

Подземные массообмен и превращения: распознавание и перспективы использования.

В.В.ИВАНОВ (НПП ГЕО-НТ), И.С.ГУЛИЕВ (Институт геологии АН республики Азербайджан)

Процессы взаимодействия подземных вод с минеральной матрицей пород длительное время являются объектом изучения, особенно интенсивного в рамках гидрогеологических исследований. Важнейший фактор этого взаимодействия (до настоящего времени в недостаточной степени учитываемый) — непрерывная связность всей флюидальной системы Земли, включая наземные атмосферу и гидросферу, составляющие в совокупности сферу обитания живого мира. Пустотное пространство подземной среды непосредственно продолжает пространство обитания, и поэтому его насыщение может быть только непрерывно обновляемым континуумом. Каналы очень малых сечений, через которые это пространство обновляется, определяют несопоставимо более низкие, чем в сфере обитания, скорости обновления и обуславливают подразделение его на подпространства с диффузионным и конвективным режимами обмена. Химические превращения в пустотах детерминируются активностью обновления, поскольку именно его скорости селекционируют возможные реакции по степени их согласованности с привнесом внешнего материала. Наиболее интенсивные превращения сосредоточены по обе стороны от разделов между зонами диффузионного и конвективного обмена — в области контрастов обновления. Фазовые переходы в пустотах связаны с неодинаковым темпом изменения скоростей реакции и транзита в прираздельных пограничных слоях, вызывающим рассогласование превращения и переноса и запороговое пресыщение растворов. Поэтому залежи полезных ископаемых всегда локализованы в приконтактных частях разделов и на самих разделах. Примеры из опыта исследований гидравлических систем Прикаспийской впадины и центрального Урала иллюстрируют эти положения. Трехмерное картирование подземных обмена и превращений позволит с полной ответственностью за возможные последствия выбирать места для заложения подземных водозаборов, газохранилищ, резервуаров складирования промстоков, в т.ч. радиоактивных и химически агрессивных, предвидеть последствия воздействия на природу крупных строительных объектов, искать месторождения полезных ископаемых с минимальными затратами и с минимальным ущербом для окружающей среды и использовать такие щадящие системы разработки, которые учитывали бы возможности природы восстанавливать их ресурсы.

Остановимся на следующих *базовых положениях*:

1. Подземная среда начинается под нашими ногами, и флюиды ее пустотного пространства не могут быть ни чем иным, как непосредственным продолжением сферы нашего обитания, т.е. непрерывно обновляемым континуумом.

2. Принципиально отличает этот континуум от сферы обитания следующая особенность: его обновление осуществляется через систему каналов очень малых сечений. Вследствие изменчивости сечений каналов в широком диапазоне размеров (10^{-6} —0,1 см) и существенно неньютоновских характеристик водных растворов в тонких пленках для инициации течения в любом виртуальном канале пустотного пространства необходимо преодоление некото-

рого начального градиента напора, величина которого определяется минимальным сечением, характером фазового насыщения и распределением параметров состояния вдоль траектории канала [5]. По названной причине следующие черты должны характеризовать флюиды пустотного пространства.

Они резко дифференцированы по интенсивности обновления. Проявлением этой дифференцированности является подразделение континуума на подобласти конвективного (существования течений) и диффузионного (теплого) обмена с формированием гидродинамического и диффузионного слоев вдоль разделов между отмеченными подобластями. Причем, в зависимости от соотношений между начальным градиентом и диапазоном действующих градиентов напора возможно существование подпространств с устойчивым конвективным обменом (в пределах которых действующие градиенты остаются всегда большими начального), устойчивым диффузионным обменом (при обратном соотношении между градиентами) и переменными режимами обмена (конвективным — в период паводка, диффузионным — в период межени).

Основной элемент системы обновления конвективных подпространств — иерархически построенная дренажная сеть с магистральными и опережающими дренами (подобно наземным речным сетям с той лишь разностью, что подземные дренажные системы — существенно трехмерные образования). Обновление рассматриваемых подпространств осуществляется по схеме водораздельно-дренажной дифференциации с рассредоточенными зонами создания напора и разгрузки.

Скорости обновления пустотного пространства в любых его подпространствах всегда несопоставимо ниже характерных скоростей обновления сферы обитания из-за высоких сопротивлений формирующих его каналов. Это предопределяет существование жесткого граничного условия для всех полей подземной среды на разделе со сферой обитания, одинакового для всех подпространств обмена. Так, с приближением к этому разделу концентрации растворенных в подземных водах компонентов стремятся принять равновесные с атмосферой значения, давление и плотность устремляются к значениям атмосферного давления и плотности пресной воды, соответственно, а поле температуры детерминируется ее распределением по поверхности термоклина.

3. В силу отмеченного обновления пространственные распределения концентраций, температур, давлений, плотности и других характеристик водных растворов пустотного пространства обуславливаются, также как и в сфере обитания, сопряженностью транзита и превращения вещества, т.е. сбалансированностью производства и переноса энергии и вещества в любом сечении этого пространства. Управляющий фактор сопряжения — скорость транзита, поскольку именно она селекционирует возможные превращения в зависимости от согласованности скоростей реакций с интенсивностью внешнего привноса. Линейные размеры зон потенциальных превращений и кон-

станты скоростей их реакций относятся к категории отклиkaющихся на внешние воздействия «пассивных» характеристик среды. Соответственно, образование любого компонента водного раствора имеет свои ниши реализации как в диапазоне интенсивностей обновления, так и в особенностях материального состава среды. Из этого положения следует, что на основе анализа пространственной изменчивости химического состава подземных вод возможна реконструкция системы обменных процессов и превращений в пустотном пространстве, т.е. объемное картирование названных процессов.

4. Формирование вторичных компонентно-минеральных ассоциаций (некоторые из которых рассматриваются как полезные ископаемые), обуславливаемое высаживанием каких то компонентов из водных растворов, возможно лишь на участках «рассопряжения» интенсивностей транзита и превращения, т.е. там, где скорость образования компонента превосходит скорость его отвода и где возможно его накопление до порога пресыщения. С этого порога избыток компонента (разница между порогом пресыщения и растворимостью) выделяется в новое агрегатное состояние (твердое или газообразное). Возникновение такого разбаланса обуславливается непрерывностью и инерционностью процессов превращения и переноса и связывается с неодинаковым темпом изменения их скоростей в прираздельных областях. Так, скорости реакции, поддерживаемые конвективным обменом, могут «вторгаться» в прилегающие части диффузионных зон, проводимость которых уже не справляется с отводом производимой продукции. Участки «рассопряжения» представлены как в диффузионных, так и конвективных зонах обмена. Изменение агрегатного состояния вещества неизбежно сопровождается импульсом давления (положительным или отрицательным в зависимости от того, как изменился эффективный удельный объем вещества при фазовом переходе). Однако конечная вариация давления, обуславливаемая этим превращением, зависит исключительно от величины начального градиента, характеризующего зону фазового перехода [8], поскольку его значением определяется, какой избыток или дефицит давления могут быть накоплены в данной части подпространства. Этот фактор (наряду с линейными размерами зон высаживания) определяет и объемы отлагаемой вторичной продукции, в частности, запасы месторождения, если речь идет о полезном ископаемом. Баланс вещества в рассматриваемых ассоциациях обеспечивается сбросом его избытка или погашением дефицита при переходах градиента давления через начальный порог. Соответственно, пространственное положение рассматриваемых ассоциаций контролируется: 1) контуром ниши образования и устойчивости данного компонента или компонентов и 2) локализацией особых подпространств подземного обмена, в которых транзит и превращения рассопрягаются. Запасы отложенного материала таких ассоциаций определяются значениями начального градиента, и проявляются они могут специфическими вариациями в поле давления. Это значит, что область вероятной локализации подобных ассоциаций может прогнозироваться из анализа подземного обмена, а факт их реализации диагностироваться по избытку или дефициту давления.

5. Основную роль в специализации химических превращений, а, соответственно, и в локализации ниш формирования тех или иных компонентов играют разделы между зонами диффузионного и конвективного обмена. Вдоль этих разделов развиваются гидродинамический и диффу-

зионный пограничные слои, поперек которых уже в силу отмеченного «отбора» реакций в зависимости от скорости течения не может не возникнуть зона высоких перепадов химических потенциалов. Сама поверхность раздела не может не стать областью сосредоточения различных химических превращений, стимулируя, тем самым, развитие перепадов химических потенциалов и потоки на поверхность раздела и со стороны диффузионных зон. Таким образом, примыкающие к рассматриваемым разделам с разных сторон диффузионные пограничные слои конвективной зоны и высокоградиентные области диффузионной составляют в совокупности потенциальные полости наиболее интенсивных химических превращений подземной среды, содержащие ниши образования и устойчивости различных химических компонентов.

6. Раздел между зонами диффузии и конвекции контролирует и положение участков рассопряжения, т.е. и локализацию вторичных компонентно-минеральных ассоциаций. Причем, связь ассоциаций с разделами должна быть более тесной, чем связь ниш с разделами, поскольку участки рассопряжения — это те части ниш образования, примыкающие к разделам, на которых скорости превращений обгоняют скорости переноса. Следовательно, рассматриваемый раздел — тот основной репер, к которому должны стягиваться месторождения самых различных полезных ископаемых как со стороны конвективных, так и диффузионных зон, а сечения этого раздела с характерными поверхностями (например, поверхностью постоянной альтитуды или подошвой регионально представленного коллектора) — есть путеводные нити геолога, следуя вдоль которых он с неизбежностью окажется рядом с контуром или в контуре залежи того или иного полезного ископаемого в пределах или вблизи данной поверхности.

