противоположное отношение (+I, +I, –I),

5 – противоположные отношения и нуль (+I, –I, 0).

Каждому варианту отношений предпочтения припишем цену c_l, $l = 1,\dots,5$. Оценки типа I–3 будем считать согласованными, 4 и 5 – несогласованными. В случае разного веса оценок по П, Р, Б строим полную классификацию перечисления всех вариантов и каждому назначаем свою цену. Тогда мера непротиворечивости эксперта будет функцией от общего числа несогласованных взвешенных оценок по всем парам. Считаем, что несогласованная оценка вызвана объективными обстоятельствами, т.е. очень большим сходством объектов, если эта несогласованность есть не только у одного эксперта. И чем большее число экспертов дают несогласованную оценку относительно данной пары, тем меньше она должна влиять на оценку компетентности эксперта. Пусть μ – мера непротиворечивости эксперта по нескольким видам оценок:

$$\mu = 1 - \frac{2}{n(n-1)} \sum_i \sum_j \frac{c_{ij}}{k_{ij}^{\alpha} + 1}, \quad n \le m,$$

где c_{ij} – цена варианта отношений предпочтения между объектами a_i и a_j по П, Р, Б; k_{ij} – число экспертов, дающих несогласованную оценку по паре a_i, a_j; $\alpha \ge 0$ – параметр, регулирующий влияние показателя k_{ij}. Цены согласованных оценок должны быть равными 0, цена несогласованной оценки не должна превышать I. В простейшем случае, когда все цены несогласованных оценок одинаковы и равны, $c_{ij} = 1$, а $\alpha = 0$, μ есть мера Кендэла-Кемени. Следовательно, общие свойства у них совпадают: $0 \le \mu \le 1$, $\mu = 1$, когда все оценки эксперта согласованны ,

$\mu = 0$, когда все оценки несогласованны только у данного эксперта, а c_{ij} – максимальны и равны I. Если у всех M экспертов все оценки несогласованны, $\mu = 1 - \frac{1}{M^{\alpha} + 1}$ и, следовательно, при больших M близки к I. При $0 < \alpha < 1$ зависимость компетентности μ от показателя k_{ij} слабая, при росте α эта зависимость усиливается, так что противоречивые оценки эксперта относительно пары объектов, "путаемых" достаточно большим числом экспертов,практически не влияют на оценку его компетентности.

Если количество исследуемых объектов и сложность экспертизы не позволяют исследовать всю совокупность A при проверке непротиворечивости, встает вопрос о представительности выборки A' для данной задачи, о выборе с помощью оператора G серии подмножеств, возможно пересекающихся, для последовательного анализа непротиворечивости.

Т о н к о с т ь. Побочным результатом проверки непротиворечивости экспертов является выделение подмножества A_0 близких объектов и в случае метрического пространства X^1-диаметра этого подмножества A_0. Последнее естественно предполагает наличие меры сходства объектов. Не касаясь вопросов построения такой меры, укажем, что серия дополнительных экспертиз на множестве A_0 позволит дать оценку тонкости восприятия объектов каждого эксперта в виде максимального значения меры сходства неразличаемых им объектов. При отсутствии меры сходства возможен сравнительный анализ экспертов по тонкости (чувствительности) восприятия.

У с т о й ч и в о с т ь с у ж д е н и й э к с п е р т а. Этот оттенок компетентности эксперта заключается в стабильности, повторяемости его результатов на одном и том же подмножестве объектов, а также в убежденности эксперта в правильности своих оценок. Если исключить запоминание объектов трудно, следует брать различные, но пересекающиеся подмножества $A_i \subset A$, $i = 1,\dots,k$. В ходе повторения экспертной процедуры необходимо познакомить эксперта с некоторыми искусственными результатами оценивания тех же объектов или с результатами его коллег, соблюдая при этом анонимность.

В итоге на пересечении $\bigcap_{i=1}^{k} A_i$ мы получим k в общем случае различных отношений, соответствующих принятой процедуре экспертного оценивания. Степень близости этих отношений между собой характеризует устойчивость суждений эксперта. Выбор числа повторений К связан с трудоемкостью проведения экспертизы. Особую проблему представляет отбор объектов в подмножество $\bigcap_{i=1}^{k} A_i$. Очевидно только, что туда не следует включать объекты с аномальными, запоминающимися признаками. Напомним, что такой отбор осуществляется оператором G.

Простота суждений экспертов. Это качество экспертных суждений тесно связано со способностью эксперта объяснять свои выводы. От эксперта можно потребовать объяснить свои оценки, в явном виде указав, каким значениям свойств объектов или их сочетаниям и почему он отдает предпочтение с точки зрения заданной целевой установки. Иногда эксперт справляется с этой задачей легко, иногда затрудняется, а иногда при проверке его объяснения не соответствуют установленному им отношению. Например, пусть совместными усилиями экспертов и организатора экспертизы выработан общий список свойств $x_1, x_2, \ldots, x_n$, которые считаются важными в данном контексте. Как правило, эксперту трудно указать веса, с которыми он учитывает каждое свойство, вынося свое решение о предпочтении, в лучшем случае он задает квазипорядок на множестве свойств. У экспертов может совпадать порядок предпочтения на свойствах (во всяком случае его можно добиться взаимным обменом информацией), но веса могут быть у каждого свои. Выдвигается гипотеза о том, что предпочтения экспертов на объектах есть функция от предпочтений экспертов по отдельным подтвержденным ими свойствам, взятым каждый со своим весом. Составляются частные ранжировки объектов по каждому свойству:

$$p_{x_1} = (a_{11} \geq a_{12} \geq \ldots \geq a_{1n}),$$

$$p_{x_2} = (a_{21} \geq a_{22} \geq \ldots \geq a_{2n}),$$

$$\vdots \qquad\qquad\qquad \vdots$$

$$\vdots \qquad\qquad\qquad \vdots$$

$$p_{xn} = (a_{n1} \geq a_{n2} \geq \ldots \geq a_{nn}).$$

Для каждой ранжировки p_k эксперта k

$$p_k = (a_1^k \geq a_2^k \geq \ldots \geq a_n^k)$$

предлагается найти правило Φ_k как функцию от переменных $x_1, \ldots, x_n$, такое, что ранжировка объектов по правилу Φ_k будет совпадать или минимально отличаться от ранжировки p_k. Подобные постановки задач рассматриваются в неметрическом многомерном шкалировании [8]; один из алгоритмов лексикографического упорядочения свойств предложен в [9], частный эвристический метод учета всех несогласованных предпочтений и подбор для них весов намечен в [7].

Если можно подобрать достаточно простое правило (т.е. лексикографические или линейно-взвешивающее), говорим о том, что эксперт пользуется простым правилом в своих выводах предпочтений. Следовательно, можно записать его выводы в виде функций или алгоритмов и, таким образом, давать объяснения полученным заключениям. Если этого сделать нельзя, т.е. эксперт использует некоторую дополнительную информацию, которую от него в явном виде получить не удается, говорим, что эксперт пользуется сложными правилами вывода. В таких случаях, по нашему мнению, следует привлекать не сложный математический аппарат для непременного поиска громоздкого или приближенного правила, а продумать новые тесты с экспертом, чтобы выяснить дополнительные источники его информации, т.е. предполагаем, что неудача с поисками правила, объясняющего суждения эксперта, связана не с его сложностью, а с тем, что эксперт декларирует одни принципы, а принимает решение по другим. Недаром экспертные исследования сейчас находятся под пристальным вниманием психологов [10].

Адаптируемость суждений экспертов. Под адаптируемостью понимаем способность эксперта изменять свои суждения под влиянием дополнительной, безусловно объективной, информации. На первый взгляд этот показатель кажется противоположным устойчивости, на самом же деле эти показатели строятся на различных тестах. Для определения устойчивости суждений эксперта вся необходимая информация сообщается ему сразу, на последующих повторениях он знакомится фактически не с новой информацией, а с точкой зрения своих коллег по экспертизе. При проверке адаптируемости экспертов часть важной информации намеренно "утаивается" на первом шаге и сообщается эксперту впоследствии. Важно определить, как изменяет эксперт свои предпочтения под влиянием новой информации. Тесты на адаптируемость должны быть тщательно продуманы руководителем экспертизы, потому что лишь в том случае, если заранее понятно, как должен эксперт изменить свои предпочтения, если он использует вновь поступившую информацию, можно говорить о введении количественных показателей адаптируемости. Понятно, однако, что эти показатели будут строиться в виде некоторой комбинации меры близости последнего отношения эксперта к желаемому и мер близости отношений на разных этапах адаптации.

Заключение

Применительно к конкретной области использования устройство связи ЭС с экспертами будет реализовывать различные наборы функций, определяемых спецификой конкретных задач и трудоемкостью экспертного оценивания. Каждый из затронутых вопросов и способов оценки различных оттенков компетентности требует специальных исследований и экспериментальной проверки и лишь после этого может быть предложен для практического применения.

После контроля компетентности экспертов можно переходить к экспертизе на всем множестве объектов A, вырабатывать на ее основе оценки q_1 и способы воздействия w. В момент T_2 после действия на объекты получаем дополнительные данные x^2 и верифицированные оценки q_2. При этом появляется возможность проверить не только правильность предварительных выводов w на основе экспертных оценок q_1, не только сами оценки, но и объективность используемых процедур проверки компетентности. В построении обратных связей, позволяющих корректировать методы проверки, обработки и осмысления экспертной информации мы видим реализацию функции обучения в ЭС.

Литература

I. Bonnet A. Les systemes experts en intelligence artificielle. - RAIRO, 1981, vol. 15, N 4, p. 325-339.

2. Воронин Ю.А. Подготовка воздействий на объекты - новый класс эвристических задач: Препринт № 365. - Новосибирск, 1982. - I7 с. - В надзаг.: ВЦ СО АН СССР.

3. Бухштабер В.М., Маслов В.К., Зеленюк Е.А. Методы построения алгоритмов эталонного типа в задачах автоматической классификации. - В кн.: Машинные методы обнаружения закономерностей (Вычислительные системы, вып.88). Новосибирск, 198I, с. 65-79.

4. Методы анализа данных. Подход, основанный на методе динамических сгущений.-М.: Финансы и статистика, 1985.

5. Панкова Л.А., Петровский А.М., Шнейдерман М.В. Организация экспертизы и анализ экспертной информации. - М.: Наука, 1984.

6. Дэвид Г. Метод парных сравнений. - М.: Статистика, 1978.

7. Горелова Н.Г., Хиценко В.Е., Хиценко В.П. К оценке компетентности экспертов. - В сб.: Структура и анализ данных. Новосибирск, 1985, с. 40-48.

8. Каменский В.С. Методы и модели неметрического многомерного шкалирования (обзор). - Автоматика и телемеханика, 1977, № 8, с. II8-I56.

9. Воронин Ю.А., Еганова И.А., Еганов Э.А. К проблеме упорядочения объектов. - В сб.: Применение математических методов и ЭВМ при поиске полезных ископаемых. Новосибирск, 1974, с. II9-I64.

IO. Фрумкина Р.М. О некоторых особенностях экспертного мышления. - В сб.: Вопросы кибернетики. Экспертные оценки. 1979, вып. 58, с. I63-I72.

Д.З.Гафуров

НЕКОТОРЫЕ ВОПРОСЫ ЗАДАЧ RF-РАСПОЗНАВАНИЯ ОБРАЗОВ

Введение

Многолетнее приложение теории и методологии задач распознавания образов к различным областям хотя и не дало существенный практический выигрыш, но, тем не менее, позволило, с одной стороны, изменить сложившуюся точку зрения на сущность проблемы распознавания образов, с другой - поставить ряд новых и интересных задач, обобщающих известные. Одним из таких обобщений является задача RF-распознавания образов, возникшая в результате приложения теории и методологии задач распознавания образов в геологоразведке.

Традиционная задача распознавания образов, являющаяся по существу дальнейшим развитием теории статистических решений, оказалась неадекватной математической моделью для задач, в которых рассматриваются "пространственные" объекты, т.е. объекты $a \in A$ помимо вектора косвенных свойств $F(a)$ описываются еще вектором положения $R(a)$.

Обычно в таких случаях приспосабливают данную содержательную задачу к задаче распознавания образов путем отбрасывания $R(a)$. Многочисленные экспериментальные данные убедительно показывают [I-4], что в большинстве случаев это равноценно "выплескиванию воды вместе с ребенком".

Данную работу можно рассматривать как дальнейшее развитие работ [I, 5-I2].

I. Определения основных понятий

I.I. Пусть A есть некоторое множество. Тогда через $|A|$ обозначим число его элементов. Семейство непустых подмножеств.

