

На правах рукописи



ТУРУЛО МАКСИМ МИХАЙЛОВИЧ

**АНАЛИЗ ГИДРОДИНАМИЧЕСКОГО И ГИДРОХИМИЧЕСКОГО
РЕЖИМА ЭКСПЛУАТАЦИИ КУЮЛУССКОГО
МЕСТОРОЖДЕНИЯ ПОДЗЕМНЫХ ВОД (КАЗАХСТАН) КАК
ОСНОВА ОБЪЕКТНОГО МОНИТОРИНГА**

Специальность 25.00.07 – гидрогеология

Автореферат

**диссертации на соискание ученой степени
кандидата геолого-минералогических наук**

Москва, 2012

Работа выполнена на кафедре гидрогеологии Российского государственного геологоразведочного университета им. Серго Орджоникидзе.

Научный руководитель: доктор геолого-минералогических наук,
профессор **Лисенков Александр Борисович**

Официальные оппоненты:

доктор геолого-минералогических наук, профессор

Лехов Алексей Владимирович (МГУ им. М.В. Ломоносова)

кандидат геолого-минералогических наук

Клюквин Александр Николаевич (ЗАО «Геолинк Консалтинг», директор по ИС)

Ведущая организация: Федеральное Государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт гидрогеологии и инженерной геологии» (ВСЕГИНГЕО)

Защита состоится 24 мая 2012 года в 17 ч. 00 мин. на заседании диссертационного совета ДМ 212.121.01 в Российском государственном геологоразведочном университете им. С. Орджоникидзе по адресу: 117997, Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 23.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Российского государственного геологоразведочного университета им. С. Орджоникидзе.

Автореферат разослан 21 апреля 2012 г.

Отзывы на автореферат (в двух экземплярах, заверенных печатью) просим направлять по адресу: 117997, ГСП-7, Москва, ул. Миклухо-Маклая, д.23, Российский государственный геологоразведочный университет, ученому секретарю Диссертационного совета ДМ 212.121.01.

Ученый секретарь

диссертационного совета

Вязкова Ольга Евгеньевна

Введение

Актуальность темы диссертации

Куюлусское месторождение подземных вод в Западном Казахстане является единственным природным источником крупного централизованного водоснабжения на полуострове Мангышлак. Его эксплуатация происходит в условиях сильно нарушенного режима, так как связана со сработкой статических запасов подземных вод. Для месторождения характерны весьма сложные гидрохимические условия. В этой ситуации разработка научно обоснованных методов организации и повышения эффективности функционирования объектного мониторинга подземных вод на действующем водозаборе является актуальной проблемой. Мониторинг должен обеспечить оптимальную работу водозабора, решая задачи прогноза, контроля и регулирования водоотбора при сохранении требуемого качества подземных вод.

Цель работы и задачи исследований

Целью диссертации является разработка научно обоснованных методов организации получения информации, ее обработки и использования для составления рекомендаций по управлению режимом эксплуатации Куюлусского месторождения подземных вод действующим водозабором.

Для достижения поставленной цели решены следующие задачи:

- Усовершенствование методов интерпретации результатов мониторинга подземных вод на действующем водозаборе.
- Создание геолого-математических моделей, учитывающих условия формирования эксплуатационных запасов месторождения подземных вод в краевой части артезианского бассейна и, одновременно, позволяющих оценивать режим работы каждой отдельной скважины крупного водозабора.
- Адаптация геолого-математических моделей к существующим природным условиям на основе результатов функционирования объектного мониторинга подземных вод.
- Оценка источников техногенного загрязнения Куюлусского месторождения.
- Уточнение гидрохимического режима эксплуатации водозабора с позиций изменения качества подземных вод на рассматриваемый период времени, выявления и оценки основных факторов этого изменения.
- Обеспечение максимального продления общего периода эксплуатации Куюлусского месторождения, как единственного природного источника централизованного водоснабжения.
- Управление текущим режимом эксплуатации водозабора для обеспечения минимальных эксплуатационных затрат на извлечение воды и продления периода самоизлива.