7. Вероятные «аттракторы» вместилищ вторичных ассоциаций в прираздельной полости — линии пересечения ниш образования компонента с зонами диффузионного обмена. К числу «аттракторов» вторичных ассоциаций относятся: 1) экстремумы вариаций избытка или дефицита давления, причем амплитудные характеристики последних являются мерой запаса материала, накопленного в ассоциации; 2) экстремумы положительных вариаций коэффициента метастабильности, характеризующие неустойчивость раствора к данному фазовому переходу.

8. Любая ассоциация такого рода — балансовая составляющая самоорганизовавшейся системы обмена и превращений. Соответственно, каждая из них при нарушении исходного состояния под внешним воздействием (каковым может быть разведка и разработка месторождения) имеет свой потенциал восстановления, если уровень воздействия не превзошел некоторый критический порог, т.е. в области локализации ассоциации после устранения воздействия возможна регенерация изъятого из нее материала с той или иной скоростью, если только это воздействие не привело к принципиальной перестройке исходной системы. Наряду с определением промысловых характеристик любого месторождения, следует оценивать и его способность к саморегенерации, и вероятную скорость восстановления его исходного состояния, и допустимый, не приводящий к необратимым последствиям, уровень воздействия на месторождение.

9. При разработке ассоциаций, представленных жидкими и газообразными составляющими, в пределах месторождения формируются и развиваются вторичные дре-

нажные сети как результат сопряжения заданного расположения стоков и источников (отбирающих и нагнетательных скважин), определяющих структуру поля действующих градиентов, и особенностей строения пустотного пространства среды вмещения, контролирующих распределение начальных градиентов. Наиболее полное извлечение материала с оптимальной продуктивностью может быть достигнуто только в том случае, если его отбор производится из русел магистральных дрен, а оттесняться он будет от замыканий водоразделов в опережающие дрены. Соответственно, мониторинг, а, по возможности, и формирование, и коррекция таких сетей должны стать обязательным элементом технологии разработки месторождений рассматриваемого типа.

Из базовых положений можно сделать следующие выводы:

1. Пустотное пространство подземной среды — существенно особая ее подобласть, и эта особенность состоит в том, что обновление его материального насыщения осуществляется несопоставимо более интенсивно, чем обновление материала межпустотной матрицы. По этой причине пустотное пространство должно рассматриваться как самостоятельная система, характеристики которой не прогнозируются из материального состава и тенденций развития межпустотной матрицы.

2. Изменчивость интенсивности обновления этой системы — решающий фактор, контролирующий и положение зон специфических химических превращений, и размещение зон специфических фазовых переходов в ее пределах, и пространственную изменчивость ее химического состава, и локализацию широкого круга залежей полезных ископаемых, в т.ч. нефти и газа. Потребительская ценность подземной среды и перспективы ее рационального (в смысле сохранения потенциала регенерации исходных характеристик) народнохозяйственного использования для целей водоснабжения, захоронения отходов, подземного хранения газа и других веществ, обеспечения народного хозяйства энергетическим и минеральным сырьем определяются именно таким фактором. По этой причине получение информации о подземном обмене и превращениях выдвигается как совершенно самостоятельная назревшая задача геологии, не возмещаемая приобретением никаких других геологических и геофизических данных. Использование подобной информации должно стать обязательной составляющей процессов поиска, разведки и разработки месторождений.

3. Источником этой информации может быть только объемное картирование подземного обмена и превращений на основе анализа пространственной изменчивости и мониторинга естественных полей концентраций, параметров состояния и плотности [7].

К объектам картирования должны быть отнесены следующие подпространства, поверхности и трассы подземной среды:

1. Зоны конвективного и диффузионного обмена и, прежде всего, разделы между ними. В рамках операции выделения этих объектов должны быть реконструированы рельеф ложа безнапорных подземных потоков и геометрические характеристики полости разрезов, вмещающих напорные потоки. Кроме определения стационарного положения этих разделов в пространстве, в процессе мониторинга должны быть оценены масштабы амплитуд и периоды колебаний указанных положений.

2. Связные подобласти подземных течений (потоки) и схемы их водораздельно дренажной дифференциации. В задачи такой операции входит реконструкция поля векторов скоростей течений, трассирование магистральных дрен и линий водоразделов и оценка характерных скоростей, расходов и масштабов амплитуд колебаний этих характеристик между пиками паводка и межени в различных сечениях дрен.

3. Ниши продуцирования и потребления компонентов водных растворов, как «составоформирующих» (двуоксид углерода, азот, углеводороды, сероводород, хлор-, серо-, натрий-, кальцийсодержащие соединения и др.), так и включающих элементы потребительской ценности (Au, U, Fe, Cu и т.д.). Выделение такого рода ниш выполняется по схемам пространственной изменчивости распределений обильностей источников и стоков изучаемых компонентов. Под обильностью источников (стоков) понимается количество данного компонента, образующееся (потребляющееся) в единице объема порового раствора в единицу времени. В данной работе в качестве размерной единицы для газов используется величина: нормальные (т.е. приведенные к атмосферным условиям при давлении 0,1 МПа и температуре 20 С) кубические сантиметры газообразного компонента в отношении (см^3 раствора год)⁻¹ лет¹.

4. Зоны фазовоустойчивых состояний, прежде всего, по отношению к газовыделению, а также ко всем тем изменениям агрегатного состояния, при которых происходит высвобождение из растворов компонентов потребительской ценности. Оконтурирование таких зон связано с анализом полей соответствующих коэффициентов метастабильности.

5. Зоны текущих и состоявшихся фазовых переходов, как газовыделения, так и высаживания твердоагрегатных комплексов раствора, соответствующего различным процессам рудообразования. Основной вклад в локализацию этих зон вносит анализ пространственной изменчивости поля избыточного или недостающего давления.

6. Специальными объектами картирования должны стать те подпространства подземной среды, с которыми может быть связано возникновение катастрофических ситуаций, как при техногенном воздействии человека на природу (например, при проведении вскрышных, горно-проходческих или буровых работ), так и при отсутствии какого-либо воздействия, вследствие спонтанного развития естественной системы данного подпространства. К подпространствам такого рода могут быть отнесены зоны высокоамплитудных вариаций избыточного давления, области развития кислых газов и других агрессивных компонентов и т.д.

Промышленные способы картирования обмена и превращений еще предстоит разработать, опробовать и унифицировать. Каркасом для их конструирования могут стать принципиальные основания, развитые в работах [3, 4, 6, 9, 10, 11] и в наиболее развернутом виде представленные в публикации [7]:

1. Решение задач разделения континуума подземных вод на подпространства с конвективным и диффузионным обменом и реконструкции полей векторов скорости течения и трассирования траекторий магистральных дрен и линий водоразделов в конвективных подпространствах может быть выполнено на основе анализа пространственной изменчивости и мониторинга полей концентраций гелия (для области «медленных вод» — скорости течений менее 30 м/год) и трития (для области «быстрых вод» — скорос-

ти течений более 10 м/год) [6, 7]. Использование названных полей для решения перечисленных задач обеспечивается тем, что, во-первых, гелий и тритий непрерывно продуцируются в земных сферах (гелий — в породах литосферы благодаря присутствию в них альфа-излучателей — изотопов урана и тория, тритий — в верхних слоях атмосферы при взаимодействии космических лучей с ее компонентами); во-вторых, соотношения между интенсивностями их продуцирования и перераспределения обеспечивают нивелирование всех неоднородностей в распределениях обильностей их источников; в-третьих, их концентрации всегда регистрируются в транзитивной подобласти, дифференциация которой по режимам и скоростям переноса является определяющим фактором формирования изменчивости распределений таких концентраций. Это и позволяет подразделить рассматриваемую подобласть на интервалы с диффузионным и конвективным обменом и реконструировать профили скоростей в пределах последних.

2. Выделение ниш продуцирования и потребления различных компонентов в континууме вод выполняется оцениванием обильности их источников и стоков по изменчивости производных полей этих компонентов с учетом реконструированных на предшествующем этапе системы обменных процессов и поля скоростей течений [7]. Данные операции базируются на допущении, что процессы перераспределения — превращения вещества в подземном континууме могут быть описаны уравнением конвективной диффузии в стационарном варианте при постоянных значениях коэффициентов диффузии рассматриваемых компонентов.

3. Зоны фазово-неустойчивых состояний по отношению к данному фазовому переходу оконтуриваются на основе анализа пространственной изменчивости коэффициента метастабильности, представляющего отношение разности содержания изучаемого компонента (комплекса) в растворе и его растворимости к разности между пороговым достижимым пресыщением раствора этим компонентом и растворимостью. И растворимость, и достижимое пресыщение есть функции параметров состояния и состава раствора. Значение 0 коэффициента представляет собой области насыщения, отрицательные значения — области недонасыщенных фазово-устойчивых состояний, положительные значения до 1 — области метастабильных фазово-неустойчивых состояний, 1 — области полифазного насыщения. Состояние раствора по отношению к спонтанному газовыделению оценивается с использованием весового суммирования содержаний CH_4 , CO_2 , N и H_2S в растворе. При взвешивании вклада каждого компонента учитываются его содержание и растворимость в условиях нахождения раствора. Состав выделившегося газа прогнозируется в рамках этих расчетов [4, 7].

4. Наличие зон полифазного насыщения, в частности зон газонасыщения, диагностируется по изменчивости поля избыточного над гидростатическим давления. Избыточное давление оценивается как разность между измеренным давлением и его гидростатической составляющей, рассчитываемой по вертикальному распределению плотности. Эти построения позволяют: 1) наметить положение в пространстве линий «аттракторов» вместилищ вторичных ассоциаций по точкам экстремумов локальных вариаций, 2) реконструировать образ изменчивости распределения начального градиента [5, 7].