множества A обозначим через $P(A)$. Если B есть подмножество множества A, состоящее из k элементов $a_1, \ldots, a_k$, то назовем B k-подмножеством множества A. Термины k-множество, k-подсемейство и k-семейство имеют аналогичный смысл. Через $P_k(A)$ обозначим семейство k-подмножеств множества A. Запись $\binom{n}{k}$ означает число сочетаний из n элементов по k. Тогда $P_k(A)$ есть $\binom{|A|}{k}$-подсемейство семейства $P(A)$. Через E обозначим множество вещественных чисел, а через N – множество натуральных. Множество индексов (номеров) J есть некоторое n-подмножество множества N. Если $\mathcal{A}$ есть n-семейство $(A_1, \ldots, A_n)$, то записи $(A : A \in \mathcal{A})$ и $(A_j : j \in J)$ для нас означают одно и то же семейство $\mathcal{A}$. Объединение, пересечение и прямое произведение элементов $\mathcal{A}$ будем обозначать через $\omega(A : A \in \mathcal{A})$ или $\omega(A_j : j \in J)$, где ω – одна из операций в множестве $(\cup, \cap, \times)$ соответственно. В том случае, когда $\mathcal{A}$ есть семейство n одинаковых множеств, множество $\times(A : A \in \mathcal{A})$ назовем n-й степенью множества A и обозначим его через A^n. Если $S \subseteq E^n$, то через $m(S)$ обозначим n-мерную меру множества S. Напомним, что при $n = 1,2,3$, под $m(S)$ будем понимать длину, площадь и объем множества S соответственно. Пустое множество обозначим через нуль.

Если $\mathcal{R}$ есть разбиение множества A на k частей, то будем говорить, что $\mathcal{R}$ является k-разбиением множества A. Если $\mathcal{P}$ – k-семейство, которое является некоторым покрытием множества A, то будем говорить, что $\mathcal{P}$ есть k-покрытие множества A.

Если f есть функция с областью определения A и с областью значения E, то в записях f, $f(a)$, $f(A)$ и (f, A, E) символ f употребляется в разных смыслах:

I) f – закон, согласно которому множество A отображается в множество E, т.е. $f : A \to E$;

2) $f(a)$ – значение функции f на объекте a, где $a \in A$ и $f(a) \in E$;

3) $f(A)$ – множество значений функции f на элементах $a \in A$, т.е. $f(A) = \bigcup_{a \in A} f(a)$ и $f(A) \subseteq E$;

4) (f, A, E) – упорядоченный набор из трех элементов, где

A и E – множества, а f – некоторое подмножество множества упорядоченных пар $A \times E$.

I.2. Пусть $J = (1,\ldots,n)$ есть n-множество индексов, где $n \geq 1$ и $T_1,\ldots, T_n$ – некоторые отношения местностей $k_1,\ldots,k_n$ соответственно на множестве A, т.е. $T_j \subseteq A^{k_j}$, где $j \in J$ и $k_j \in N$.

Определение I. Отношения T_i и T_j местностей k_i и k_j соответственно назовем однотипными, если $k_i = k_j$ и они удовлетворяют одному и тому же множеству аксиом.

Определение 2. Упорядоченный набор из $n + 1$ элементов $(A, T_1,\ldots,T_n)$, где A – некоторое множество и $T_1,\ldots,T_n$ – отношения соответственно местности $k_1,\ldots,k_n$, определенных на A, назовем структурным множеством (СМ) с основой A, которое обозначим через A^c.

Будем употреблять сокращенную запись (A, V_A) для обозначения СМ A^c, где $V_A = (T_1,\ldots,T_n)$.

Определение 3. Два СМ A^c и B^c, где $A^c = (A,V_A)$ и $B^c = (B, V_B)$, назовем однотипными, если:

I) $|V_A| = |V_B| = n$,

2) для каждого $j \in J$ местностей k'_j и k''_j отношений $T'_j \in V_A$ и $T''_j \in V_B$ совпадают.

При этом упорядоченный набор из n чисел $(k_1,\ldots,k_n)$ назовем типом СМ A^c, где k_j – местность соответствующего отношения $T_j \in V_A$.

Пример I. Пусть $A^c = (A, T'_1)$ и $B^c = (B, T''_1)$, где

T'_1 – бинарное отношение эквивалентности на A,

T''_1 – бинарное отношение квазипорядка на B.

Тогда A^c и B^c будут иметь одинаковый тип (2).

Определение 4. Два СМ $A^c = (A, T'_1,\ldots,T'_n)$ и $B^c = (B, T''_1,\ldots,T''_n)$ одного и того же типа $(k_1,\ldots,k_n)$ назовем I-подобными, где $I \subseteq J$, если для каждого $i \in I$ отношения T'_i и T''_i являются однотипными.

Пример 2. Пусть $A^c = (A, T'_1, T'_2, T'_3)$ и $B^c = (B, T''_1, T''_2, T''_3)$, где

T'_1 – бинарное отношение эквивалентности,

T'_2 – бинарное отношение толерантности,

T'_3 - бинарное отношение квазипорядка,

T''_1 - бинарное отношение неотличимости,

T''_2 - бинарное отношение сходства,

T''_3 - унарное отношение принадлежности.

СМ A^c и B^c имеют тип (2,2,2) и (2,2,I) соответственно. Следовательно, они не однотипны. Но они являются I-подобными, где I = (1,2), т.е. отношения T'_1 и T''_1, T'_2 и T''_2 попарно - одного типа. Очевидно, что A^c и B^c являются I-подобными и при I = (1) и I = (2).

Определение 5. Два СМ A^c и B^c одного типа назовем гомоморфными, если существует однозначное отображение $f:A \to B$ такое, что для каждого $j \in J$ и любого подмножества $(a_{j_1},\ldots,a_{j_m})$ множества A отношение $T'_j(a_1,\ldots,a_m)$ имеет место тогда и только тогда, когда присутствует отношение $T''_j(f(a_{j_1}),\ldots,f(a_{j_m}))$.

Отсюда следует, что если СМ A^c и B^c гомоморфные, то они являются J-подобными, где $A^c = (A,\ V_A)$, $B^c = (B,\ V_B)$, $J = (1,\ldots,n)$ и $|V_A| = |V_B| = n$.

I.3. СМ называют числовым структурным множеством (ЧСМ), если его основа есть некоторое непустое подмножество множества E. Далее ЧСМ обозначим через E^c_*, где $E_* \subseteq E$.

Определение 6. Шкалой назовем упорядоченный набор из трех элементов $(A^c,\ E^c_*,\ f)$, где

A^c - СМ с основой A,

E^c_* - ЧСМ с основой E_*, $E_* \subseteq E$,

$f:A \to E_*$ - однозначное отображение A в E_*, при котором A^c и E^c_* являются гомоморфными.

Это определение шкалы, которое считается достаточно установившимся в теории измерения, взято из работы [I3].

Определение 7. Отображение $f:A \to E_*$, при котором два СМ $A^c = (A,\ V_A)$ и $E^c_* = (E_*,\ V_E)$ одного типа $(k_1,\ldots$ $\ldots,k_n)$ образуют некоторую шкалу, назовем свойством для объектов $a \in A$. Причем f(a) будет значением данного свойства f на объекте a.

Таким образом, если f есть свойство, то это нечто большее, чем просто однозначная функция $(f,\ A,\ E_*)$. Но в тех случаях, когда шкала измерения данного свойства f не известна или не важна для рассматриваемой задачи, будем отождествлять его с одноместной однозначной функцией (f, A, E_*).

Следуя работе [13], будем говорить, что шкала (A^c, E_*^c, φ) имеет тот же тип, что и (A^c, E_*^c, f), если отображения φ и f переносят одни и те же отношения из A^c в E_*^c. Содержательно тип шкалы (A^c, E_*^c, f) определяется свойствами единственности отображения $f: A \to E_*$.

П р и м е р 3. Пусть (f, A, E_*) есть свойство, измеренное в абсолютной шкале (A^c, E_*^c, f). Тогда его числовое представление $f(a)$ единственно с точностью до множества тождественных преобразований Δ, т.е. для каждого тождественного преобразования $\delta \in \Delta$ и любых $a \in A$ имеет место равенство $f(a) = \delta[f(a)]$.

При этом говорят, что Δ является множеством допустимых преобразований для данной абсолютной шкалы. В таком же смысле будем считать, что единственна шкала интервалов с точностью до невырожденных линейных преобразований, или шкала порядка с точностью до монотонных преобразований, или шкала наименований с точностью до взаимно-однозначных преобразований, и т.д.

Несмотря на то, что существует бесконечное число типов шкал, которые характеризуются своими множествами допустимых преобразований, на практике используют лишь небольшое их число. Это следующие шкалы: абсолютная, интервалов, отношений, разностей, гиперпорядка, порядка, наименований. Следуя [2], перечисленные первые пять назовем сильными шкалами, а последние две - слабыми.

Интересно отметить одно важное обстоятельство: чем "сильнее" шкала, тем "уже" ее множество допустимых преобразований. Иначе говоря, если $S_а$, $S_и$, $S_о$, $S_р$, $S_г$, $S_п$, $S_н$ - множества допустимых преобразований для перечисленных выше шкал соответственно, то имеет место следующая последовательность включений:

$$S_а \subset S_и \subset S_о \subset S_р \subset S_г \subset S_п \subset S_н.$$

I.4. Определение 8. Будем говорить, что (f, A, E_*) является допустимым свойством в широком смысле (или в смысле [3]), если его значения $f(a)$, где $a \in A$, могут быть определены:

I) прибором с теорией - измеряются непосредственно прибором, чей механизм действия полностью объясняется в рамках некоторой известной теории;

2) формулой с теорией - выводятся с помощью некоторых допустимых правил через непосредственно измеряемые (т.е. с помощью первых).

Причем, это свойство является:

I) унарным - его значения $f(a)$ могут зависеть только от самих объектов $a \in A$;

2) градуированным - для него заданы правила, с помощью которых различаются их возможные значения $f(a)$ из $f(A)$;

3) просто используемым - для него заданы все различные значения, т.е. все $f(A)$, где $f(A) \subseteq E_*$;

4) делящимся - число элементов в $f(A)$ не меньше двух.

Будем говорить, что (f, A, E_*) является допустимым свойством в узком смысле, если известна его шкала измерения (A^c, E_*^c, f) и имеют место первые два условия.

Легко показать, что если f есть допустимое свойство в узком смысле, то отсюда будет следовать допустимость его и в широком смысле. Однако обратное - не верно. Следовательно, если Ψ_A есть множество свойств, допустимых в широком смысле, а Ψ - множество свойств, допустимых в узком смысле, то имеет место включение $\Psi \subseteq \Psi_A$.

Определение 9. Свойство φ из Ψ_A назовем прямым, если $\varphi \in \Psi$ и его измерение требует одного или любую комбинацию из следующих условий:

I) большой точности - либо высококвалифицированных специалистов, либо дорогостоящих специальных оборудований, либо больших капиталовложений;

2) "нереального" времени, по сравнению с жизнью человека - либо слишком малый отрезок времени, скажем, время жизни микрочастиц, либо чересчур огромное время, скажем, геологическое;

3) разрушения – либо уничтожения самого объекта, на котором производится измерение, либо разрушение окружающей среды данного объекта, где он находится.

Как следствие этих причин, прямое свойство φ всегда дает точный результат, но принципиально не может быть измерено на всем множестве объектов A.

Определение IO. Свойство f из Ψ_A назовем косвенным, если его измерение не требует выполнения ни одного из трех перечисленных выше условий для прямых свойств и всегда может быть измерено на всем множестве объектов A с незначительными затратами по сравнению с прямым.

Далее, через Φ и F обозначим соответственно множества прямых и косвенных свойств. Всегда будем полагать, что Φ и F – конечные множества. Более того, естественно положить, что $|\Phi| \ll |F|$.

Таким образом, для каждого $a \in A$ измерение $h(a)$, где $h \in \Phi \cup F$, связано с некоторыми материальными, денежными или временными затратами. Формально это приводит к необходимости введения на множестве $h(A)$ некоторой числовой меры c_h.

Определение II. Однозначную неотрицательную числовую функцию (c_h, A_h, E_h), где $h \in \Phi \cup F$, $A_h = h(A)$, $E_h \subseteq E$, определяемую как

$$c_h(a) = \begin{cases} v_a \Leftrightarrow h \in F, \\ w_a \Leftrightarrow h \in \Phi \end{cases}$$

и измеренную в шкале отношений, назовем функцией цены измерения свойства h.