Исходные данные

Данные более 50 тысяч наблюдений за расходом и уровнем подземных вод по водозаборным и реагирующим скважинам, результаты 14 тысяч химических анализов подземных вод в течение 50 лет их эксплуатации крупным водозабором;

Методы исследований

- Статистическая обработка временных рядов методом регрессионного анализа, методом тренд- и гармонического анализа;
- графоаналитические методы обработки временных рядов с целью диагностики гидрогеологических условий эксплуатации подземных вод применительно к типовым расчетным схемам и уточнения гидродинамических параметров;
- математическое моделирование условий эксплуатации подземных вод крупным водозабором.

Научная новизна работы

- Показана эффективность совместного использования региональных и локальных геолого-математических моделей при решении задач управления режимом эксплуатации водозабора по данным объектного мониторинга подземных вод.
- Установлено, что при изучении сильно нарушенного режима подземных вод эффективно использование временных рядов темпов изменения уровня наряду с данными понижения уровня.
- Установлено влияние внешних закрытых границ в южной и западной части распространения I альбского водоносного горизонта.
- Выявлено отсутствие значимых временных трендов изменения минерализации и химического состава подземных вод отбираемых скважинами, что подтверждено гидродинамическими расчетами.
- Выявлены условия возникновения сероводорода в палеоценовом горизонте в зоне его выхода на поверхность земли.

Практическая значимость работы

Результаты работы используются для управления текущей эксплуатацией действующего водозабора в оптимальном режиме, переоценки эксплуатационных запасов подземных вод Куюлусского месторождения, разработки рекомендаций организации объектного мониторинга крупных водозаборов в сложных гидрогеологических условиях.

Достоверность полученных результатов определяется использованием комплекса современных методов обработки огромного количества исходной информации гидрорежимных наблюдений в течение 50 лет эксплуатации водозабора, хорошим

совпадением результатов вычислений разными методами между собой и с данными фактических измерений на этапах калибровки математических моделей.

Апробация работы и публикации

По теме диссертации опубликованы две статьи, в том числе одна статья, входящая в «Перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий» ВАК. Основные результаты исследований докладывались на VI Международной научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Молодые - наукам о Земле».

Личный вклад автора

Автором обработаны данные более 14 тысяч химических анализов и более 50 тысяч замеров уровня и дебита в водозаборных и наблюдательных скважинах, характеризующих гидродинамические и гидрохимические условия месторождения подземных вод, которые в дальнейшем были проанализированы и интерпретированы. Автор участвовал в разработке математических моделей, принципов организации и повышения эффективности функционирования объектного мониторинга на водозаборе, в обсуждении и интерпретации полученных результатов.

Структура и объем работы

Диссертация состоит из введения, 5 глав и заключения. Общий объем 143 страницы. Включает 38 рисунков и 12 таблиц. Список литературы содержит 66 наименований.

Благодарности

Автор выражает благодарность научному руководителю д.г.-м.н., профессору Лисенкову А.Б. и к.г.-м.н., доценту Ленченко Н.Н. за поддержку и ценные советы в процессе выполнения работы.

Автор также признателен всему коллективу кафедры гидрогеологии РГГРУ за рекомендации и замечания при подготовке работы, в частности: заведующему кафедрой д.г.-м.н., профессору Швецу В.М., к.г.-м.н., доценту Каменскому Г.Ю., к.г.-м.н., доценту Фисун Н.В., к.г.-м.н., доценту Попову Е.В., д.г.-м.н., профессору Грабовникову В.А., д.г.-м.н., профессору Черепанскому М.М.