5. Общепринятых критериев отнесения подпространств подземной среды к категории потенциально опасных,

по-видимому, пока еще не существует. Как уже отмечалось, к таковым должны быть отнесены зоны высоких избыточных давлений, зоны развития высоких содержаний кислых газов, как в газовой фазе, так и растворенном состоянии и, возможно, зоны высоких температурных градиентов, диагностирующие интенсивные экзотермические превращения. Очевидно, что список претендентов на отнесение к категории такого рода подпространств будет уточняться и, возможно, пополняться.

Примеры дифференциации пустотного пространства подземной среды по режимам и интенсивности обменных процессов и выделения зон специфических превращений. Способы исследования, перечисленные в предшествующем разделе, испытывались на фактическом материале, характеризующем поля концентраций He, CH_4 , N_2 , CO_2 , температуры, давления, общей минерализации и плотности в водных растворах гидравлической системы северного Прикаспия, преимущественно Прикаспийской впадины [7]. Исходные выборки были представлены результатами испытаний различных горизонтов отложений впадины. Точки опробования спорадически разбросаны в объеме напластований, покрывая глубинный интервал от поверхности до примерно 5000 м, и каждое из исследуемых полей в данной точке представлено вектором значений, содержащим горизонтальные координаты, глубинную отметку и значение исследуемого признака. С помощью системы объемной интерполяции В.И.Аронова [1, 14] построены трехмерные модели исследуемых полей с пересчетом значений в точки регулярной сети. Эти модели составили основу для выполнения операций разделения пустотного пространства по режимам и интенсивностям обновления и выделения зон протекания специфических превращений. Предлагаемые ниже примеры призваны проиллюстрировать обоснованность *Базовых положений* и целесообразность выполнения операций картирования, перечисленных в разделе *Объекты картирования*.

На рис. 1, в несколько измененном и дополненном виде, заимствуемом из работы [7], представлены результаты интерпретации вертикальных зависимостей изучаемых признаков в одной из точек планшета Прикаспийской впадины (ее положение показано на рис. 2, В). Рядом с стратиграфической колонкой (см. рис. 1, А) выделены интервалы диффузионного и конвективного обмена и воспроизведены скоростные профили в конвективных интервалах (см. рис. 1, Б). В соответствии с реконструкцией полость в интервале между отметками 1,7 км и 4,2 км (сечение 2,5 км) занимает однородный гидродинамический слой. Это построение свидетельствует о резкой асимметрии профиля течения и смещении стрежня потока к кровле полости. Скорость течения в стрержне составляет почти 1 м/год.

Вертикальные кривые распределения обильностей источников (положительные значения) и стоков (отрицательные значения) CH_4 , CO_2 и N_2 вдоль изучаемого направления показаны на рис. 1, В. В сечении полости они формируют гармонические последовательности с возрастающими амплитудами в направлении увеличения скорости течения. Обильности CH_4 и CO_2 характеризуются почти синфазными гармониками, однако интенсивность образования CO_2 и темп изменения амплитуд ее гармоник по слою остаются заметно меньшими по сравнению с аналогичными характеристиками CH_4 . Обе эти последовательности протифазны по отношению к гармоникам обильности N_2 , причем амплитуды обильностей CH_4 и N_2 очень

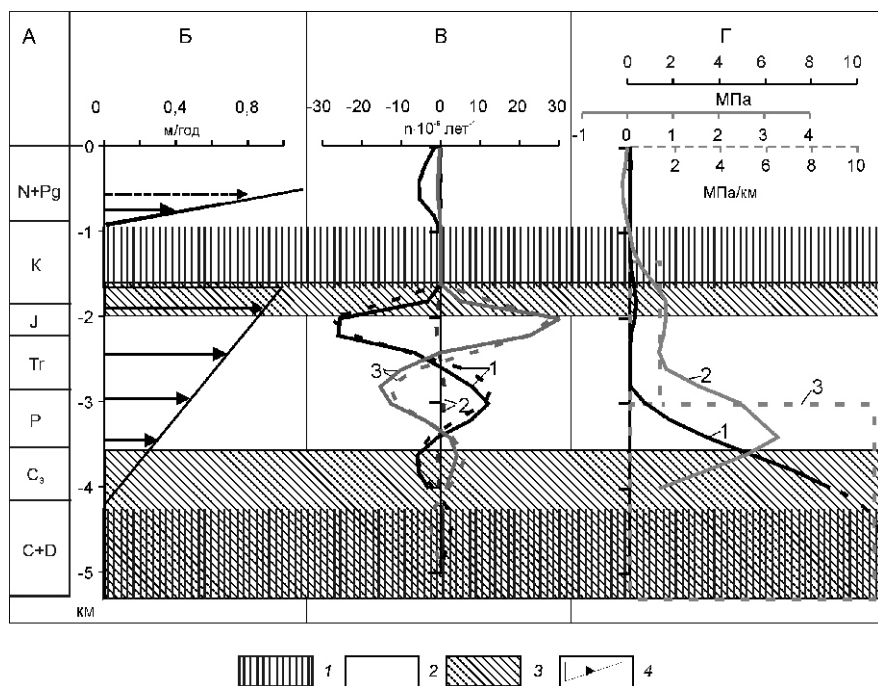


Рис. 1. Обмен и превращения, восстановленные по вертикальным распределениям концентраций He, CH₄, N₂, CO₂, давления, температуры, минерализации и плотности в одной из точек Северного Прикаспия:

А — стратиграфическая колонка; Б — эпора скорости течения, м/год; В — распределение обильностей источников и стоков ($n \cdot 10^6 \text{ лет}^{-1}$): 1 — CH₄; 2 — CO₂; 3 — N₂ (сплошная линия — фактическое, штриховая — теоретическое); Г — распределение по глубине: 1 — избыточное давление, МПа; 2 — коэффициент метастабильности; 3 — начальный градиент, МПа/км; зоны: 1 — диффузии, 2 — конвекции, 3 — газовой выделения; 4 — эпоры скорости течения

близки по абсолютной величине. Такие соотношения свидетельствуют о глубокой взаимосвязи всех этих превращений и вероятном едином исходном комплексе веществ, обеспечивающем их протекание, и едином механизме «переключения» реакций на интервале. Поведение обильностей F рассматриваемых компонентов моделируется зависимостью вида:

$$F=0 \quad 0 < x < 1,7 \text{ км};$$

$$F = A \exp(x/1,7) \sin \frac{x}{0,8} \quad 1,7 < x < 5 \text{ км}. \quad (1)$$

Причем, для кривой обильности CH₄ $A = 40,45 \cdot 10^6 \text{ лет}^{-1}$, для аналогичной кривой N₂ $A = 40,45 \cdot 10^6 \text{ лет}^{-1}$, для CO₂ $A = 1,43 \cdot 10^6 \text{ лет}^{-1}$. Декремент для кривых CH₄ и N₂ равен 0,95 км⁻¹, CO₂ — 0,35 км⁻¹. Полупериод всех синусоид взят равным 0,8 км, начало отсчета размещено на отметке 1,7 км в кровле полости. Моделирующие зависимости показаны на рис. 1, В. Они сходны с исходными кривыми. Это дает основание воспользоваться аппроксимирующей зависимостью для прогнозирования характера и масштаба превращений на продолжении исследованной зоны, в подстилающем ее диффузионном теле (в интервале 4... 5 км). Экстраполяция свидетельствует, что на этом интервале должен быть представлен полупериод продуцирования CH₄ и CO₂ с обильностями источников в амплитудах гармоник $2,7 \cdot 10^6 \text{ лет}^{-1}$ и $0,5 \cdot 10^6 \text{ лет}^{-1}$ соответственно, и полупериод потребления N₂ с обильностью стоков в амплитуде, равной $2,7 \cdot 10^6 \text{ лет}^{-1}$.

Распределения коэффициента метастабильности по отношению к спонтанному газовойделению и избыточного над гидростатическим давления показаны на рис. 1, Г. В рассматриваемых зависимостях отмечаются по два максимума. Пик верхнего относительно малоамплитудного экстремума кривой коэффициента метастабильности находится на той же отметке, что и пик азотопродуцирования. Однако сам рассматриваемый экстремум характеризуется более пологой формой и занимает существенно больший глубинный ин-

тервал, чем сопоставляемая область азотопродуцирования. Пик нижнего более высокоамплитудного максимума рассматриваемой кривой регистрируется на отметке 3,4 км. Он приурочен к узлу нулевых обильностей анализируемых превращений и находится на крыле нижнего экстремума избыточного давления примерно в 200 м от отметки максимума его градиента. Пик верхнего малоамплитудного (0,27 МПа) максимума кривой избыточного давления находится на отметке 1,8 км вблизи кровли полости рядом с пиком азотопродуцирования, относительно которого он сдвинут несколько вверх — ближе к кровле. Нижний максимум в прослеженной части глубинного интервала представлен крутым подъемом кривой, достигающем на отметке 4 км значения 8,3 МПа. Не исключено, что положение нижнего пика давления совпадает с отметкой амплитуды нижнего (гипотетического) полупериода метанопродуцирования (см. рис. 1, В). Отметками максимумов градиентов на крыльях анализируемых экстремумов ограничены интервалы (они показаны горизонтальными полосами с косой штриховкой), включающие подобласти формирования избыточного давления. Разделы между зонами конвекции и диффузии находятся внутри этих интервалов.