Из определения множеств F и Φ следует, что $v_a \ll w_a$ для любого объекта $a \in A$ и любого свойства $f \in F$ и $\varphi \in \Phi$. Очевидно, что для любого фиксированного φ из Φ должно иметь место следующее неравенство:

$$\sum_{\substack{a \in A \\ f \in F}} c_f(a) < \sum_{a \in A} c_\varphi(a).$$

I.5. Следуя работам [2, 3, I4], множество A_0 назовем (F,Φ)-освоенным, если каждый объект $a \in A$ описан одним и тем же набором $(F(a), \Phi(a))$ допустимых свойств $F = (f_1,\ldots,f_n)$ и $\Phi = (\varphi_1,\ldots,\varphi_m)$, где $F(a) = (f_1(a),\ldots,f_n(a))$ и $\Phi(a) = (\varphi_1(a),\ldots,\varphi_m(a))$.

Заметим, что в обозначениях (F, Φ) и $(F(a), \Phi(a))$ символы F и Φ употребляются в двух разных смыслах: F и Φ – множества свойств $f_1,\ldots,f_n$ и $\varphi_1,\ldots,\varphi_m$ соответственно; $F(a)$ и $\Phi(a)$ – множество значений $f_i(a)$ и $\varphi_j(a)$ свойств $f_i \in F$ и $\varphi_j \in \Phi$ на фиксированном объекте $a \in A$.

Полагая, что порядок свойств в F и Φ зафиксирован, $F(a)$ и $\Phi(a)$ будем называть векторами косвенных и прямых свойств соответственно.

Будем говорить, что A есть F-освоенное множество, если каждый объект $a \in A$ описан вектором $F(a)$. F-освоенное множество A назовем R-освоенным, если каждый объект $a \in A$ описан еще и вектором положения $R(a)$ относительно некоторой системы координат Ξ. Для определенности далее положим, что $\Xi = (x, y, z)$ есть обычная прямоугольная система координат с осями координат x, y, z.

О п р е д е л е н и е I2. Множество R, где $R = (r_x, r_y, r_z)$ и $r_\xi : A \to E_r$ – функция, сопоставляющая каждому $a \in A$ его координату $r_\xi(a)$ относительно оси $\xi \in \Xi$, назовем множеством координатных функций.

Итак, $R(a) = (r_x(a), r_y(a), r_z(a))$ – множество значений координатных функций $r_\xi \in R$ на фиксированном объекте $a \in A$.

Очевидно, что если A_0 является Φ-освоенным множеством и A_0 – подмножество (R, F)-освоенного множества A, то A_0 является также и (R^*, F^*)-освоенным множеством, или, точнее, (R^*, F^*, Φ^*)-освоенным множеством, где R^*, F^*, Φ^* – любые непустые подмножества множества R, F и Φ соответственно.

П р и м е р 4. Пусть A_0 есть (R^*, F^*, Φ^*)-освоенное множество, где $R^* = (r_x, r_y)$, $F^* = (f)$, $\Phi^* = (\varphi)$.

Тогда каждый объект $a \in A_0$ будет описан упорядоченным набором $(r_x(a), r_y(a), f(a), \varphi(a))$.

О п р е д е л е н и е I3. Элементы Φ-освоенного множества A_0 назовем прямыми объектами, элементы F-освоенного множества $A \setminus A_0$ – косвенными.

Следует заметить, что каждый косвенный объект $a \in A \setminus A_o$ может стать прямым, как только будут измерены значения прямых свойств $\varphi \in \Phi$. Однако такие измерения не обойдутся даром – величина потерь для подобных измерений будет равна

$$\sum_{\varphi \in \Phi} c_\varphi(a) = w_a \cdot |\Phi|.$$

Для каждого $f \in F$ рассмотрим множество значений $f(a)$ свойства f при всех $a \in A$, т.е. $(f(a):a \in A)$. Обозначим это множество через $A(f)$ или A_f.

Определение I4. Множества Ω_A, Ω_R, Ω_F и Ω_Φ, где

$$\Omega_A = (A(f):f \in F), \quad \Omega_F = (F(a):a \in A),$$

$$\Omega_R = (R(a):a \in A), \quad \Omega_\Phi = (\Phi(a):a \in A),$$

назовем базисными множествами.

2. Пространства объектов и свойств

2.I. Обозначим через Ω_* некоторое множество из $(\Omega_A, \Omega_R, \Omega_F, \Omega_\Phi)$. Пусть $I = (\varepsilon : e' \leq \varepsilon \leq e'')$ – некоторое ограниченное подмножество множества E, где $e' \in E$, $e'' \in E$ и $e' < e''$. Обозначим через e один из граничных элементов I: либо e', либо e''.

Определение I5. Метрикой назовем всюду определенную двухместную числовую функцию $\mu:\Omega_*^2 \to I$, которая для любых a, b и c из Ω_* удовлетворяет следующим условиям Γ_μ:

$$\mu(a, b) = e \Leftrightarrow a = b, \tag{1}$$

$$\mu(a, b) = \mu(b, a), \tag{2}$$

$$\mu(a, b) \theta \mu(a, c) \circledast \mu(c, b), \tag{3}$$

где θ – двухместное отношение нестрогого порядка, определяемое следующим образом:

$$\theta = \begin{cases} \leq & \text{если } e = e', \\ \geq & \text{если } e = e''; \end{cases}$$

$\circledast$ - трехместное отношение на множестве I, связанное с отображением μ, которое назовем операцией на I.

Пусть $\Omega_* \in (\Omega_R, \Omega_F, \Omega_\Phi)$. При $e = e'$ назовем μ мерой расстояния, которую обозначим через ρ, при $e = e''$ назовем μ мерой сходства и обозначим через λ. Когда $\Omega_* = \Omega_A$ и $e = e''$ назовем μ мерой связи, которую обозначим через σ.

Следует заметить, что в теории множеств [I5] обычно рассматривают такие метрики, у которых в качестве множества области значений I берут множество неотрицательных вещественных чисел, а в качестве операции $\circledast$ - сложение.

Различные обобщения метрики можно получить либо расслабив одно (или любую комбинацию) из условий (I)-(3), либо удалив одно из условий (2) или (3), либо расширив область значений I, либо структурируя область определения метрики μ. Во всех этих случаях назовем μ псевдометрикой.

Определение I6. Упорядоченный набор из пяти элементов

$$(\Gamma_\mu, \Omega_*, I, e, \circledast),$$

где Γ_μ - конечное множество аксиом, которым должна удовлетворять псевдометрика μ; Ω_* - область определения псевдометрики μ; I - область значения псевдометрики μ; e - одно из граничных значений множества I, задающее порог неотличимости в множестве I; $\circledast$ - операция, связанная с μ, относительно которой формулируются аксиомы из множества Γ_μ, назовем типом псевдометрики μ, который обозначим через M_μ.

Итак, при фиксированных значениях параметров $\Gamma_\mu, \Omega_*, I, e$ и $\circledast$, будем иметь конкретный тип псевдометрики μ. Однако следует отметить, что типы псевдометрик M_μ - это неконструктивно заданные множества.

2.2. Кратко рассмотрим возможные обобщения метрик. Обозначим через J множество индексов $(1, 2, \ldots, q)$, где q принимает одно значение из множества $(3, n, m, |A|)$ в зависимости от того, которое из базисных множеств рассматривается: $\Omega_R, \Omega_F, \Omega_\Phi$ или Ω_A.

Псевдометрики, получаемые расслаблением одного из условий метрики

Условие к в а з и р е ф л е к с и в н о с т и. Для любых a и b из Ω_* имеет место

$$(\forall j \in J)[a_j = b_j] \Rightarrow \mu(a, b) = e,$$

$$\mu(a, b) = e \Rightarrow (\exists K \subseteq J)(\forall j \in K)[a_j = b_j], \tag{4}$$

где $a = (a_1, \ldots, a_j, \ldots, a_q)$, $b = (b_1, \ldots, b_j, \ldots, b_q)$, a_j и b_j – j-е компоненты векторов a и b соответственно; e – одно из граничных значений множества I.

Легко убедиться, что при $K = J$ условие (4) переходит в обычное условие рефлексивности (I), которому должна удовлетворять каждая известная метрика, и при $K = 0$ в условии (4) останется только первая импликация. Интересно отметить, что псевдометрики, удовлетворяющие условию квазирефлексивности при $K = 0$ широко используются в топологии [I5].

Условие к в а з и с и м м е т р и ч н о с т и. По крайней мере для одного фиксированного индекса j из множества индексов J и любых a и b из Ω_* имеет место равенство

$$\mu(\langle a_1, \ldots, a_j, \ldots, a_q\rangle, \langle b_1, \ldots, b_j, \ldots, b_q\rangle) =$$

$$= \mu(\langle a_1, \ldots, b_j, \ldots, a_q\rangle, \langle b_1, \ldots, a_j, \ldots, b_q\rangle). \tag{5}$$

Очевидно, что при вырожденном случае, когда это условие верно для всех индексов $j \in J$, условие (5) переходит в условие (2). В другом вырожденном случае, когда это условие не выполняется ни для одного индекса j, это равноценно удалению условия (2) вообще.

Интересно отметить, что все известные до сих пор метрики (или псевдометрики) составляют одну из двух крайностей: либо они симметричные, либо несимметричные вообще. О квазисимметричных псевдометриках, видимо, впервые говорится в работах [3, I4, I6].

Условие квазитранзитивности. Для любых $k + 2$ элементов $c_{j_1}, \ldots, c_{j_k}$, a и b из Ω_*, где k есть одно число из множества $(1, 2, 3, \ldots, |A| - 3, |A| - 2)$, имеет место отношение $\mu(a, b) \theta \mu(a, c_{j_1}) \circledast \ldots \circledast \mu(c_{j_k}, b)$, где θ и $\circledast$ определены выше. Очевидно, что когда $k = 1$, $\circledast$ - операция суммирования и $e = e'$, где $e' \geq 0$, условие квазитранзитивности вырождается в обычное условие транзитивности (3), известное как "аксиома треугольника".

Псевдометрики, получаемые расширением области значения I

Вещественнозначные псевдометрики. Для некоторых $e' \in E$ и $e'' \in E$, где $e' < e''$, I есть одно из следующих трех множеств:

$$I_1 = (\omega: e' \leq \omega \leq e''),$$

$$I_2 = (\omega: e' \leq \omega < e''),$$

$$I_3 = (\omega: e' < \omega \leq e'').$$

Пример 5. Если $e' = 0$, $e'' = \infty$, $e = e'$, $I = I_1$, операция $\circledast$ есть обычное сложение и Γ_μ состоит из перечисленных выше трех аксиом (I)-(3), то множество M_μ будет содержать почти все известные метрики.

Целочисленные псевдометрики. Для некоторых целых чисел $e' \in N$ и $e'' \in N$, где $e' < e''$, I есть одно из следующих трех множеств:

$$I_4 = (\omega: e' \leq \omega \leq e''),$$

$$I_5 = (\omega: e' \leq \omega < e''),$$

$$I_6 = (\omega: e' < \omega \leq e'').$$

Пример 6. Пусть Γ_μ - множество аксиом (I)-(3), перечисленных выше для метрик, $e' = 0$, $e = e'$, $I = I_4$ и $\circledast$ есть операция сложения. Если при этом $e'' = 1$, то M_μ содержит известное расстояние Хэминга, а если $e'' = |A|$, то M_μ содержит также известное расстояние Кемени.

Структурированные псевдометрики. Область значения I метрики μ является основой для некоторого СМ I^c, где $I^c = \langle I, V_I \rangle$, I - некоторое подмножество множества E, V_I - конечное множество отношений на I.

Подобные псевдометрики со значениями в более общих структурах, чем вещественные числа, употребляются в топологии [15]. В частности, в работах [17-20] используются псевдометрики, у которых I есть частично упорядоченное множество, т.е. V_I состоит из единственного отношения квазипорядка.

Псевдометрики, получаемые структурированием области определения отображения μ

Условие факторизации. В области определения Ω_* отображения μ проведено некоторое конечное k-разбиение $\mathcal{R}(\Omega_*)$, что для каждого класса разбиения $K_i \in \mathcal{R}$ определено свое частное отображение $\mu_i : K_i \times \Omega_* \to I$. Очевидно, что при $k = 1$ оно переходит в обычное условие.

В связи с этими обобщениями метрик хотелось бы отметить следующее. Какие бы аксиомы не выставлялись к метрикам, всегда нужно помнить одно важное обстоятельство, что аксиомы нужны для фиксации наших исходных знаний об изучаемых объектах. Другими словами, с помощью аксиом постулируются свойства рассматриваемого пространства (объектов, свойств и т.п.). Следует особо подчеркнуть, что аксиомы, применяемые к метрикам, должны вытекать из самой постановки, цели и содержания задачи. Каждая аксиома должна быть объяснимой в рамках теории данной содержательной области. Подытоживая нашу основную мысль, скажем, что "святых аксиом" не бывает.