Краткое содержание диссертации

В первой главе диссертации дана характеристика гидрогеологических условий северо-западной части Южно-Мангышлакского артезианского бассейна, опыта эксплуатации Куюлусского месторождения подземных вод для водоснабжения г. Актау – центра Мангистауской области. Проанализированы особенности формирования эксплуатационных запасов подземных вод. Вторая глава посвящена принципам организации объектного мониторинга Куюлусского месторождения и характеристике основных видов исследований на

действующем водозаборе. Третья глава содержит анализ гидродинамического нарушенного режима подземных вод, выполненный с целью уточнения гидрогеологических условий месторождения по результатам многолетней эксплуатации. В четвертой главе уточняется региональная модель и дается краткосрочный прогноз на локальной модели. Рассматриваются принципы комплексирования региональных и локальных моделей эксплуатации месторождения подземных вод. Локальные модели используются как инструмент контроля и управления текущей эксплуатацией водозабора в оптимальном режиме. В последней, пятой главе, дан анализ гидрохимического режима эксплуатации водозабора. На основе статистической обработки исходной информации выявлены регрессионные связи величины минерализации с основными ионами, установлено практическое отсутствие изменений во времени качества подземных вод за 50-летний период эксплуатации, которое подтверждено гидродинамическими и балансовыми расчетами. Охарактеризованы существенные отличия в гидрохимическом облике подземных вод палеоценового и альб-сеноманского комплексов, являющиеся важными диагностическими признаками оценки перетоков между горизонтами по стволу аварийных скважин. В заключении этой главы излагаются рекомендации по совершенствованию наблюдений при мониторинге гидрохимического режима подземных вод.

Основные защищаемые положения

1. Основным диагностическим признаком при выявлении гидродинамических закономерностей нарушенного режима эксплуатации месторождения подземных вод, наряду с величиной понижения, является величина темпа понижения уровня. Для изучаемых условий определена гиперболическая (обратная) зависимость годовых темпов понижений от времени эксплуатации.

Куюлусское месторождение солоноватых подземных вод приурочено к водоносным горизонтам альб-сеноманского комплекса и расположено в северо-западной части Южно-Мангышлакского артезианского бассейна на площади около 3 тыс. км² (рис.1). Изучением гидрогеологических условий Куюлусского месторождения, начиная с 1957 г, занимались К.Ф. Орфаниди, В.Н. Корценштейн, В.Б. Колпаков, Ж.И. Сыдыков, А.К. Кугешев, И.К. Гавич, Н.Н. Ленченко, А.Б. Лисенков. Гидродинамическими особенностями этого месторождения являются значительная глубина залегания целевых водоносных горизонтов, их изолированность друг от друга и вышезалегающих водоносных комплексов, весьма небольшая величина естественных ресурсов подземных вод (около 2 тыс. м³/сут), обусловленная условиями питания в аридном климате.

В условиях эксплуатации крупного водозабора с 1962 г. с расходом более 50 тыс. м³/сут происходит сработка как упругих запасов подземных вод в области

погружения водоносных пластов, так и гравитационных запасов на выходах пласта, располагающихся в 30 км. к северу и востоку от центра месторождения (рис. 2).

Статистическая обработка результатов измерений уровня по наблюдательным скважинам, расположенным на площади всего месторождения, свидетельствует о существовании нестационарного режима фильтрации в течение всего периода водоотбора. Установлено, что 85 % изменения уровня связано с трендом. Периодическая составляющая не выявлена, а случайная составляющая, зависящая, главным образом от неравномерной работы скважин, достигает 15 %. Вследствие закономерного сокращения величины суммарного водоотбора в последние годы, наилучшие критерии оценки характерны для параболического тренда, на котором прослеживается как начальное снижение, так и последующее частичное восстановление уровня (рис.3). Учитывая значительные размеры месторождения, различное расположение наблюдательных скважин относительно водозаборного ряда и их удаленность от границ пласта, оценивалась репрезентативность временных рядов уровней для характеристики условий эксплуатации на различных участках месторождения. Такая оценка выполнялась сопоставлением временных рядов уровней различных скважин между собой по методу парной корреляции.