Итак, в рассматриваемой полости конвективного обмена и прилегающих участках диффузионных зон функционирует транспортно-реакционная динамическая система со сложной структурой самоорганизации. Вне интервалов (см. рис. 1, встречная косая штриховка), производство и перенос всех перечисленных компонентов сбалансированы. В пределах этих интервалов находятся зоны с распряженными интенсивностями продуцирования и переноса, т.е. зоны газовой выделения. В верхнем интервале выделяющийся газ преимущественно азотный по составу, в нижнем он содержит в основном CH₄ и CO₂. Фазово-неустойчивые состояния диагностируются экстремумами коэффициента метастабильности, верхний из которых охватывает «азотную» относительно маломощную зону газовой выделения, а нижний, по-видимому, представляет верхний пик обрамления очень мощной «метаново-углекислой» неоконтуренной снизу зоны. Полифазность порового насыщения диагностируется пиками избыточного давления. Амплитуда верхнего (азотного)

пика 0,27 МПа, максимальный градиент на крыле 0,77 МПа/км, прогнозируемая амплитуда нижнего (метанового и углекислого) пика — 10 МПа, градиент на крыле — 10,3 МПа/км. Газонасыщенность пустотного пространства связана с избыточным давлением P простым отношением:

$$\frac{P}{K}, \quad (2)$$

где K — модуль объемного сжатия конденсированных фаз среды, МПа [4]. Максимальное газонасыщение в зоне достигается при равенстве между скоростями выделения и стравливания газа. Оценки максимальных градиентов, соответствующие этому состоянию в зависимости от того, какой из механизмов стравливания (диффузионный или конвективный) является преобладающим, рассчитываются из приближенных равенств:

$$\frac{P}{z} = I_0 - \frac{h}{v} KF; \quad (3)$$

$$\frac{P}{z} = I_0 - \frac{1}{v} KF, \quad (4)$$

где F — обильность источников компонента (CH_4 , N_2 , CO_2 и др.), выделяющегося в собственную фазу, — пьезопроводность, h — мощность зоны рассопряжения, v — скорость течения, $\frac{P}{z}$ — максимальный из вертикальных градиентов избыточного давления, I_0 — начальный градиент.

Вклады вторых составляющих правой части равенств в оцениваемый градиент рассчитаем отдельно для каждой из зон газовыделения. Предположим, что для метаново-углекислой справедливо равенство (3), для азотной — (4). Для азотной зоны положим: $v \sim 1$ м/год, $K \sim 500$ МПа, $F \sim 5 \cdot 10^6$ лет⁻¹, метаново-углекислой — $K \sim 500$ МПа, $F \sim 2 \cdot 10^6$ лет⁻¹, $h \sim 2000$ м, ~ 1000 м²/год. Расчетные значения вкладов равны: 2 МПа/км для метаново-углекислой и 0,2 МПа/км для азотной зон. По сравнению с зарегистрированными максимумами градиентов (10,3 и 0,77 МПа/км) это заметно меньшие величины, т.е. оцениваемые составляющие вносят небольшой вклад в максимальный градиент, и его значение в решающей степени определяется величиной начального градиента. Если за меру абсолютного значения градиента принять максимум его значения на крыле экстремума, а за отметку границы области приложения данного значения градиента — пересечение касательной максимальной производной к кривой экстремума с вертикалью, то, опираясь на эти посылки, можно построить модель вертикального распределения этой характеристики. Ломаная линия (см. рис. 1, Г) и есть реконструированное указанным образом ступенеобразное распределение начального градиента. Азотная зона газовыделения локализована в пределах ступени амплитудой 0,77 МПа/км, заключенной в интервале между отметками 1,4... 3,05 км, метаново-углекислая зона — в пределах нижележащей ступени амплитудой 10,3 МПа/км, простирающейся до глубин, вероятно, превышающих 5 км. Опираясь на построенную модель распределения начального градиента, с помощью соотношений, обоснованных в работе [8], связывающих площадной запас газа (то есть количество газа в зоне, приходящееся на 1 м² поверхности Земли) с амплитудой ступени, для каждой из рассматриваемых зон можно рассчитать значение этой характеристики. Расчет показал, что площадной запас азотного газа, сосре-

доточенного в интервале отметок 1,4... 2,2 км оценивается значением 540 м³/м², а запас метаново-углекислого газа в интервале от 3 км должен превышать 33 600 м³/м². Поскольку уровень запасов накапливаемого газа определяется значениями начального градиента, а составляющие градиента регистрируемого избыточного давления $\frac{P}{x}$, $\frac{P}{y}$, $\frac{P}{z}$ представляют меру оценок соответствующих составляющих начального градиента, положительная величина

$$J = \sqrt{\frac{P^2}{x} + \frac{P^2}{y} + \frac{P^2}{z}}, \quad (5)$$

есть обобщенная характеристика удерживающих способностей подземной среды, позволяющая дифференцировать ее по ожидаемой продуктивности.

Производная по времени от газонасыщенности характеризует темп газовыделения. Данная величина может рассматриваться и как скорость регенерации запасов зоны накопления, т.е. как количественная мера потенциала восстановления ее запасов. Потенциалы изучаемых зон — азотной и метаново-углекислой оценены в $5 \cdot 10^6$ лет⁻¹ и $2 \cdot 10^6$ лет⁻¹ соответственно). Нефтегазовые залежи представляют малые части зон накопления, занимающие те полости разрезов, где газонасыщенность пустотного пространства оказалась выше неудаляемого порога и где вследствие такого соотношения оказалась возможной гравитационная сепарация составляющих порового флюида по плотности [8]. Месторождением следует считать всю зону накопления и организовывать отбор материала из включенных в нее залежей таким образом, чтобы, во-первых, каждая из них становилась газонетесборной областью для некоторой примыкающей к ней части зоны накопления и, во-вторых, чтобы процессы восстановления запасов зоны продолжались.

Построение на рис. 2, заимствуемое из работы [7], но трансформированное и дополненное, представляет сечение отложений Прикаспийской впадины горизонтальной плоскостью с альтитудой 1 км.

Расположение зон диффузии и конвекции, пункты локализации залежей газа нефти, находящихся в интервале 0,8... 1,2 км, и поле скоростей, в котором проекция каждого вектора представлена стрелкой, отражающей направление течения и абсолютную величину вектора, показаны на рис. 2, А. Залежи расположены вблизи разделов, и случайно в конвективной зоне и на самих разделах встречены либо нефтяные, либо нефтегазовые залежи, а на некотором удалении от разделов — в диффузионных зонах — газовые. Отмечаемая закономерность свидетельствует о том, что материал залежей — объект преобразования, в процессе которого увеличивается молекулярность углеводородных соединений, и что темп этого преобразования сопряжен с интенсивностью обмена. Границы сечений разделов между зонами диффузии и конвекции, как отмечалось выше, сопоставимы с путеводными нитями, в прилегающей полоске которых рассыпаны бусины пунктов месторождений углеводородов. Сечением вскрываются два потока толщи Прикаспийской впадины — верхний безнапорный, представленный в областях за внешними границами диффузионных зон, и первый напорный, представленный во внутренних лакунах этих зон. Значения

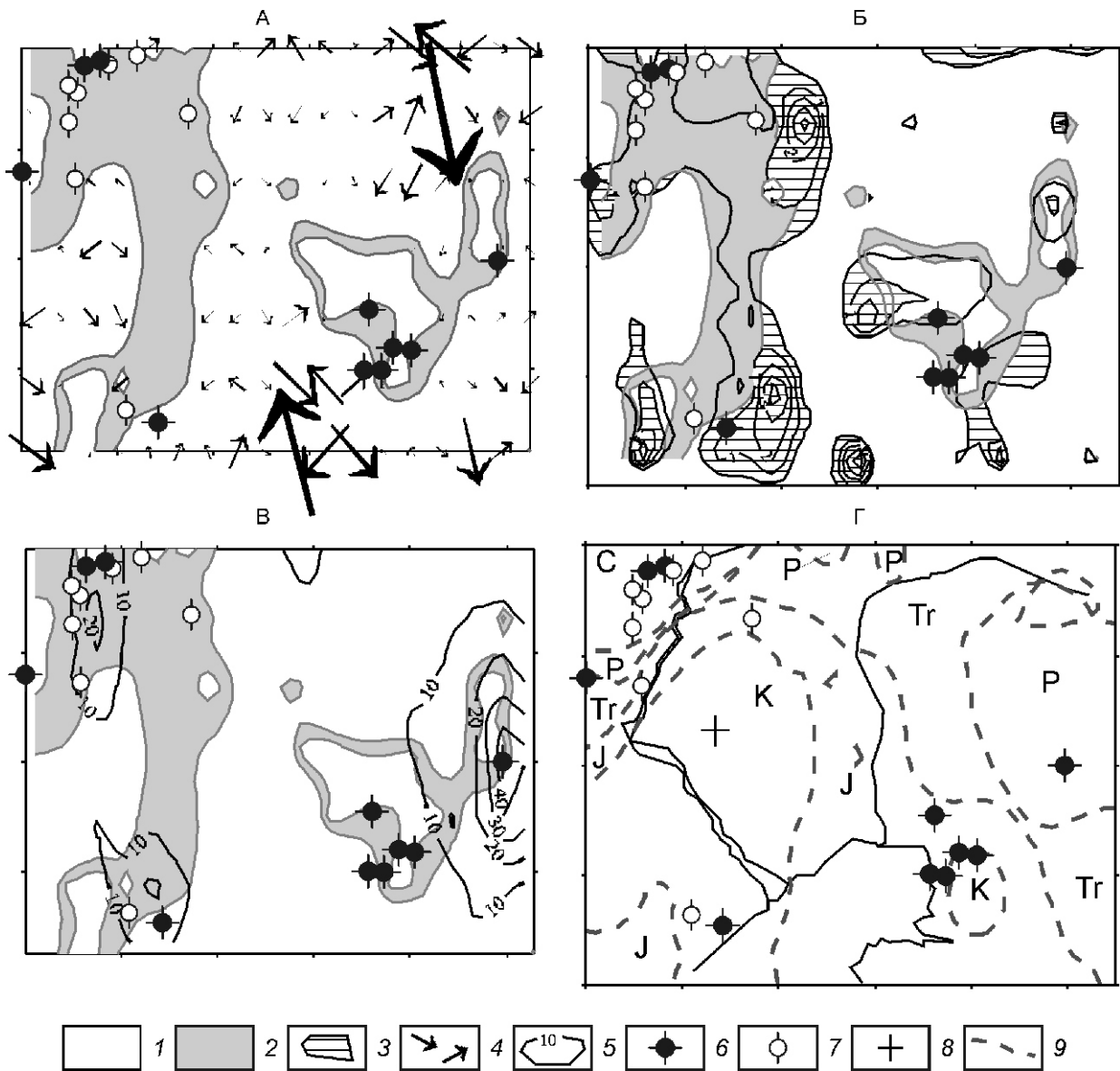


Рис. 2. Соотношения между режимами обмена, метанообразования и распределением начального градиента в горизонтальном сечении Прикаспийской впадины:

зоны: А — диффузии и конвекции, Б — метанообразования с изолиниями обильности источников; В — изолинии начального градиента; Г — схематическая геологическая карта сечения; зоны: 1 — конвекции, 2 — диффузии, 3 — метанообразования; 4 — векторы скорости течения; 5 — изолинии начального градиента, МПа/км; залежи: 6 — нефтяные и нефтегазовые, 7 — газовые; 8 — точка локализации вертикальных распределений (см. рис. 1); 9 — границы

векторов скоростей первого из них заключены в интервале 0—40 м/год, второго характеризуются на порядок меньшим интервалом. Изменчивость направлений векторов — признак организации течений в систему разномасштабных и разнонаправленных дрен.

Кроме уже рассмотренных разделов и залежей на рис. 2, Б представлены области с положительными избытками источников CH_4 (в $\text{н} \cdot 10^6 \text{ лет}^{-1}$). Ниши метанообразования отчетливо контролируются разделами между зонами диффузии и конвекции, причем пики метанопродукции находятся в конвективных зонах на заметном удалении от ближайшего раздела. Почти все залежи размещены в непосредственной близости от линии нулевой избыточности, на участках низкого и умеренного метанопродукции. Это подтверждает выдвинутую гипотезу о

том, что расслоение обмена и превращения связано с различием в темпах изменения скоростей реакции и транзита в окрестности разделов и объясняет, почему эти разделы находятся внутри зон газовыделения.

Изолинии поля показателя J (МПа/км), отражающие распределение абсолютного значения начального градиента и потому характеризующие дифференциацию сечения по ожидаемым запасам, представлены на рис. 2, В. Наибольшие запасы прогнозируются в месторождениях восточной части планшета ($J \sim 35$ МПа/км), наименьшие — в месторождениях, находящихся в пределах контуров с изолинией 0. Геологическая карта территории в рассматриваемом сечении, где показаны те же месторождения, демонстрируется на рис. 2, Г. Если на предшествующих построениях локализация месторождений объясняется исходя из

расположения разделов между зонами диффузии и конвекции и зон метанообразования, то размещение их на геологической карте выглядит случайным, не связанным с какими-то особенностями геологического строения. Не прогнозируется из этого строения и дифференциация среды по ожидаемым запасам.

Еще один пример призван показать, что рассогласность транзита и превращения предопределяет также осаждение и накопление рудных комплексов, вследствие чего разделы между зонами диффузии и конвекции являются контролирующим фактором и для локализации залежей рудных месторождений. Разрез скв.3120, пройденной в пределах рудного поля Березовского месторождения коренного золота центрального Урала, в несколько измененном виде заимствуемый из работы А.К.Юркова [12], представлен на рис. 3. Образцы воды на анализ отбирались из необсаженных устойчивых стволов скважин с помощью специально сконструированного пробоотборника, обеспечивающего сохранение условий отбора, через продолжительное время (от нескольких месяцев до нескольких лет) после завершения бурения. Поэтому распределения концентраций гелия, регистрируемые в скважинных столбах воды, должны быть близки к равновесным соотношениям с полями пустотной части вмещающей среды или, во всяком случае, качественно адекватно отображать их изменчивость. Исходя из подобного предположения, изучаемый

разрез дифференцирован по режимам обмена, а в горизонтах конвективного обмена выполнена качественная реконструкция эпюр скорости течения [6]. Разрез скважины слагают глубокометаморфизованные комплексы, осложненные интрузиями основных и ультраосновных пород и пронизанные кварц-золоторудными телами различной мощности и морфологии. Никакой приуроченности рудных жил к породам определенного типа не наблюдается, зато все они расположены либо непосредственно на разделах, либо вблизи разделов между горизонтами диффузионного и конвективного обмена. Отмечаемая приуроченность позволяет сделать следующие выводы: 1) золотосодержащий кварц накапливается в растворах до порога закритического насыщения вблизи разделов между зонами диффузионного и конвективного обмена; 2) зоны накопления охватывают интервалы, включающие основания гидродинамических слоев у разделов и прилегающие подобласти диффузионных зон, причем и большая часть мощности этих зон, и пик накопления приходится на интервалы диффузионного обмена. Аналогичные приуроченности, по материалам рассматриваемой работы, отмечены для полиметаллических и железорудных проявлений.

В заключение раздела рассмотрим пример прикладного использования информации об обмене и превращениях для оконтуривания перспективных на нефть и газ земель на различных горизонтах геологических разрезов. Из рас-

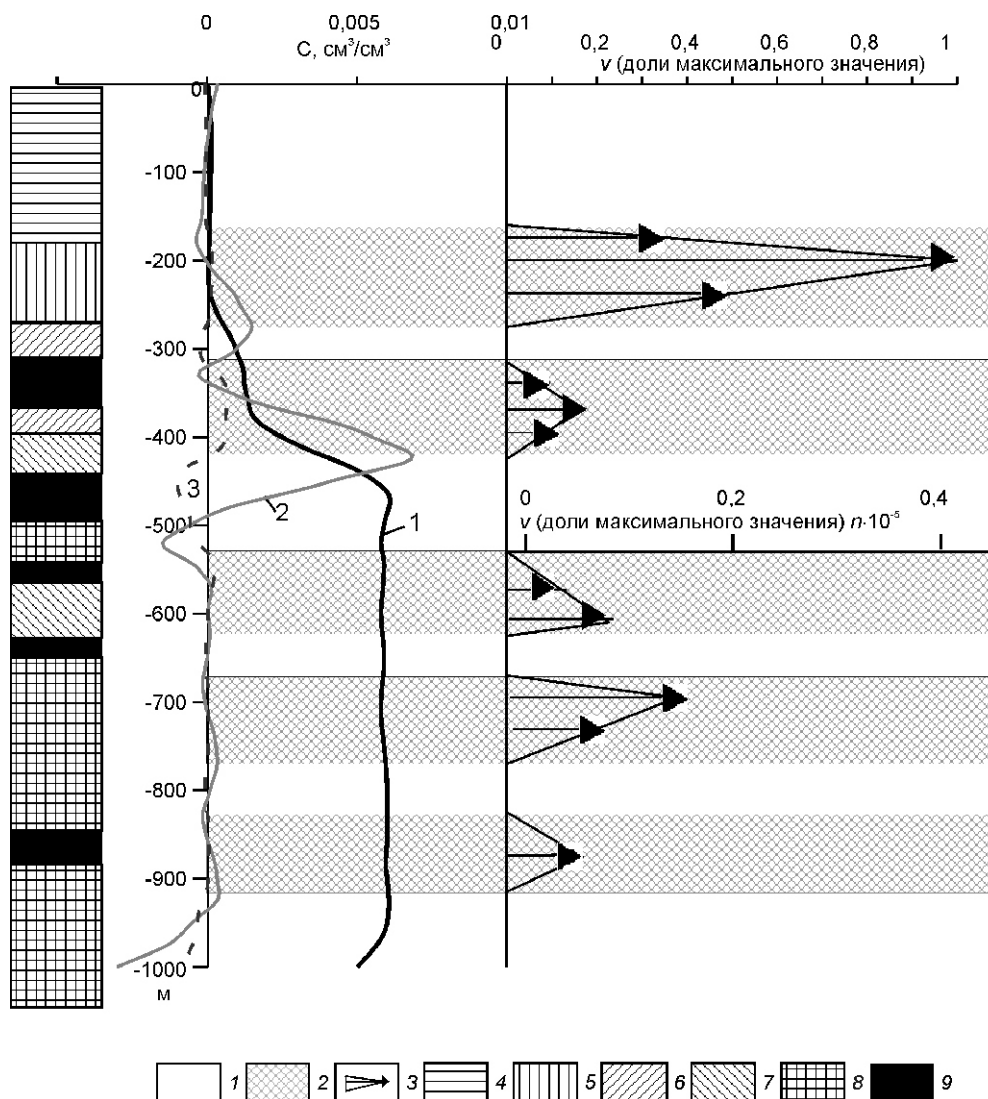


Рис. 3. Распределение концентраций гелия по стволу скв.120 золоторудного Березовского месторождения и интервалы разреза с диффузионными режимами и конвективным режимом обмена, выделенные с помощью этого распределения:

1 — кривая распределения концентраций гелия; производная кривой: 2 — первая, 3 — вторая; зоны: 1 — диффузии, 2 — конвекции; 3 — эпюры скорости течения v (доли от максимальной оценки); 4 — габбро; 5 — серпентиниты; 6 — талько-карбонаты; 7 — диабазы; 8 — кварц-хлорит-эпидоты; 9 — кварцевые жилы, содержащие золото

смотренного ранее материала следует, что линии пересечения поверхностей разделов между зонами с различным режимом обмена и поверхностей нулевой изобилиности определяют положение множества особых точек подземной среды, которые могут рассматриваться как своеобразные «полюса притяжения залежи», т.е., в некоторой окрестности точек этой линии должна располагаться залежь. Если изучаемую часть подземной среды мысленно разделить последовательностью сечений, параллельных поверхности Земли (субгоризонтальных), то в качестве меры прогностической силы полюса для данного сечения можно рассматривать расстояние между полюсом и точкой локализации ближайшей к полюсу залежи, находящейся в данном сечении. Эту меру в дальнейшем будем называть радиусом притяжения. Очевидно, что чем меньше значение радиуса, тем большей силой обладает выделенный полюс.