2.3. Пусть (h_1, A_1, E_1) и (h_2, A_2, E_2) - два свойства из множества $F \cup \Phi$ с известными шкалами (A_1^c, E_1^c, h_1) и (A_2^c, E_2^c, h_2) соответственно.

Определение 17. Свойства h_1 и h_2 назовем сравнимыми, если $A_1 = A_2 = A$ и $E_1 = E_2 = E$.

Далее рассматриваются только сравнимые свойства, т.е. полагается, что множество свойств $F \cup \Phi$ состоит из попарно сравнимых свойств. Очевидно, что каждое свойство h сравнимо с самим собой.

Пусть h' и h" - некоторые сравнимые свойства из $F \cup \Phi$ с известными шкалами (A_1^c, E_1^c, h') и (A_2^c, E_2^c, h''), где

$$A_1^c = (A, V_A'), \; E_1^c = (E_*, V_E'),$$

$$A_2^c = (A, V_A''), \; E_2^c = (E_*, V_E'').$$

Определение I8. Свойства h' и h" назовем (W, w)-связанными, если W есть подмножество множества $V_A' \times V_A''$ и для каждой пары однотипных отношений (T'_{k_i}, T''_{k_j}) из W имеет место неравенство

$$\frac{|T'_{k_i} \cap T''_{k_j}|}{|T'_{k_i} \cup T''_{k_j}|} \geq w,$$

где w - некоторая константа из множества [0, 1]. Очевидно, что чем больше однотипных отношений содержится в W и чем больше величина w, тем сильнее связаны свойства h' и h" по этому определению. Интересно отметить, что можно было бы обобщить это определение, вводя для каждой пары (T'_{k_i}, T''_{k_j}) однотипных отношений из $V_A' \times V_A''$ свою пороговую величину $w_k = w(k)$. Но в этом нет необходимости, так как почти всегда нас интересует одно единственное отношение, имеющее у прямого свойства $\varphi \in \Phi$. Обычно это либо отношение сходства, либо отношение квазипорядка [3, II].

Пусть F_* - некоторое k-подмножество множества косвенных свойств F. Предположим, что для каждого f_j из F_* известна его шкала измерения (A_j^c, E_j^c, f_j), где $A_j^c = (A, V_j)$. Пусть φ есть некоторое фиксированное свойство из Φ и $(A_\varphi^c, E_\varphi^c, \varphi)$ - его шкала измерения, где $A_\varphi^c = (A, V_\varphi)$. Итак, $V_1, \ldots, V_k$ и V_φ - множества отношений у структурных множеств $A_1^c, \ldots, A_k^c$ и A_φ^c соответственно. Пусть T_φ есть некоторое фиксированное отношение из V_φ. Для наших целей можно даже предположить, что множество V_φ состоит из единственного отношения T_φ.

О п р е д е л е н и е I9. Множество свойств F_* назовем (V_k^*, T_φ)-диагностирующим для свойства φ, где V_k^* – множество однотипных отношений $T_1, \dots, T_k$ из $V_1, \dots, V_k$ соответственно, типы которых совпадают с типом отношения T_φ из V_φ, если множество $V_k^* = (T_1, \dots, T_k)$ является некоторым k-покрытием множества T_φ, т.е. $T_\varphi \subseteq T_1 \cup \dots \cup T_k$.

Сформулируем следующее необходимое условие диагностируемости свойства φ множеством свойств F_*.

У т в е р ж д е н и е I. Если множество свойств F_* является (V_k^*, T_φ)-диагностирующим множеством для свойства φ, то существуют такие неотрицательные числа $w_1, \dots, w_k$ из множества $[0, 1]$, что:

I) для каждого $f_j \in F_*$ свойства f_j и φ являются (W_j, w_j)-связанными;

2) $\sum\limits_j w_j = 1$.

Д о к а з а т е л ь с т в о. Пусть V_k^* есть множество однотипных отношений $T_1, \dots, T_k$ из $V_1, \dots, V_k$ соответственно, типы которых совпадают с типом отношения T_φ из V_φ. Так как согласно условию утверждения V_k^* является некоторым k-покрытием множества T_φ, то для каждого j из множества $(1, 2, \dots, k)$ $|T_j \cap T_\varphi|$ есть неотрицательное число. Тогда в качестве чисел $w_1, \dots, w_k$ будем брать числа

$$\frac{|T_1 \cap T_\varphi|}{|T_1 \cup T_\varphi|}, \dots, \frac{|T_k \cap T_\varphi|}{|T_k \cup T_\varphi|},$$

что удовлетворяет оба условия утверждения одновременно.

2.4. В теории множеств [I5] под метрическим пространством понимают упорядоченный набор из двух элементов (S, ρ), где S – некоторое множество, а ρ – метрика (мера расстояния), определенная на S. Для наших целей необходимо несколько обобщить это определение пространства.

О п р е д е л е н и е 20. Упорядоченный набор из трех элементов $(\Omega^*, \rho, \lambda)$, где $\Omega^* = \Omega_R \times \Omega_F$, ρ – мера расстояния, определенная на Ω_R, λ – мера сходства, определенная на Ω_F, назовем пространством объектов.

О п р е д е л е н и е 21. Упорядоченный набор из двух элементов (Ω_A, σ), где σ – мера связи, определенная на Ω_A, назовем пространством свойств.

Рассмотрим подпространства Ω^*_R и Ω^*_F пространства Ω^*, получаемые проектированием Ω^* на оси координат R и свойств F, т.е.

$$\Omega^*_R = \Pi_{r_x, r_y, r_z}(\Omega^*) \quad \text{и} \quad \Omega^*_F = \Pi_{f_1, \ldots, f_n}(\Omega^*).$$

Заметим, что здесь символы $r_\xi \in R$ и $f_i \in F$ у операции проектирования Π выступают как индексы множеств $r_x(A)$, $r_y(A)$, $r_z(A)$, $f_1(A), \ldots, f_n(A)$ соответственно, так как по определению операция проектирования Π действует по отношению к множествам.

О п р е д е л е н и е 22. Ω^*_R и Ω^*_F назовем R- и F-пространством соответственно, где

$$\Omega^*_R = (\Omega_R, \rho) \quad \text{и} \quad \Omega^*_F = (\Omega_F, \lambda).$$

Таким образом, каждый элемент a из A является одновременно объектом R(a) в пространстве Ω^*_R и объектом F(a) в пространстве Ω^*_F.

3. Сопряженные метрики

3.1. Обозначим через M_ρ, M_λ и M_σ соответственно множества всевозможных мер (расстояний, сходств и связи), удовлетворяющих фиксированным конечным множествам аксиом. Далее, $\mu(a,b)$ в зависимости от контекста будет сокращением записи либо $\mu[R(a), R(b)]$, либо $\mu[F(a), F(b)]$, либо $\mu[A(f_a), A(f_b)]$.

О п р е д е л е н и е 23. Множество упорядоченных пар T_μ из $\Omega_* \times P_k(\Omega_*)$, где $\Omega_* \in (\Omega_R, \Omega_F)$ и $P_k(\Omega_*)$ – семейство всевозможных непустых k-подмножеств множества Ω_*, назовем отношением близости, индуцированным метрикой (μ, Ω^2_*, I), где $\mu \in (\rho, \lambda)$, если для некоторой константы μ_0 из I, зависящей от самой метрики μ, и каждой пары элементов (a, A'_k) из T_μ, где $A'_k = (a'_1, a'_2, \ldots, a'_k)$, имеет место k отношений квазипорядка θ :

$$\mu(a,\ a_1')\theta\mu_o,\ldots,\mu(a,\ a_k')\theta\mu_o,$$

где, если $\mu = \rho$, то $\theta = \leq$ и если $\mu = \lambda$, то $\theta = \geq$.

При $\Omega_* = \Omega_R$ и $\mu = \rho$ назовем T_μ отношением соседства, а при $\Omega_* = \Omega_\pi$ и $\mu = \lambda$ – отношением сходства.

Можно заметить, что обычно под отношением сходства T_λ понимают случай $k = 1$, поэтому мы также ограничимся рассмотрением именно этого случая.

Определение 24. Подмножество T_e множества T_μ назовем отношением e-неотличимости, где $e \in (e',\ e'')$, если для каждой пары $(a,\ A_k')$ из T_e имеет место k равенств:

$$\mu(a,\ a_1') = e,\ldots,\mu(a,\ a_k') = e.$$

Другими словами, элементы $a \in \Omega_*$ и $A_k' \in P_k(\Omega_*)$ находятся в отношении e-неотличимости T_e, если

$$a_1' = a_2' =\ldots= a_k' = a.$$

Легко показать, что при $k = 1$ T_μ и T_e сводятся к хорошо известным отношениям толерантности и эквивалентности [2I].

Определение 25. Конечные множества аксиом Γ_ρ и Γ_λ, которым удовлетворяют метрики $\rho \in M_\rho$ и $\lambda \in M_\lambda$ соответственно, назовем сопряженными, если $|\Gamma_\rho| = |\Gamma_\lambda|$ и они различаются лишь в тех аксиомах, в которых так или иначе используются граничные значения множества I, т.е. $e \in (e',\ e'')$.

Пример 7. По определению (I5) $|\Gamma_\lambda| = |\Gamma_\rho| = 3$ и они различаются: I) в аксиоме (I) – множество Γ_ρ содержит аксиому (I) при условии $e = e'$, а множество Γ_λ – при условии $e = e''$; 2) в аксиоме (3) – множество Γ_ρ содержит аксиому (3) при условии $\theta = \leq$, а множество Γ_λ – при условии $\theta = \geq$.

Определение 26. Две метрики $(\rho,\ \Omega_*^2,\ I)$ и $(\lambda,\ \Omega_*^2,\ I)$ из M_ρ и M_λ соответственно, удовлетворяющие сопряженным множествам аксиом Γ_ρ и Γ_λ, назовем сопряженными, если для каждой пары объектов $(a,\ b)$ из Ω_*^2 имеет место равенство

$$\rho(a,\ b)\ \circledast\ \lambda(a,\ b) = e^*,$$

где $\circledast$ – некоторая операция, определенная на I и связанная с отображениями ρ и λ. В частности, $\circledast$ есть обычное сложение; e^* – некоторое постоянное число из области значений I метрик ρ и λ. В частности,

$$e^* = \begin{cases} m(I) = e'' - e', & \text{когда } I \text{ – континиум;} \\ |I|, & \text{когда } I \text{ – конечное множество.} \end{cases}$$

3.2. Сформулируем одно утверждение, раскрывающее природу сопряженных метрик. Пусть $\circledast$ есть операция сложения и $e^* = m(I)$.

Утверждение 2. Каковы бы ни были сопряженные множества аксиом Γ_ρ и Γ_λ для множеств мер M_ρ и M_λ соответственно, для каждой меры расстояния ρ из M_ρ существует единственная мера сходства λ из M_λ такая, что ρ и λ являются сопряженными.

Другими словами, при фиксированных сопряженных множествах аксиом Γ_ρ и Γ_λ множества M_ρ и M_λ состоят из одних только взаимно сопряженных метрик.

Доказательство. Пусть (ρ, Ω_*^2, I) есть некоторая фиксированная метрика из M_ρ, удовлетворяющая множеству аксиом Γ_ρ. Среди всех метрик в M_λ, удовлетворяющих множеству аксиом Γ_λ, выберем такую λ, которая для любой пары (a, b) из Ω_*^2 удовлетворяет еще условию

$$\lambda(a, b) = e^* - \rho(a, b).$$

Так как Γ_ρ и Γ_λ согласно условию утверждения являются сопряженными множествами аксиом, то λ и есть искомая сопряженная метрика из M_λ. Осталось показать, что для данного ρ из M_ρ существует единственная сопряженная метрика λ из M_λ.