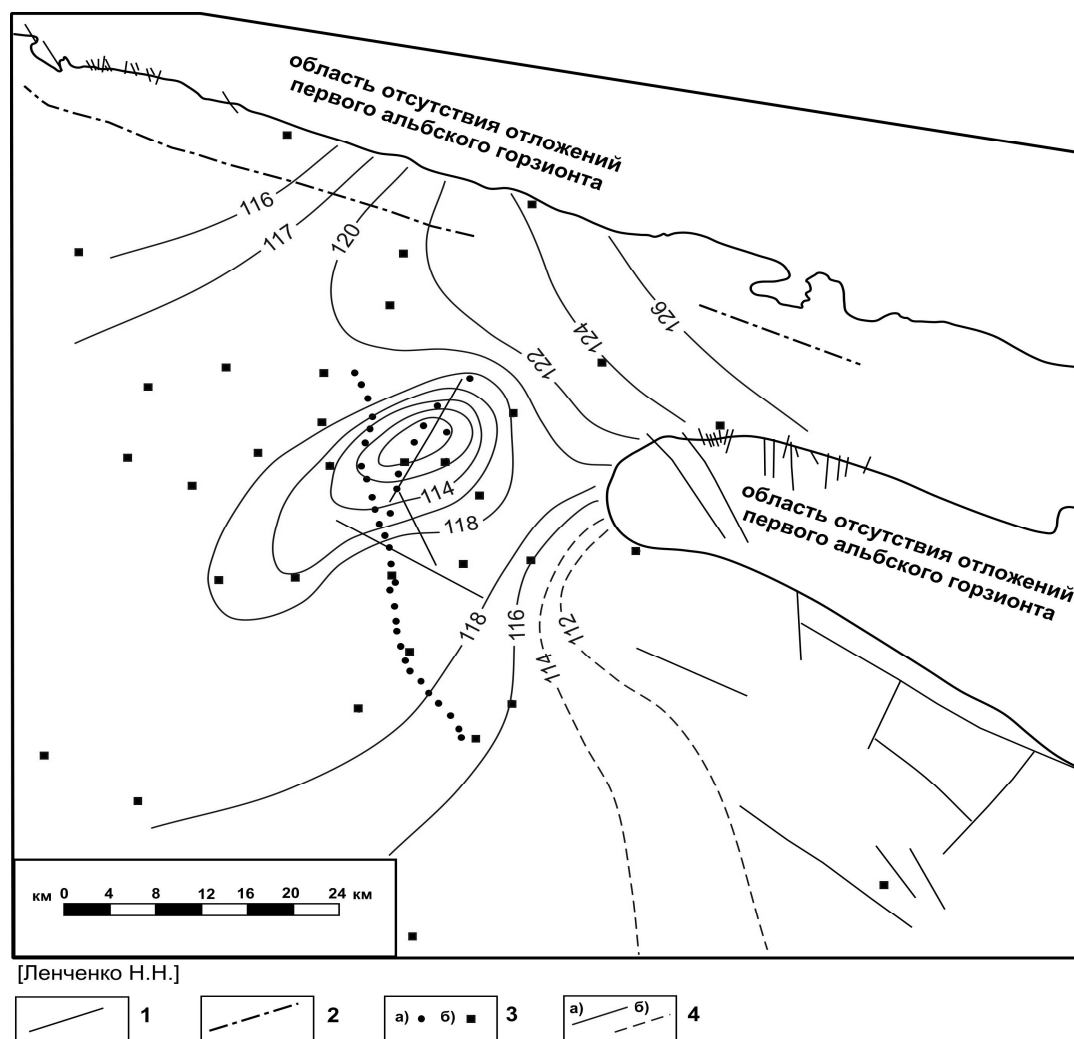


Рис. 1. Карта статических уровней первого альбского водоносного горизонта:

1 – тектонические нарушения; 2 – Прикаратауский разлом; 3 – скважина: а) водозаборная, б) наблюдательная; 4 – гидроизогипсы первого альбского водоносного горизонта: а) достоверные, б) предполагаемые.