Газовыделение всегда сопровождается импульсом избыточного давления [8]. И хотя формирующаяся в этом процессе вариация поля избыточных давлений контролируется распределением начального градиента и мощностью области его приложения, положение самой зоны газовой выделения точно диагностируется максимумом этой вариации (при этом амплитуда максимума также детерминирована начальным градиентом и геометрией области его приложения). Максимум должен располагаться либо на разделе между зонами конвективного и диффузионного обмена, либо в ближайшей его окрестности. Точки пересечения упомянутых субгоризонтальных поверхностей с субвертикальной осью, соединяющей локальные максимумы рассматриваемой вариации в различных сечениях, — есть независимо определенные полюса притяжения. Положение каждого из выделенных таким образом полюсов должно совпадать с местонахождением одного из полюсов, определенным в ходе предшествующей операции. Вероятные причины возможного невыполнения этого правила обсуждаются ниже.

Количество накопленного в зоне газовой выделения газа, а, соответственно, вероятные запасы формирующихся в ее пределах залежей пропорциональны значению начального градиента, характеризующего занимаемую этой зоной подповерхность подземной среды. Поэтому линии сечения поверхностей разделов с осевыми поверхностями зон повышенных значений градиента могут представлять самостоятельный интерес, если даже никаких полюсов притяжения, выделенных на основе ранее предложенных критериев, на них не содержится. Точки пересечения этих линий с последовательностью субгоризонтальных поверхностей также должны рассматриваться как специфические полюса притяжения.

Поверхности (раздел между зонами диффузии и конвекции, нулевой изобилиности источников метана, равных избыточных давлений и равных значений начального градиента), исходные для локализации полюсов притяжения, восстанавливаются по выборкам дискретных замеров концентраций гелия и метана, а также давления и плотности в водных растворах подземных гидравлических систем [7]. Итоговые значения названных характеристик, используемые в операциях восстановления не могут не содержать те или иные погрешности опробования (в наибольшей степени это относится к отбору газовых проб) и лабораторного анализа, неизбежно сопровождающие любые замеры. Последовательность операций восстановления включает: 1) рекон-

струкцию каждого поля с пересчетом значений в точки регулярной трехмерной сети по совокупности дискретных замеров с использованием того или иного интерполяционного алгоритма (в предлагаемых ниже построениях использовалась упоминавшаяся схема объемной интерполяции В.И.Аронова [1], реализованная в программном комплексе В.И.Аронова и Д.В.Калмыкова [14]); 2) анализ пространственной изменчивости полей с использованием оценок первой и второй производных по главным направлениям (для разделения подземной среды на подобласти диффузионного и конвективного обмена и построения разделяющих поверхностей, для оценивания значений начального градиента); 3) математические выкладки с комбинированием вторичных параметров предшествующих операций (для вычисления обильностей источников, для определения избыточного давления). Модели распределений и поверхностей, получаемые в результате проведения этих операций, далеко не тождественны отображаемым объектам, и, соответственно, полюса притяжения, назначаемые на основе этих моделей, не попадают в истинные точки их нахождения и включают некоторое количество ложных назначений. На качественном уровне по степени достоверности воспроизведения реконструируемые характеристики могут быть выстроены следующим образом: избыточное давление—начальный градиент—поверхность раздела—поверхность нулевой обильности. Этот ряд обосновывает следующее правило предпочтения: если в анализируемой подобласти не представлены поверхности раздела или нулевой обильности, но представлены вариации избыточного давления и начального градиента, то в данной подобласти имело место газовыделение и, соответственно, есть основания для назначения полюсов притяжения.

Практически достижимый уровень прогностических возможностей обоснованной выше методики выделения полюсов притяжения проверялся на материалах исследования гидравлического комплекса Прикаспийской впадины [7]. Как отмечалось ранее, в рамках исследования в слое подземной среды глубиной несколько более 4 км, охватывающем все пространство северного Прикаспия, занимаемое впадиной, выделены зоны протекания специфических превращений, а также восстановлены поля избыточного давления и начального градиента. В четырех горизонтальных сечениях этого слоя с альтитудами 1, 2, 3 и 4 км были построены срезы поверхностей раздела зон диффузии и конвекции, нулевой изобилиности ниш метанообразования, равных значений избыточного давления и начального градиента и проведены операции назначения полюсов притяжения по перечисленным выше критериям. Два построения из названных показаны на рис. 4, I, А и рис. 4, II, А (сечения альтитудами соответственно 1, 4 км). Схемы изолиний избыточного давления и начального градиента на рисунках не показаны, поскольку положение подавляющей части полюсов определено по пересечениям линий разделов и нулевой обильности. Локальные максимумы избыточного давления представлены небольшими пятнами, контурами которых являются изолинии, разряд которых наиболее близок к величине максимума. Назначение полюсов притяжения на поверхностях первых трех сечений (в т.ч. и на рис. 4, I, А) выполнялось точно в соответствии с уже сформулированными правилами — на пересечениях линий разделов и нулевой обильности, в максимумах вариаций поля избыточных давлений, на пересечениях длинных осей положительных вариаций поля начального

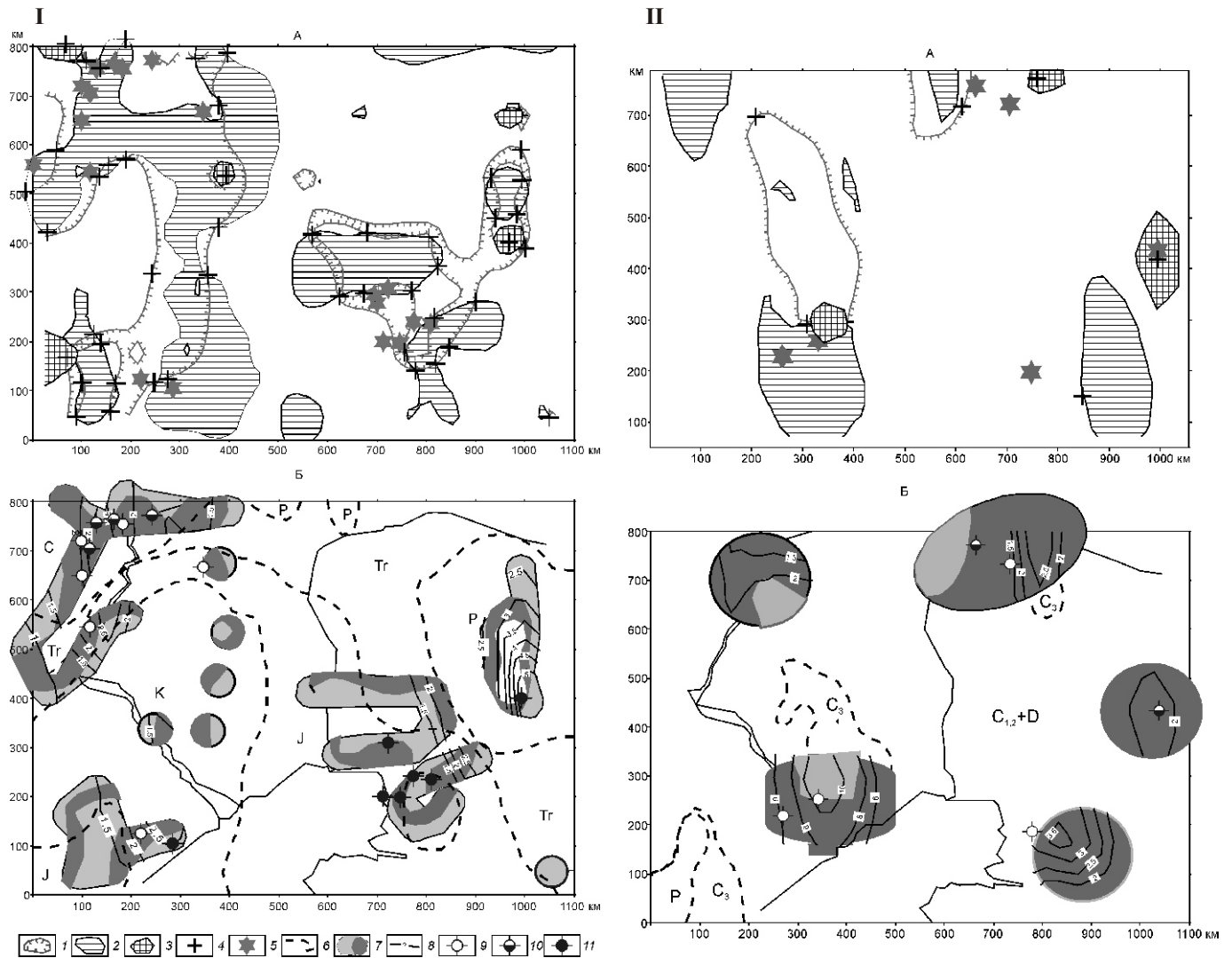


Рис. 4. Горизонтальный срез Прикаспийской впадины по альтитуде: 1 км (I), 4 км (II):