Пусть μ есть другая сопряженная метрика из M_λ, удовлетворяющая тому же множеству аксиом Γ_λ. Тогда, если $\mu \neq \lambda$, то хотя бы для одной пары (a, b) из Ω_*^2 должно быть $\mu(a, b) \neq$ $\neq \lambda(a, b)$. Но это противоречит тому, что имеет место двойное равенство

$$\lambda(a, b) = e^* - \rho(a, b) = \mu(a, b).$$

Литература

1. Гафуров Д.З. Задачи RF-распознавания образов. - В сб.: Вычислительные методы в геологоразведке. Новосибирск, 1984, с. 66-89.
2. Воронин Ю.А. Введение в теорию классификаций. - Новосибирск: Изд. ВЦ СО АН СССР, 1982.
3. Воронин Ю.А. Теория классифицирования и ее приложения. - Новосибирск: Наука, 1985.
4. Усманов Ф.А. Математические методы в региональной геологии и металлогении. - Ташкент: Фан, 1984.
5. Гафуров Д.З. Об одном подходе для отыскания множества одних объектов по известному расположению множества других объектов: Препринт № 124. - Новосибирск, 1978. - 25 с. - В надзаг.: ВЦ СО АН СССР.
6. Гафуров Д.З. Некоторые вопросы задачи отыскания множества целевых объектов по индикаторным множествам. - В сб.: Математические методы при поиске и разведке полезных ископаемых. Новосибирск, 1978, с. 136-143.
7. Гафуров Д.З. Общий взгляд к задаче поиска экстремумов одной функции по известным экстремумам другой функции: Препринт № 161. - Новосибирск, 1979. - 10 с. - В надзаг.: ВЦ СО АН СССР.
8. Воронин Ю.А., Гафуров Д.З. О классификации постановок задач вырожденного выделения. - В кн.: Теория классификации и анализ данных: Тез. докл. Всерос. конф. Новосибирск, 1981, ч.4, с. 24-26.
9. Гафуров Д.З. Об одном эврестическом детерминированном алгоритме отыскания объектов одного множества по известным объектам другого множества. - В кн.: Вопросы кибернетики. Техническая кибернетика. Ташкент, 1982, вып.117, с. 9-16.
10. Voronin Y.A., Gafurov J.Z. The analysis of training data for the selection of the pattern recognition algorithm. - Proc. of the 6-th Intern. Conf. on Pattern Recognition, München, 1982, vol. 1, Comput. Soc. Order N 436, p. 235-237.
11. Воронин Ю.А., Гафуров Д.З., Шевченко Н.Г. Некоторые классификационные вопросы распознавания: Препринт № 380. - Новосибирск, 1983. - 24 с. - В надзаг.: ВЦ СО АН СССР.

I2. Гафуров Д.З. Задачи продолжения функций и их классификация. - В сб.: Задачи оптимизации выбора объектов и способов. Новосибирск, I983, с. 28-39.
I3. Суппес П., Зинес Дж. Основы теории измерений. - В кн.: Психологические измерения. - М.: Мир, I967, с. 46-II2.
I4. Воронин Ю.А., Жигарловский А.И., Шевченко Н.Г. К проблеме классификации мер сходства. - В сб.: Вычислительные системы. Новосибирск, I984, вып. I02, с. 80-87.
I5. Келли Дж.Л. Общая топология: Пер. с англ., 2-е изд. - М.: Наука, I98I.
I6. Москаленский Е.Д. О построении мер сходства, не обладающих избыточной симметрией. - В сб.: Вычислительные методы в геологоразведке. - Новосибирск, I984, с. 90-I05.
I7. Balanzat M. On the metrization of quasi-metric spaces. - Gaz. Mat., Lisboa, 1951, vol. 12, N 50, p. 91-94.
I8. Kalisch G.K. On uniform spaces and topological algebra. - Bull. Amer. Math. Soc., 1946, vol. 52, p. 936-939.
I9. Cohon L.W., Goffman C. On the metrization of uniform space. - Proc. Amer. Math. Soc., 1950, vol. 1, p.750-753.
20. Lasalle J.P. Topology, based upon the concept of pseudo-norm. - Proc. Nat. Acad. Sci. USA, 1941, vol. 27, p. 448-451.
2I. Шрейдер Ю.А. Равенство, сходство и порядок. - М.: Наука, I97I.

С.К.Туренко

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПАКЕТА ПРОГРАММ ПЛЭКС ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ СЕТЕЙ НАБЛЮДЕНИЙ ПРИ ВЫДЕЛЕНИИ ПЛОСКИХ ОБЪЕКТОВ (КОНТУРОВ)

I. В работах [I-3] описано теоретическое и программное (пакет прикладных программ ПЛЭКС) обеспечение постановки и решения на ЭВМ задач анализа и планирования геофизических систем наблюдений в геологоразведке. При этом в качестве основных параметров систем наблюдений взяты объекты наблюдения, комплекс наблюдаемых полей, сети наблюдения, точности измерения.

В ППП ПЛЭКС первой очереди реализовано обеспечение планирования геофизических систем наблюдений для решения задачи выделения (локализации) геологических объектов фиксированного класса (геологические структуры, месторождения и т.д.). При этом полагается, что все параметры систем наблюдений фиксированы, необходимо выбрать лишь сеть наблюдений.

Для реализации процесса проектирования геолого-разведочных сетей наблюдений предложен новый способ, в основе которого лежит моделирование на ЭВМ объектов и процесса исследований.

Выбор наиболее эффективного варианта сетей наблюдений осуществляется посредством сравнения результатов решения содержательной задачи при различных вариантах сетей наблюдений и соответствующих им протоколов. При этом эксперименты реализуются не на реальных объектах, а на их моделях, полученных в результате обобщения имеющейся как априорной, так и экспериментальной информации.

Пакет обеспечивает: а) выбор моделей и формальной постановки задачи, наиболее полно учитывающих информацию о реальной ситуации; б) реализацию решения поставленной задачи; в) сравнение и выбор наиболее эффективных вариантов и классов сетей наблюдений.

В ППП ПЛЭКС первой очереди имеются три подсистемы, которые реализуют проектирование сетей наблюдения:

первая - при решении задачи выделения в одномерном случае (например, выделение перспективных интервалов по результатам геофизических исследований в скважинах);

вторая - при выделении плоских объектов (контуров);

третья - полевыми геофизическими методами при выделении (локализации)объектов в плане.

В данной статье иллюстрируется работа второй подсистемы ППП ПЛЭКС.

В подсистеме реализуются различные варианты задания множества объектов исследования. Последние, в частности, могут аппроксимироваться эллипсами, параметры которых задаются или же определяются с помощью датчика случайных чисел в некоторых фиксированных диапазонах.

Имеется возможность порождать различные классы правильных, кусочно-правильных и случайных сетей.

Выбор эффективных сетей наблюдений может осуществляться на основе критериев эффективности различных видов, учитывающих как качество, так и стоимость исследований.

2. Рассматривается следующая постановка задачи. В прямоугольной области D размерами R_x и R_y расположено N плоских объектов фиксированной формы; $R_x = 10$, $R_y = 10$, $N = 9$. Объекты-эллипсы с параметрами A_i, B_i, ALF_i, CPX_i, CPY_i, где A_i, B_i - соответственно большая и малая полуоси i-го эллипса, ALF_i - угол ориентации, CPX_i, CPY_i - координаты центра масс i-го эллипса.

Решается задача выделения (обнаружения и оконтуривания) объектов прямым опробованием по сети S_1. Каждая сеть характеризуется следующими параметрами: γ_1 - класс сети, $\bar{\delta}$ - средняя плотность сети, Q - ориентация сети. Выделение осуществляется посредством оконтуривания множества узлов сети, попадающих в объекты. Качество решения задачи выделения оценивается следующими частными показателями погрешностей определения: h_1 - площадей объектов, h_2 - центров масс, h_3 - ориентации объектов, h_4 - формы объектов. В данном случае в качестве h_4 взят показатель вытянутости объектов $BO_i = A_i/B_i$; в качестве обобщенного показателя качества - функция

$$H = 1 - (\alpha_1 h_1 + \alpha_2 h_2 + \alpha_3 h_3 + \alpha_4 h_4)/4.$$

Представляет интерес исследовать зависимость качества решения задачи выделения от параметров сети наблюдений и от параметров исследуемых объектов.

3. Рассмотрим зависимость качества решения задачи выделения от ориентации сети.

Обозначая через $S_i = A_i \cdot B_i \cdot \pi$ площадь i-го объекта, конкретизируем параметры исследований: $S_i = 0{,}3 \cdot \pi$, $BO_i = 5$, $ALF_i = 0$, $CPX = \{3;5;7\}$, $CPY = \{3{,}1;\ 5{,}1;\ 7{,}1\}$; $\pi = 3{,}14$.

Исследования проводились для трех классов прямоугольных сетей: $BC_1 = 1$, $BC_2 = 5$, $BC_3 = 10$, где BC - параметр вытянутости сети, равный отношению расстояния между профилями сети к шагу по профилю.

Схема исследований для каждого класса сетей следующая:

I. Фиксируется значение угла ориентации сети. Исследуются сети с ориентацией Q от 0 до 90° с шагом 10°.

2. Фиксируется ряд значений средней плотности сети наблюдений - $\{\delta_k\}$. Принято: $k = 1,\ldots,20$; $\bar\delta_1 = 0{,}1$; $\bar\delta_i = \bar\delta_{i-1} + DDL$, где DDL - шаг значений плотности (принимается равным 0,5 или I в зависимости от конкретной ситуации исследования).

3. Порождается сеть с параметрами BC_i, Q_i и $\bar\delta_k$.

4. Решается задача выделения фиксированных объектов по фиксированной сети.

5. Вычисляются частные и обобщенные показатели качества решения задачи выделения $\{h_i^k\}$, H_k, $i = 1,\ldots,5$, $k = 1,\ldots,20$, и стоимость решения задачи C_k.

Этапы 3-5 осуществляются для каждого варианта сети (т.е. 20 раз).

6. Строятся зависимости $H_k(\bar\delta)$ и $h_i^k(\bar\delta)$. Общий вид зависимости $H(\bar\delta)$ показан на рис.I.

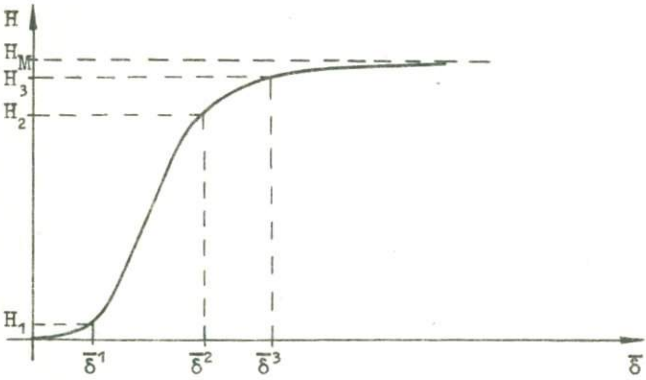


Рис.I. Общий вид зависимости $H(\bar{\delta})$

В конкретных случаях, как показали эксперименты, эта зависимость не всегда строго монотонна.

7. Исследуется зависимость $H(\bar{\delta})$. Определяются значения $(\bar{\delta}^1, H^1)$, $(\bar{\delta}^2, H^2)$, $(\bar{\delta}^3, H^3)$, H_M, DH, где H_M – максимальный уровень значений H, DH – дисперсия графика $H(\bar{\delta})$.

Меняя ориентацию сети и реализуя этапы 2-7, исследуется изменение указанных параметров.

Результаты исследования зависимости качества решения задачи выделения от ориентации сети сводятся к следующему.

Для определенности будем полагать, что выбор сети осуществляется по критерию $H \geq H_o$, $C \to \min$, где $H_o = 1 - \varepsilon$, ε – малая фиксированная величина. С этих позиций представляет интерес исследование изменения величины $\bar{\delta}_3$ в зависимости от ориентации сети.

На рис.2 приведены графики $\bar{\delta}^3(Q)$ для исследуемых классов сетей. Необходимо отметить, что эти графики лишь частично характеризуют исследуемые классы сетей. Важно учитывать и характер дисперсии H – DH. Для квадратной сети характерна малая величина DH. Величина дисперсии растет с увеличением вытянутости сети и с увеличением угла ориентации. Приведенные графики позволяют количественно оценить влияние погрешности

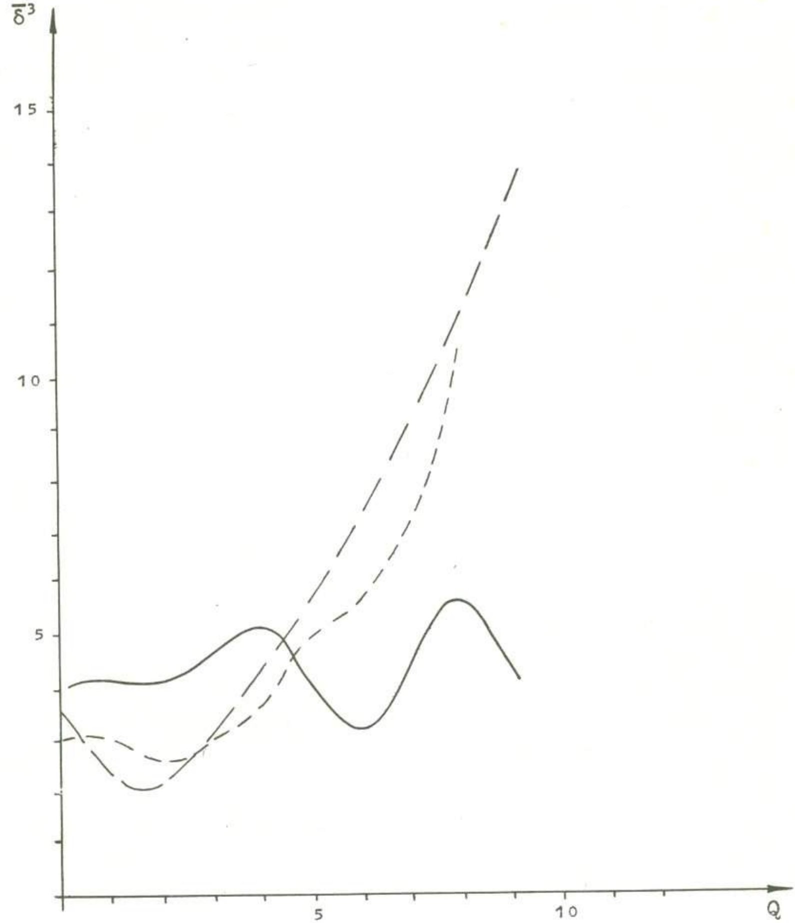


Рис.2. Графики зависимости оптимальной плотности сети наблюдений ($\overline{\delta}^3$) от ориентации сети наблюдений (Q):

———————— - вытянутость сети равна I,

\- - - - - - - вытянутость сети равна 5,

— — — — - вытянутость сети равна I0

(или неопределенности) в определении ориентации объектов при проектировании исследований на эффективность исследований.

Предположим, что с использованием сети с параметрами BC=5 осуществляется выделение объектов, для которых вытянутость $BO_i = 5$. Тогда погрешность в определении ориентации объекта $\pm$ 40-50° требует увеличения плотности сети наблюдений в I,5-2 раза по сравнению с тем случаем, когда ориентация известна с точностью до I0°. Погрешность же определения ориентации объекта $\pm$ 90° требует увеличения плотности сети наблюдений в 5-6 раз. Из приведенных графиков видно также, что сети оптимальной геометрии (вытянутость сети соответствует вытянутости объекта) имеет смысл использовать в тех случаях, когда погрешность определения углов ориентации объекта (или разброс значений углов ориентации объектов) не превышает 40-50°. При увеличении погрешности углов ориентации отношение BO_i/BC должно увеличиваться (ячейка сети должна приближаться к квадратной).

Для правильной постновки и решения задачи важным является как абсолютное, так и относительное исследование частных показателей. Для всех классов исследованных сетей характерно следующее. Показатели погрешности определения формы, площади и центров масс объектов ведут себя достаточно согласованно, т.е. имеют близкие значения величин $\bar{\delta}^1$, $\bar{\delta}^2$, $\bar{\delta}^3$ (см. рис.I). Дисперсии же этих величин отличаются более существенно. Изменения показателя погрешности определения угла ориентации мало согласуются с изменениями других показателей.Этот показатель более чутко реагирует (увеличением дисперсии, уменьшением H_M) на увеличение угла ориентации сети и на увеличение (или уменьшение) вытянутости сети относительно вытянутости исследуемого объекта.

4. Рассмотрим зависимость качества сети наблюдений от формы исследуемых объектов.

В данном случае форма объекта характеризуется показателем его вытянутости: $BO_i = A_i/B_i$. Параметры эксперимента следующие: $ALF_i = 0$, $S_i = 0{,}2\cdot\pi$, $Q = 0$. Исследования проводились для тех же трех классов сетей: $BC_1 = 1$, $BC_2 = 5$, $BC_3 = 10$.

Схема исследований в рамках каждого класса сетей аналогична приведенной в п.3:

I. Фиксируется ряд значений вытянутости исследуемых объектов. Исследования проводились для $1 \le BO_i \le 16$, $BO_1 = 1$, $BO_i = BO_{i-1} + 3$, $i = 2,\ldots,16$.

Этапы 2-7 реализуются по приведенной выше схеме.

Соответствующие графики $\overline{\delta}^3(BO)$ приведены на рис.3.

Если обозначить через OB_i относительную вытянутость объекта $OB_i = BO_i/BC$, то оказывается, что $\overline{\delta}^3$ растет с увеличением отклонения OB_i от единицы. Опираясь на приведенные графики, можно определить допустимую область, когда отклонения OB_i от единицы не приводят к существенному увеличению $\overline{\delta}^3$. Кроме того, можно количественно оценить, как сказываются погрешность или неопределенность в фиксации параметров объектов исследований на эффективности экспериментальных исследований.

При приближении OB_i к единице поведение частных показателей качества становится более согласованным, уменьшается их дисперсия, H_M приближается к единице. Наиболее сильно реагирует на отклонения OB_i от единицы показатель погрешности ориентации (увеличение дисперсии, увеличение $\overline{\delta}^3$, уменьшение H_M).

5. Исследуем зависимость качества сети наблюдений от размеров исследуемых объектов.

Параметры эксперимента: $ALF_i = 0$, $BO_i = 5$, $Q = 0$. Исследования проводились для двух классов сетей: $BC_1 = 1$, $BC_2 = 5$.

Схема исследований аналогична приведенной в п.3:

I. Фиксируем ряд значений размеров исследуемых объектов. Размер объекта определяется через его площадь – S_i. Исследования проводились для $SO \le S_i \le 16 \cdot SO$, $S_1 = SO$, $S_i = 4 \cdot (i-1) \cdot SO$, $i = 2,3,4$; $SO = 0{,}1 \cdot \pi$.

Этапы 2-7 реализуются по приведенной выше схеме.

Общий вид зависимости $\overline{\delta}^3$ от размеров объектов показан на рис.4.

Из приведенных графиков видно, что для различных классов сетей указанная зависимость различна. Характерным является то, что по мере увеличения размеров объектов исследования стабилизируется (уменьшается дисперсия) и становится более согласованным поведение показателей качества.

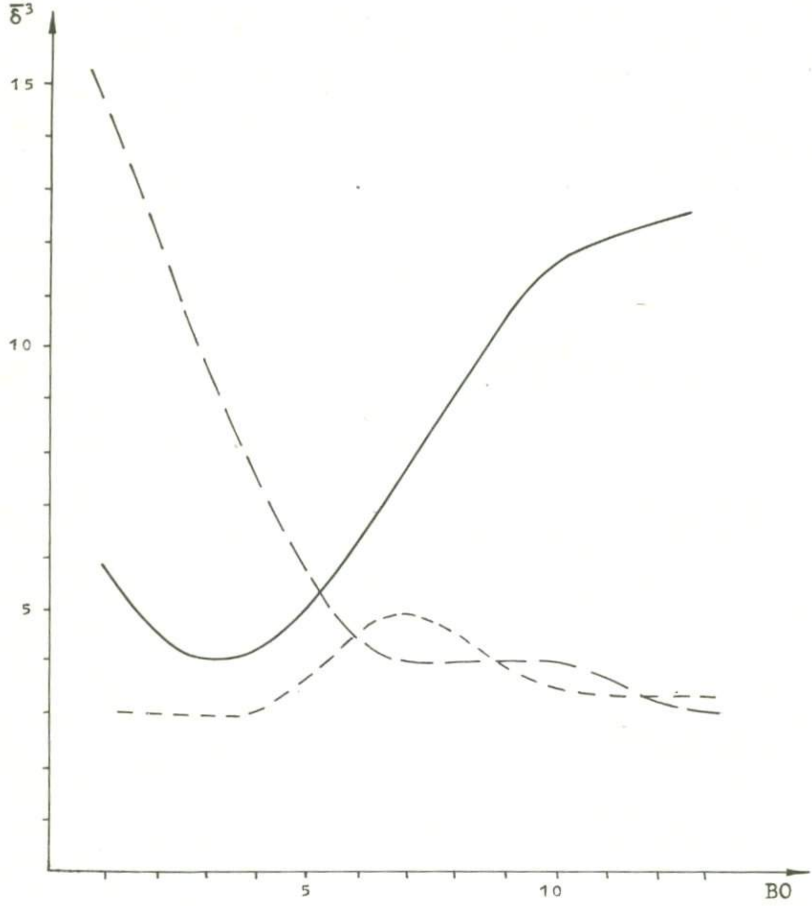


Рис.3. Графики зависимости оптимальной плотности сети наблюдений ($\bar{\delta}^3$) от формы объектов (ВО):

———————— - вытянутость сети равна I,

\- - - - - - - вытянутость сети равна 5,

— — — — - вытянутость сети равна IO

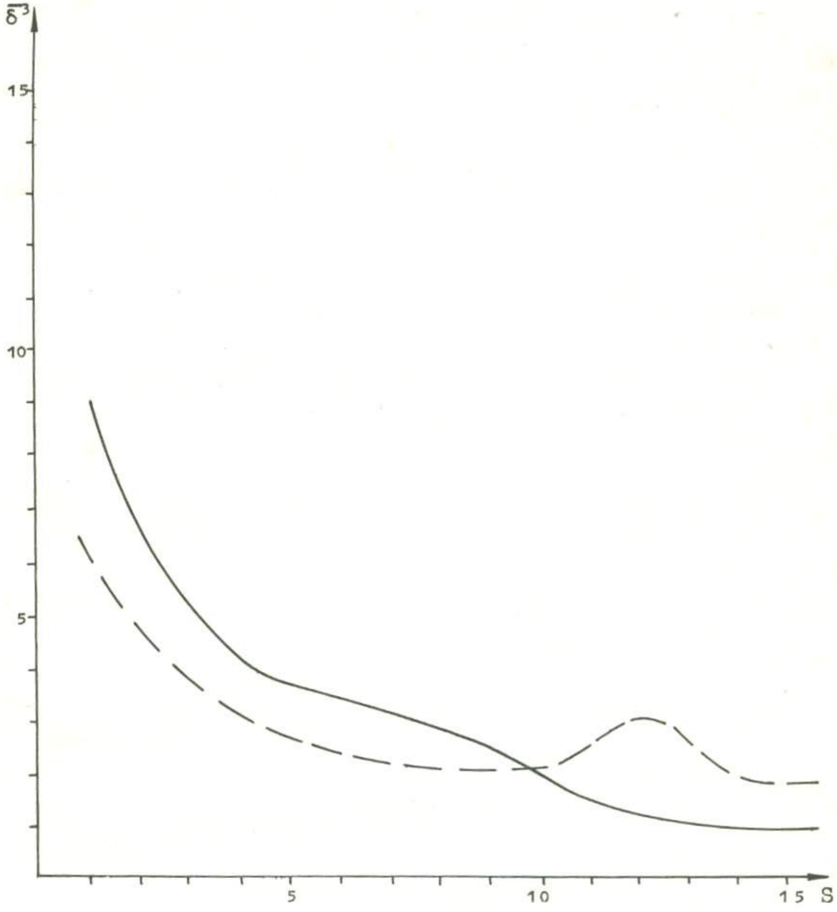


Рис.4. Графики зависимости оптимальной плотности сети наблюдений ($\bar{\delta}^3$) от размеров объектов (S):

———————— - вытянутость сети равна I,

\- - - - - - - вытянутость сети равна 5

6. В качестве общих выводов по результатам исследования прямоугольных сетей при выделении плоских объектов отметим следующее.

При исследовании и планировании сетей наблюдений необходимо учитывать, что при увеличении отклонения угла ориентации сети от угла ориентации исследуемого объекта, а также при увеличении вытянутости сети увеличивается не только $\bar{\delta}^3$, но и дисперсия DH. Кроме того может уменьшаться величина H_M.

Показатель дисперсии является одним из наиболее важных параметров при определении наиболее эффективного класса сетей и соответствующего угла ориентации.

Проведенные исследования позволяют не только сделать качественные выводы, но и количественно оценить, как влияют ошибки или неопределенность в задании параметров исследуемых объектов при постановке задачи на эффективность решения задачи планирования сетей наблюдений. А это особенно важно для использования в реальных исследованиях результатов, полученных на моделях.

Возможности разработанного обеспечения не ограничиваются рассмотренными задачами. Оно может быть успешно использовано также при решении широкого круга других типов методических задач.