А — назначение полюсов притяжения; Б — контуры перспективных на нефть и газ земель; 1 — зоны диффузии; 2 — ниши метанообразования; 3 — максимумы избыточного давления; 4 — полюсы притяжения; 5 — известные залежи; перспективные земли: 6 — нефть, 7 — газ; 8 — линии равных соотношений запасов; цифры у кривых — отношение ожидаемых запасов к запасам гидростатически подпираемых залежей; залежи: 9 — газа, 10 — газа и нефти, 11 — нефти

градиента с линиями разделов. В последних двух случаях полюса назначались только тогда, когда в намечаемых точках или ближайшей их окрестности не оказывалось ранее назначенных полюсов. В западной части сечения с альтитудой 4 км (см. рис. 4, II, А) назначение произведено по тем же правилам. В северной и восточной частях планшета два полюса назначены в максимумах вариации поля избыточного давления в соответствии с сформулированным правилом предпочтения. Еще один полюс на севере планшета назначен на линии раздела в месте ее максимального сближения с линией нулевой обильности. И, наконец, последний полюс на планшете в юго-восточной его части назначен на линии нулевой обильности в месте ее максимального сближения с осью вариации начального градиента и линий раздела на отметке 3,6 км. Эта линия предназначена для демонстрации того, что рассматриваемая ниша метанообразования находится непосредственно под дном

локальной депрессии рельефа кровли нижнего диффузионного тела, т.е., как минимум, в непосредственной близости от поверхности раздела между зонами диффузии и конвекции. Вместе с тем, велика вероятность того, что, в силу очень слабой представленности этих участков впадины в исходной выборке концентраций гелия, в реконструкции рельефа раздела присутствуют значительные абсолютные погрешности, и воспроизведен он с недостаточной детальностью.

Нельзя не подчеркнуть, что все максимумы избыточного давления (см. рис. 4, I, А) лежат на линиях разделов между зонами и три из пяти зарегистрированных находятся вблизи пересечений линий разделов и нулевой обильности. Это, во-первых, подтверждает правильность исходных представлений, согласно которым узлы формирования избыточных давлений должны находиться на разделах между зонами диффузионного и конвективного обмена и,

во-вторых, свидетельствует о работоспособности независимых алгоритмов реконструирования поверхностей раздела между зонами и полями избыточных давлений. Из трех максимумов избыточного давления, отмечаемых на рис. 4, II, А, один также лежит на линии раздела между зонами диффузии и конвекции.

На все построения вынесены известные газовые, нефтяные и нефтегазовые залежи, характерные отметки залегания которых близки к отметке соответствующего сечения. Так на рис. 4, I, А показаны известные залежи, глубины нахождения которых изменяются от 0,8 до 1,2 км. Сведения о местонахождении, глубинах залегания и фазовом составе залежей заимствованы из работ [2, 13] с небольшими добавлениями, относящимися, в основном, к глубоко залегающим горизонтам. Месторождения, используемые для сопоставления с назначенными полюсами притяжения, открыты и разведаны преимущественно до 1980 г. Соответственно, они далеко не исчерпывают фонд месторождений северного Прикаспия, известных на сегодняшний день, что позволяет заинтересованным специалистам осуществить независимую проверку эффективности назначения полюсов.

В дальнейшем принимается, что ближайшая к данному полюсу залежь диагностируется этим полюсом, и расстояние между ними — оценка радиуса его притяжения. В каждом из исследуемых сечений измерены эти расстояния и оценены среднее значение и ожидаемое отклонение от среднего в полученных выборках. Итоговые результаты сведены в табл. 1 наряду с оценками представленности каждого сечения в объеме исходной выборки фактических наблюдений, о чем речь пойдет ниже.

Из табл. 1 следует, что все залежи, используемые в проверочных выборках, действительно находятся на относительно небольших расстояниях от того или иного полюса притяжения, однако средний радиус и его среднее отклонение возрастают примерно вдвое в сечениях с более высокими абсолютными значениями альтитуд. В таблице представлены отношения количеств точек фактических результатов, внесших основной вклад в воспроизведение изменчивости полей на данном срезе, к общему объему используемой выборки измерений. Так, поле метана было реконструировано по выборке N 374 замера на весь объем напластований впадины, при том, что на интервал отметок 0,8... 1,2 км, характеризующий срез с альтитудой 1 км, пришлось 35 значений, на интервалы (1,7... 2,3 км), (2,7... 3,3 км), (3,7... 5 км), характеризующие срезы 2, 3 и 4 км, пришлось 40, 17 и 8 точек соответственно. Найдены аппроксимирующие зависимости оценок средне-

го значения и среднеквадратичного отклонения радиусов притяжения от доли представленности среза в исходной выборке. Обе аппроксимации описываются зависимостью вида $y = Ax^k$, причем для оценки среднего значения A 8,38 км, k 0,54, а для оценки среднеквадратичного отклонения A 5,07 км, а k 0,55. Как следует из этих аппроксимаций предельная оценка радиуса притяжения (для $x = 1$) составит 8,4 5,1~13,5 км, оценка радиуса для среза альтитудой 1 км, представленность которого близка 0,1, должна быть близкой 30 20 50 км, а оценка радиуса для среза альтитудой 4 км ($x = 0,02$) близкой 100 км.

Контуры перспективных земель для каждого из рассматриваемых сечений выделялись с помощью следующих операций. Вокруг каждого из полюсов притяжения проводилась окружность, оценка радиуса которой определялась долей представленности сечения в исходной выборке. Так, для сечений альтитудами 1 и 2 км радиус притяжения принимался равным 50 км, а для сечений альтитудами 3 и 4 км — 100 км. Последовательности перекрывающихся или соприкасающихся окружностей объединялись в общий контур огибающей линией. Кроме того, в единый контур объединялись окружности, соединяемые между собой почти параллельно идущими и близко расположенными (на расстояниях, не больших радиуса притяжения) линиями раздела и нулевой обильности. И, наконец, если два (или более) контура, составленных по описанным правилам, оказывались на ближайшем расстоянии, сопоставимом с радиусом притяжения, то они объединялись в общее построение обрамляющей линией.

На рисунках 4, I и 4, II, Б перспективные на нефть и газ земли, ограниченные такими контурами, представлены в виде серых пластырей на схематических геологических картах соответствующих сечений. Пятнами и полосами более интенсивной окраски в пределах этих пластырей показаны части земель, которые входят в области диффузионного обмена. Они представляют зоны относительно замедленного вторичного преобразования материала залежей. С ними естественно связывать перспективы обнаружения газовых залежей. Наоборот, на землях более светлой части пластырей, представляющих области более интенсивного преобразования химического и фазового составов залежей, предполагается обнаружение нефтяных тел, как естественных продуктов подобных превращений. Сами разделы, по-видимому, являются линиями равновероятной встречи и тех, и других залежей, а также залежей разной степени трансформации, т.е. нефтегазовых с различными соотношениям фаз. Нумерованные линии в пределах пластырей — распределение начального градиента внутри данного контура перспективных

1. Радиусы притяжения полюсов в различных сечениях разреза Прикаспийской впадины и их связь с представленностью данного сечения в исходной выборке фактических данных

Отметка сечения, км	Объем выборки, пары	Радиус, км			Среднеквадратичное отклонение, км	Представленность сечения, доли
		Максимальный	Минимальный	Средний		
1	11	53,1	12,8	27,2	13	0,094
2	10	69,4	2	29,5	19	0,107
3	3	100,2	0	52	50,2	0,0454
4	6	107,9	15,7	64,1	30,7	0,0214

земель и характеризуют их дифференциацию по возможным запасам продукции в искоемых залежах. Запас газа в залежи может быть представлен следующей приближенной зависимостью:

$$W = \frac{gd}{P_a} Sh \left(1 - \frac{Jl}{gd} \right), \quad (6)$$

где W — запас, ρ — плотность подпирающего водного раствора; g — ускорение силы тяжести; d — глубина залегания водно-газового контакта, отсчитываемая от зеркала грунтовых вод; P_a — атмосферное давление; S — площадь газового тела на глубине контакта; h — максимальная высота газового тела; ρ — коэффициент ($\rho < 1$), отражающий влияние формы вместилища и пористости коллектора на оценку запаса; J — начальный градиент, l — расстояние от отметки водно-газового контакта до отметки приложения начального градиента $\frac{l}{d} < 1$; $\frac{J}{g}$ — отношение началь-

ного градиента к гидростатическому; $1 - \frac{Jl}{gd}$ — величина,

показывающая, во сколько раз пластовое давление превышает гидростатический подпор и, соответственно, во сколько раз запасы газа в данной залежи превосходят запасы гидростатически подпираемых тел в вместилищах одного и того же объема. Нумерация изолиний и представляет значения этой суммы в предположении, что $\frac{l}{d} < 1$, т.е.

характеризует предельно возможное превышение ресурсов залежи над запасами гидростатически подпираемых тел вдоль данной изолинии.