Л и т е р а т у р а

I. Воронин Ю.А., Туренко С.К. Ретроспективный анализ систем наблюдений в геологоразведке за счет моделирования на ЭВМ: Препринт № 462. - Новосибирск, 1983. - 26 с. - В надзаг.: ВЦ СО АН СССР.

2. Туренко С.К. Теоретическое обеспечение ретроспективного анализа систем наблюдений в геологоразведке за счет моделирования на ЭВМ: Препринт № 490. - Новосибирск, 1984. - 44 с. - В надзаг.: ВЦ СО АН СССР.

3. Туренко С.К. Программное обеспечение постановки и решения на ЭВМ задач анализа и планирования геолого-разведочных систем наблюдений: Препринт № 564. - Новосибирск, 1985. - 22 с. - В надзаг.: ВЦ СО АН СССР.

С.К.Туренко, В.Д.Борцов

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПАКЕТА ПРОГРАММ ПЛЭКС ДЛЯ ВЫБОРА СЕТЕЙ НАБЛЮДЕНИЙ ГЕОФИЗИЧЕСКИМИ МЕТОДАМИ

I. В работах [I-3] описано теоретическое и программное (пакет прикладных программ ПЛЭКС) обеспечение постановки и решения на ЭВМ задач анализа и планирования геофизических систем наблюдений в геологоразведке. Краткая характеристика разработанного обеспечения дана в [4].

ППП ПЛЭКС обладает широкими возможностями, обуславливающими его применимость для решения методических и практических задач, а также для обучения специалистов в вузах и на производстве.

Целью данной статьи является иллюстрация работы подсистемы ППП ПЛЭКС, реализующей процесс проектирования сетей наблюдения полевыми геофизическими методами при выделении (локализации) объектов в плане.

Работа этой подсистемы иллюстрируется примером исследования и выбора рациональных сетей наблюдений геофизическими методами при поисковых исследованиях на рудные объекты в условиях Восточного Казахстана.

При этом выбор рациональных сетей наблюдений осуществлялся в два этапа, а именно:

а) выбор рациональных сетей наблюдений на уже исследованных объектах (ретроспективный анализ проведенных исследований);

б) распространение полученных результатов на исследования аналогичных объектов. Для этих целей проведены специальные методические исследования прямоугольных сетей наблюдений при выделении плоских объектов (контуров) [4]. В частности, для различных классов прямоугольных сетей исследовалось влияние изменений параметров объектов исследований (формы, размеров, ориентации) на качество и оптимальные параметры сетей наблюдений.

Учитывая, что результаты исследований второго этапа описаны в [4], в данной работе основное внимание уделено результатам исследований первого этапа.

2. Рассмотрим выбор сети наблюдений методом магниторазведки при детальных поисково-оценочных исследованиях на золоторудных объектах на примере N-ского рудопроявления.

Исследования проводились на основе карты магнитного поля масштаба I:I000 (рис.I), полученной в результате измерений в пределах N-ского рудопроявления по сети 20xI0 м, а на отдельных участках - 20x5 и 20x2,5 м. Поле представлено в виде цифровой модели, полученной в результате оцифровки по сети 0,5x0,3 см в масштабе исходной карты. В качестве объектов выделения выступали локальные аномалии магнитного поля ΔT ($\Delta T \geq 250$ нТ), отвечающие в пределах исследуемого рудного поля зонам интенсивной пропилитизации с золотосульфидным орудfestнением.

Таким образом, на исследуемом участке в качестве объектов выделения выступают 4 линейно вытянутых эпицентра, отмеченные номерами I-4 на рис.I.

В процессе исследований решались задачи:

а) исследования результатов выделения фиксированных объектов по магнитному полю при различных параметрах сети его наблюдения. Варьировались шаг по профилю (DY), расстояние между профилями (DX), ориентация сети (Q);

б) выбора рациональной сети наблюдений, позволяющей выделять исследуемые объекты с требуемым качеством при минимальных затратах, опираясь на фиксированную информацию об объектах исследования (размер, ориентация, физико-геологическая модель).

Исследовались варианты сети DX×DY = 20xI0; 20x5; 20x2,5; I0xI0; I0x5; I0x2,5; 5x5; 5x2,5 м. Каждый вариант DX×DY рассматривался при различных углах ориентации Q (относительно ориентации исходной сети): Q = 0,20,40,...,140,160.

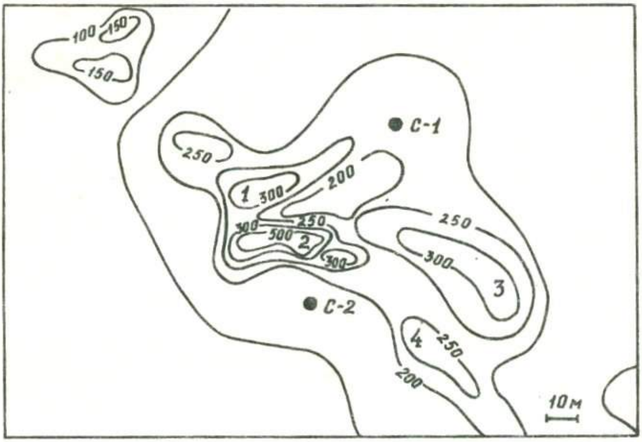
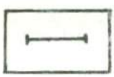
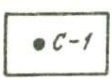


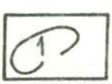
Рис.I. Результаты работ методом магниторазведки в районе N-ского рудопроявления:

- изолинии магнитного поля ΔT в нТл;


- линия геолого-геофизического разреза;



- точки заложения скважин;



- номера исследуемых контуров

Исследования проводились по следующей схеме.

Для варианта сети $S_i(DX_i, DY_i, Q_i)$ на основе исходной цифровой модели поля $F_0(x, y)$ и алгоритма аппроксимации (в данном случае использовался алгоритм линейной интерполяции) порождалась соответствующая цифровая модель $F(x, y)$.

Задача выделения искомых объектов (локальных аномалий) решалась по $F_0(x, y)$ и по $F_i(x, y)$, $i = 1,2,\dots,n$. Мерой качества H_i сети S_i является степень соответствия результатов выделения $R_i(h_1, h_2, h_3, h_4)$, полученных с использованием i-й цифровой модели, и $R_0(h_1, h_2, h_3, h_4)$, полученных с использованием исходной цифровой модели F_0. Качество сети S_i может оцениваться качественно (визуальным сравнением соответствующих карт изолиний) и количественно - с помощью формального показателя качества H_i. При этом результаты выделения описываются такими показателями, как h_1 - площадь, h_2 - координаты центра масс, h_3 - ориентация, h_4 - форма выделенных объектов (определяется через отношение ширины объекта к его длине). Таким образом, каждому варианту сети поставлены в соответствие карты изолиний исследуемого поля, а также количественный показатель H_i. Карты изолиний служат для экспертной оценки результатов выделения и подборки соответствующего показателя качества выделения.

Предварительный анализ результатов экспериментов показал, что наиболее чувствительными параметрами оценки качества сети наблюдений являются погрешность определения площади ΔS и формы исследуемых объектов ΔFM. С позиции решаемой задачи, наиболее важным является показатель погрешности определения площади. В табл.I дана количественная характеристика качества различных вариантов сетей наблюдений по указанным параметрам. Приняты следующие обозначения: $\Delta S_i^j = |S_i^j - S_i|/S_i$ - нормированная погрешность определения площади i-го объекта по j-му варианту сети наблюдений S_i^j. Нормировка осуществляется на площадь i-го объекта S_i, определенного по исходной цифровой модели ($S_1 = 100$, $S_2 = 277$, $S_3 = 250$, $S_4 = 200$ м^2); $\Delta FM_i^j = FM_i^j - FM_i$ - погрешность определения формы i-го объекта по j-му варианту сети наблюдений.

Показатель формы для исследуемых объектов, определенный по исходной цифровой модели, принимает значения $FM_1 = 0,56$,

$FM_2 = 0,34$, $FM_3 = 0,2$, $FM_4 = 0,4$. $\overline{\Delta S}$ - суммарная нормированная погрешность определения площади объектов, $\overline{\Delta FM}$ - средняя погрешность определения формы объектов:

$$\overline{\Delta FM} = \sum_{i=1}^{n} \Delta FM_i/n.$$

Соответственно: $\overline{\Delta S1}$ и $\overline{\Delta FM1}$ - учитываются объекты, площадь которых $s_i \geq 100$ м^2; $\overline{\Delta S2}$ и $\overline{\Delta FM2}$ - $s_i \geq 200$ м^2, $\overline{\Delta S3}$ и $\overline{\Delta FM3}$ - - $s_i \geq 250$ м^2. Значение I в соответствующей графе табл.I означает, что объект не выделен.

Общую характеристику результатов экспериментов можно дать следующим образом.

При вращении (относительно ориентации исходной сети) сетей 5x2,5 и 5x5 м в диапазоне от 0 до I80° с шагом 20° значимых отклонений в результатах выделения локальных аномалий не наблюдается. При вращении сетей с параметрами I0x2,5 и I0x5 м в диапазоне от 0 до 50-60° существенных изменений в характере результатов выделения не наблюдается (сохраняется положение, форма и ориентация объектов, суммарная ошибка в определении площади объектов не превышает 40 %). Существенные изменения наблюдаются при углах ориентации сети, близких к 90° (существенные изменения площади и формы объектов, пропуск объекта № I (см. рис.I)).

Для сетей с параметрами 20x2,5 и 20x5 м общая картина сохраняется при малых углах вращения сети (до 20°). При других же углах картина существенно искажается (большие погрешности определения площади, формы, пропуск объектов № I и 4).

Сети с параметрами I0xI0 и 20xI0 м при любых углах ориентации существенно искажают картину (пропуск объектов № I и 4, существенное искажение в определении площадей и формы объектов № 2 и 3).

Опираясь на результаты, приведенные в табл. I, определим рациональные сети наблюдений для выделения фиксированных объектов при различных вариантах априорной информации о них. Будем полагать, что для рациональных сетей должно выполняться условие $\overline{\Delta S} \leq 0,3$, $\overline{\Delta FM} \leq 0,2$.

Таблица I

Результаты экспериментов. N-ское рудопроявление

DXxDY м,	Q, град.	Объект													
		I		2		3		4		$S_i \geq 100$ м²		$S_i \geq 200$ м²		$S_i \geq 250$ м²	
		ΔS_1^j	ΔFM_1^j	ΔS_2^j	ΔFM_2^j	ΔS_3^j	ΔFM_3^j	ΔS_4^j	ΔFM_4^j	$\overline{\Delta S}^1$	$\overline{\Delta FM}^1$	$\overline{\Delta S}^2$	$\overline{\Delta FM}^2$	$\overline{\Delta S}^3$	$\overline{\Delta FM}^3$
5x2,5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	40	0,3	0,06	0,09	0,04	0,I9	0	0,04	0,03	0,I3	0,03	0,II	0,02	0,I4	0,02
	90	0,55	0,II	0,09	0,04	0,I9	0	0,08	0,04	0,I7	0,05	0,I2	0,03	0,I4	0,02
5x5	0	0,42	0,06	0,I7	0,0I	0,I6	0,0I	0,04	0,03	0,I7	0,03	0,I3	0,02	0,I7	0,0I
	40	0,45	0,02	0,II	0,06	0,2I	0	0,I3	0,09	0,I9	0,04	0,I5	0,05	0,I6	0,02
I0x2,5	0	0,45	0,02	0,I7	0,0I	0,26	0,0I	0,I7	0,2	0,23	0,06	0,2	0,0I	0,2I	0,0I
	40	0,75	0,24	0,23	0,05	0,5	0,02	0,5	0,0I	0,44	0,08	0,39	0,03	0,36	0,03
	90	I	I	0,06	0,06	0,6I	0,06	0,47	0,I	0,44	0,3	0,36	0,05	0,32	0,06

Продолжение табл. I

I	2	3	4	5	6	7	8	9	I0	II	I2	I3	I4	I5	I6
I0x5	0	0,66	0,I6	0,I7	0,04	0,4	0,0I	0,33	0	0,44	0,05	0,29	0,02	0,28	0,03
	40	0,88	0,04	0,23	0,04	0,69	0,03	0,5	0,I6	0,5I	0,07	0,46	0,08	0,45	0,04
	90	I	I	0,II	0,26	0,42	0,I6	0,36	0,I3	0,37	0,39	0,29	0,I8	0,26	0,2I
20x2,5	0	0,9	0,2	0,09	0,08	0,87	0,43	0,83	0,63	0,6	0,34	0,56	0,38	0,45	0,26
	40	0,75	0,27	0,03	0,29	I	I	I	I	0,64	0,64	0,62	0,8	0,48	0,65
	90	0,88	0,44	I	I	0,45	0,I8	I	I	0,82	0,65	0,8I	0,73	0,74	0,59
20x5	0	0,9	0,I9	0,03	0,05	0,9	0,3	0,9	0,37	0,6	0,23	0,56	0,24	0,44	0,I8
	40	0,8	0,27	0,03	0;24	I	I	I	I	0,64	0,63	0,62	0,74	0,48	0,62
	90	0,8	0,27	I	I	0,46	0,I9	I	I	0,8I	0,62	0,8I	0,73	0,75	0,6
I0xI0	0	I	I	0,07	0,26	0,65	0,I	I	I	0,57	0,59	0,52	0,45	0,34	0,I8
	40	I	I	0,I4	0,26	0,73	0,0I	0,5	0,2	0,5I	0,37	0,44	0,I6	0,42	0,I4

Окончание табл. I

I	2	3	4	5	6	7	8	9	I0	II	I2	I3	I4	I5	I6
20xI0	0	I	I	0,09	0,02	0,95	0,4	I	I	0,67	0,6I	0,63	0,47	0,49	0,2I
	40	0,93	0,44	0,06	0,36	I	I	I	I	0,67	0,7	0,63	0,79	0,5	0,68
	90	I	I	0,0I	0,26	0,84	0,3	I	I	0,65	0,64	0,6	0,52	0,45	0,28

Через ΔQ будем обозначать точность, с которой нам известна ориентация исследуемых объектов или диапазон изменения углов ориентации их.

В табл.2 приведены варианты ограничений на размер выделяемых объектов в метрах.

Т а б л и ц а 2

S_i, $м^2$	ΔQ, град.		
	± 10	± 40	± 90
100	10x2,5 (20x5, 10x2,5)	5x5 (10x5, 5x5)	5x5
200	10x5 (20x5, 10x5)	5x5 (10x5, 5x5)	5x5 (10x5, 5x5)
250	10x5 (20x10, 10x5)	5x5 (10x10, 5x5)	5x5 (10x10, 5x5)

В скобках указывается рациональная сеть, когда решение задачи выделения можно реализовывать в два этапа. Выбор одно- или двухэтапной схемы определяется конкретными условиями исследования.

3. В этом пункте остановимся на выборе сети наблюдений методом естественного поля при детальных поисково-оценочных исследованиях на колчеданно-полиметаллических объектах на примере месторождения "Потенциальное".

На территории исследуемого рудного района аномалиями метода естественного поля (ЕП) четко отмечаются выходящие на эрозионный срез сплошные и прожилково-вкрапленные рудные залежи колчеданно-полиметаллического типа. В связи с этим картирование аномалий ЕП является одной из основных задач поиска рудных залежей колчеданно-полиметаллического типа в условиях исследуемого и близлежащих районов.

Исследования проводились на основе карты естественного поля, полученной в результате измерений над месторождением "Потенциальное" по сети 50x20, а на

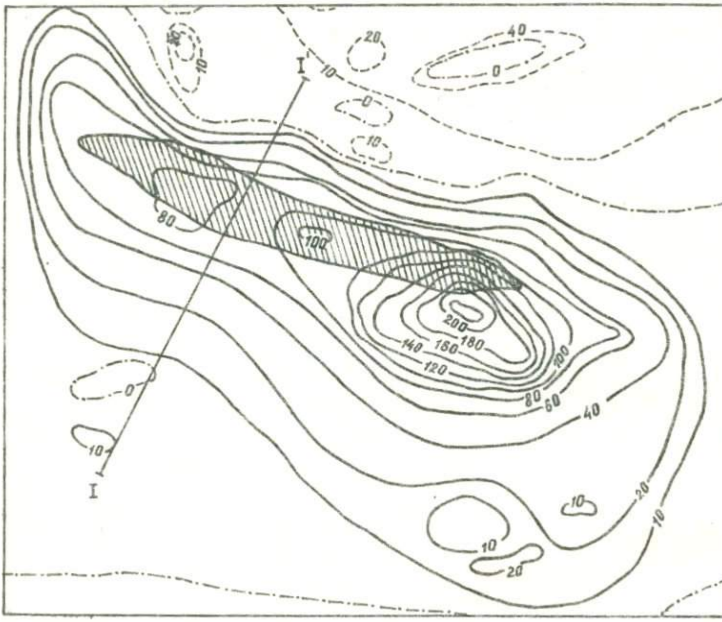
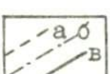


Рис.2. Результаты исследований методом естественного поля над месторождением "Потенциальное":

- контуры рудного тела;



- изолинии естественного поля в милливольтах: а) положительные, б) нулевые, в) отрицательные;

- линия геолого-геофизического разреза

отдельных участках - 50xI0 м. Поле представлено в виде цифровой модели, полученной в результате оцифровки исходной карты по сети I,0x0,5 см. В качестве объекта выделения выступает аномалия ЕП (ΔU - 60 мВ), контролирующая положение рудного тела в плане.

При исследованиях сети наблюдений методом естественного поля решались задачи, охарактеризованные в п.2:

а) исследования результатов выделения при различных параметрах DX, DY, Q;

б) выбора рациональной сети при различной степени определенности информации об объектах исследования (размер, форма, ориентация).

Исследовались варианты сети: DX*DY = 20xI0, 20x20, 50x20, 60x20, 70x20, 80x20, 90x20, I00x20, I00x40, I20x40, I40x40, I60x40, I80x40, 200x40 м. Каждый вариант DX*DY рассматривался при различных углах ориентации Q относительно ориентации исходной сети: Q = 0, 20, 40, 60, 80, 90, I00, I20, I40, I60°. Исследования проводились по схеме, приведенной в п.2.(табл.3).

Выбор рациональной сети проводился для случаев, когда раз- 19
мер и форма объектов известны точно, а ориентация - с точностью ΔQ: а) $\pm$ I0°, б) $\pm$ 40°, в) $\pm$ 90° (табл.4).

Предварительный анализ результатов экспериментов показал, что наиболее чувствительными параметрами оценки качества сети наблюдений являются погрешность определения площади ΔS и формы исследуемых объектов ΔFM.

С учетом этого в табл.3 дана количественная характеристика качества различных вариантов сетей наблюдений. Обозначения аналогичны принятым выше.

Общую характеристику результатов экспериментов можно дать следующим образом.

При вращении (по часовой стрелке) сетей 20xI0 и 20x20 м в характере картины фактически не отмечено изменений. При вращении же сети 50x20 м не наблюдается существенных изменений. Все внутренние (относительно уровня 60) изолинии сохраняются. При этом заметные деформации (уменьшение площади, изменение формы) претерпевают лишь контуры

(локальный контур - 80, контур - 200).

Т а б л и ц а 3

Результаты экспериментов.
Месторождение "Потенциальное"

DXxDY , м	Q, град.	ΔQ^j	ΔS^j	ΔFM^j	$\overline{\Delta FM}^j$
20xI0	20	0	0,00	0,00	0,00
	60	0	0,02	0,00	0,00
	II0	I0	0,02	0,0I	0,2I
20x20	20	I0	0,I2	0,0I	0,2I
	60	0	0,08	0,0I	0,2I
	II0	0	0,04	0,00	0,00
50x20	20	0	0,04	0,00	0,00
	60	0	0,02	0,0I	0,2I
	II0	0	0,07	0,00	0,00
60x20	20	0	0,05	0,03	0,I2
	60	0	0,I7	0,03	0,I2
	II0	5	0,04	0,03	0,I2
70x20	20	0	0,06	0,06	0,25
	60	0	0,I6	0,02	0,08
	II0	0	0,06	0,00	0,00
80x20	20	0	0,25	0,09	0,37
	60	I0	0,28	0,II	0,46
	II0	I0	0,30	0,07	0,29
90x20	20	0	0,02	0,I3	0,54
	60	I0	0,20	0,03	0,I2
	II0	5	0,06	0,I6	0,67
I00x20	20	0	0,03	0,II	0,46
	60	I0	0,26	0,28	I,I7
	II0	0	0,34	0,26	I,08

Окончание табл.3

I	2	3	4	5	6
I00x40	20 60 II0	0 I0 0	0,05 0,37 0,38	0,I3 0,30 0,25	0,54 I,25 I,04
I20x40	20 60 II0	0 I0 0	0,48 0,I3 0,28	0,09 0,05 0,22	0,38 0,2I 0,92
I40x40	20 60 II0	0 I0 0	0,30 0,59 0,46	0,22 0,47 0,58	0,92 I,96 2,42
I60x40	20 60 II0	0 I0 0	0,33 0,73 0,57	0,25 0,36 0,57	I,04 I,50 2,38
I80x40	20 60 II0	0 I0 0	0,67 0,00 0,67	0,35 0,28 0,59	I,46 I,I7 2,46
200x40	20 60 II0	0 I0 0	0,63 0,09 0,77	0,33 0,52 0,57	I,38 2,I7 2,38

Таблица 4

ΔQ, град.	± I0	± 40	± 90
DX x DY, м	I00x40 (200x40, I00x40)	90 x 20 (200x40, 90x20)	70 x 20 (200x40, 70x20)

При вращении сетей 60x20, 70x20, 80x20, 90x20 м существенных деформаций в характере картины не наблюдается. Сильные деформации претерпевают контуры, ограничиваемые изолинией I60.

При вращении же сетей I00x20, I00x40, I20x40, I40x40, I60x40, I80x40, 200x40 м отмечены существенные деформации исследуемого контура, увеличивающиеся с ростом расстояния между профилями.

Опираясь на результаты, приведенные в табл.3, определим сети наблюдения, рациональные для выделения исследуемого контура при различной априорной информации о нем.

Рациональными будем считать сети минимальной плотности, обеспечивающие $\Delta S \leq 0,3$ и $\Delta FM \leq 0,14$.

4. Результаты ретроспективного анализа, изложенные выше, относятся к конкретным задачным ситуациям. Для распространения полученных результатов на исследование аналогичных объектов необходимо учитывать, как скажутся изменения параметров этих объектов (относительно эталонного) на качестве решения задачи выделения. Это можно сделать, опираясь на результаты методических исследований, изложенные в работе [4].

5. Выше были рассмотрены простейшие ситуации, когда объект выделяется по результатам исследований одним методом. Разработанное обеспечение позволяет решать задачу проектирования систем наблюдений и в случае, когда объект выделяется только по комплексу признаков.

В настоящее время по ряду регионов (в частности, по Восточному Казахстану) имеется информация, позволяющая перейти к типовым физико-геологическим моделям объектов поисково-разведочных работ для различных стадий и подстадий.

Представляется перспективным, опираясь на типовые физико-геологические модели объектов исследований и конкретный экспериментальный материал, определить рациональные сети исследований различными методами на различных подстадиях поисково-разведочных работ, исходя из задач, решаемых каждым методом. Проведенные на основе разработанного обеспечения исследования позволят перейти к решению вопроса о выборе рационального комплекса поисково-разведочных исследований в целом для объектов различных типов в условиях конкретного региона.

Литература

I. Воронин Ю.А., Туренко С.К. Ретроспективный анализ систем наблюдений в геологоразведке за счет моделирования на ЭВМ: Препринт № 462. - Новосибирск, 1983. - 26 с. - В надзаг.: ВЦ СО АН СССР.

2. Туренко С.К. Теоретическое обеспечение ретроспективного анализа систем наблюдений в геологоразведке за счет моделирования на ЭВМ: Препринт № 490. - Новосибирск, 1984. - 44 с. - В надзаг.: ВЦ СО АН СССР.

3. Туренко С.К. Программное обеспечение постановки и решения на ЭВМ задач анализа и планирования геолого-разведочных систем наблюдений: Препринт № 564. - Новосибирск, 1985. - 22 с. - В надзаг.: ВЦ СО АН СССР.

4. Туренко С.К. Использование пакета программ ПЛЭКС для исследования сетей наблюдения при выделении плоских объектов (контуров). - Наст. сб., с. 133-142.

Содержание

ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ МЕТОДЫ В ГЕОЛОГОРАЗВЕДКЕ

Сборник научных трудов

Под редакцией Юрия Александровича Воронина

Редактор Л.И.Бессильных

Ответственный за выпуск В.В.Аксенов

Обложка художника Д.К.Томашевского

Поз. изд. плана № 9

Подписано в печать 20. 10. 86г. МН 12749

Формат бумаги 60x84 1/16 Объем 10,0 п.л., 9,8 уч.-изд.л.

Тираж 400 экз. Цена 70 коп. Заказ № 594

Ротапринт ВЦ СО АН СССР, Новосибирск, 90

Цена 70 коп.