На рис. 4, I, Б и II, Б вынесены те же залежи, что и на рис. 4, I, А и II, А с небольшими добавлениями, но уже расклассифицированные в соответствии с их фазовым составом на газовые, нефтегазовые и нефтяные. Естественно, что почти все залежи, используемые в проверочных выборках, оказались в пределах выделенных контуров перспективных земель. Лишь одна из них в сечении с высотой 4 км, полюс притяжения для которой назначался из интуитивных соображений с использованием правила предпочтения, оказалась слегка за пределами выстроенного контура. Полученная оценка точных попаданий (97%) является избыточно оптимистической. При ее получении не могли быть учтены ложные назначения и, соответственно, ошибки в самом факте воспроизведения контуров и определении их формы. Тем не менее, эта оценка должна рассматриваться как убедительное свидетельство правильности исходных представлений о формировании залежей газа и нефти и как представительный критерий, подтверждающий работоспособность используемых алгоритмов

восстановления полей и построения определяющих поверхностей.

Насколько оправданы предположения о дифференциации залежей по фазовому составу в зависимости от их положения в пределах зон с различным режимом обмена, призвана показать табл. 2. Она составлена на основе визуального сопоставления локализации залежей данного фазового состава с режимом обмена, характеризующим данную область локализации. Выделены три градации в характеристике фазового состава — газовый, нефтегазовый и нефтяной, и три градации в дифференциации среды по условиям обмена — диффузионная зона, раздел между зонами диффузионного и конвективного обмена и конвективная зона. Едва ли данные предлагаемой таблицы могут рассматриваться как имеющие универсальный характер. Эта ограниченность связана и с недостаточной представительностью выборки, и с безусловной зависимостью рассматриваемых соотношений от преобладающего возраста образований, вмещающих залежи. Вместе с тем, они показывают, во-первых, что предположения о связи фазового состава залежей с режимом обмена во вмещающих образованиях справедливы, и, во-вторых, что разделение перспективных земель на области более вероятной встречи газовых и нефтяных залежей способно оказать ориентирующее влияние на проведение поисковых работ.

Итак, выполненный анализ показал, что с помощью последовательности рассмотренных операций действительно удается оконтурить перспективные для данного сечения на газ и нефть земли и правильно расклассифицировать их по вероятности встречи газовых и нефтяных залежей. К сожалению, проверить, как работает прогноз распределения залежей по ожидаемым запасам, на основе имеющейся информации не удалось.

На основании приведенных в статье материалов можно сделать следующие выводы:

1. Пустотное пространство — особая подобласть подземной среды, развивающаяся по собственным законам. Текущие в нем процессы не прогнозируются на основе материалов доступных методов геологических и геофизических исследований. Вместе с тем, именно эти процессы, в первую очередь, определяют потребительские характеристики подземной среды, и только обладание знанием об этих процессах способно обеспечить то разумное взаимодействие цивилизации с флюидами подземных пустот, итогом которого будет сохранение и репродукция этих характеристик. Именно поэтому настоятельным требованием текущего момента является признание подземных обмена и превращений самостоятельным объектом геологических исследований, а их обстоятельное изучение — назревшей актуальнейшей задачей.

2. Распределение известных залежей северного Прикаспия по зонам с различным режимом обмена

Фазовый состав залежей	Зоны с различным режимом обмена, общее число (%)			Итого залежей данного фазового состава
	Диффузионная зона	Раздел	Конвективная зона	
Газ	12 (92)	1 (8)	0 (0)	13
Газ—нефть	1 (8)	6 (50)	0 (0)	7
Нефть	0 (0)	5 (42)	7 (100)	12
Итого залежей в данной зоне обмена	3	12	7	32

2. Как и все происходящее в сфере обитания процессы в подземных пустотах обладают свойствами определенной пространственной устойчивости и периодической воспроизводимости. Соответственно, они поддаются картированию. Непосредственными объектами картирования должны стать: 1) подпространства, занятые зонами диффузионного и конвективного обмена, и, прежде всего, разделы между названными подпространствами, определяющие геометрические характеристики ложа безнапорных потоков и полостей вмещения напорных; 2) поля векторов скоростей, траектории магистральных дрен дренажных сетей и их гидродинамические характеристики; 3) ниши продуцирования и потребления компонентов водных растворов, как «составоформирующих», так и включающих элементы потребительской ценности; 4) зоны фазово-неустойчивых состояний, прежде всего, по отношению к газовыделению, а также ко всем тем изменениям агрегатного состояния, с которыми связывается высаживание из растворов компонентов потребительской ценности; 5) зоны текущих и состоявшихся фазовых переходов, как газовыделения, так и высаживания твердоагрегатных комплексов раствора, соответствующего различным процессам рудообразования; 6) подпространства подземной среды, с которыми может быть связано возникновение катастрофических ситуаций как при техногенном воздействии человека на природу (например, при проведении вскрышных, горно-проходческих или буровых работ), так и вследствие спонтанного развития естественной системы данного подпространства.

Обладание информацией, полученной в результате такого картирования, позволит:

обоснованно с ответственным прогнозированием последствий выбирать резервуары для заложения водозаборов, хранилищ газа и других веществ, складирования промстоков (в т.ч. высокоактивных и химически агрессивных) и оценивать предельно допустимые дебиты и объемы отбора и закачки этих флюидов;

ответственно прогнозировать возможные отклики подземной среды на те или иные техногенные воздействия (имеются в виду вскрышные и буровые работы, насыпки терриконов, отбор и закачка флюидов, перераспределение поверхностного стока и т.д.), оценивать возможные риски катастрофических последствий, связанных с этими воздействиями, а также прогнозировать возможность спонтанного развития среды в направлении возникновения предкастрофических ситуаций (естественно, речь идет о реально исследованных объемах подземной среды);

обнаруживать месторождения полезных ископаемых с минимальным количеством вскрышных, буровых и взрывных работ и подбирать такие щадящие системы их разработки, которые учитывали бы регенеративные возможности природы поддерживать и восстанавливать их ресурсы.

3. Техническое осуществление картирования перечисленных подпространств, поверхностей и трасс возможно только на основе анализа пространственной изменчивости естественных полей — концентраций, давления, плотности и температуры с помощью специальных методов обработки и интерпретации данных опробования водоносных комплексов различных глубин залегающих. Соответственно, необходимыми предпосылками предлагаемого картирования являются: 1) систематическое опробование подземных

вод с плотностью расположения пунктов отбора, соответствующей избранному масштабу представления результатов; 2) организация сети стационарных станций наблюдения за подземными водами на различных геологических этажах их нахождения с частотой размещения узлов, обеспечивающих выделение временных вариаций полей с периодами, не меньшими шага съемки; 3) разработка методов исследования наблюдаемых полей, включающих методики обработки пространственной изменчивости и рядов временных вариаций; 4) разработка алгоритмов перехода от изменчивости наблюдаемых полей к характеристике картируемых признаков (координат разделов между зонами диффузии и конвекции, координат абсолютных значений и направлений векторов скорости течения, координат и абсолютных значений обильностей источников и стоков картируемых химических превращений, координат и значений коэффициентов метастабильности картируемых фазовых переходов и т.д.); 5) разработка технологии построения карт по выборкам охарактеризованных признаков; 6) разработка технологии и меню работы с созданными картами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аронов В.И. Методы построения геолого-геофизических карт и геометризации месторождений нефти и газа на ЭВМ. — М.: Недра, 1990.
2. Зорькин Л.М., Стадник Е.В., Козлов В.Г. Гидрогеохимические показатели нефтегазоносности Прикаспийской впадины. — М.: Недра, 1975.
3. Иванов В.В., Антоненко Е.Ф., Обухова С.Н. Подземный водообмен в свете распределений концентраций He // Водные ресурсы. 1999. № 4. С. 397—409.
4. Иванов В.В., Антоненко Е.Ф., Обухова С.Н. Поля газонасыщенности и избыточных давлений в осадочных толщах // Советская геология. 1991. № 1. С. 11—14.
5. Иванов В.В., Антоненко Е.Ф., Обухова С.Н. Проводимость поровых сред при дисперсном распределении одной из фаз порового флюида. Препринт. — М., 1988.
6. Иванов В.В., Антоненко Е.Ф., Обухова С.Н., Романов В.В. Оценка скоростей и расходов подземных вод по распределению гелия и трития // Водные ресурсы. 1995. № 6. С. 667—675.
7. Иванов В.В., Гулиев И.С. Массообмен, углеводородообразование и фазовые переходы в осадочных бассейнах. — Баку: Нафта-Пресс, 2001.
8. Иванов В.В., Гулиев И.С. О характере изменения давлений в процессе формирования месторождений углеводородов // Изв. НАН Азербайджана. Сер. Наук о Земле. 2004. № 3.
9. Иванов В.В., Медовый В.И., Бушмакин В.А. и др. Гелиевые исследования в поисковой геологии // Советская геология. 1984. № 5. С. 105.
10. Иванов В.В., Романов В.В. Использование модели диффузионного пограничного слоя для анализа массообмена в подземных водах на примере данных по гелию и тритию // Водные ресурсы. 1986. № 2. С. 40.
11. Иванов В.В., Романов В.В., Медовый В.И. и др. Способ определения средней скорости и расхода подземных вод: автор. свдет. СССР 1053049 / Б.И. 1983. № 41. С. 175.
12. Юрков А.К. Методика и результаты изучения в скважинах полей гелия и радиогенного аргона на Урале. Автореф. дисс. ... канд. геол.-минер. наук. — Свердловск, 1985.
13. Якуцени В.П. Гидрогеология Юго-Востока Прикаспийской впадины в связи с нефтегазоносностью. — Л.: Гостоптехиздат, 1961.
14. Aronov V.I., Kalmykov D.V. A new method for solving geometric modelling and data processing problems. The third conference on computer Graphics and Visualisation. GRAPHICON 93. Saint-Petersburg. Vol. 1—2. 1993.