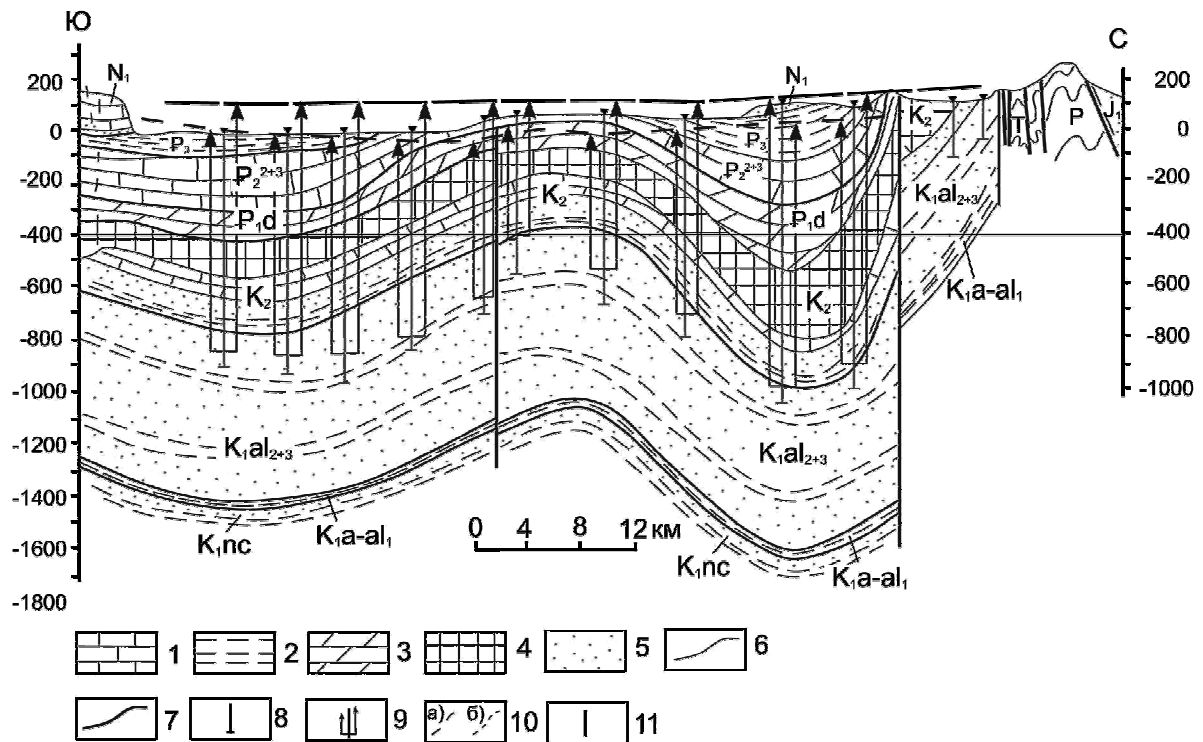


Рис. 2. Схематический гидрогеологический разрез Куюлусского месторождения:

1-5 породы: 1 – известняки; 2 – глины; 3 – мергели; 4 – песчий мел; 5 – пески; 6 – границы литологические; 7 – границы стратиграфические; 8 – буровые скважины; 9 – напор подземных вод; 10 – положение пьезометрического уровня (а – на 1961г., б – на 2010 г.); 11 – разломы.

Было выявлено, что ряды наблюдений за уровнем практически по всем скважинам связаны между собой с коэффициентом корреляции $r = 0,95 - 0,99$. Такое высокое значение r обусловлено весьма значительным общим изменением уровня по всем скважинам (понижения составляют 100 – 180 м) на фоне которого мало значимы особенности режима годовых изменений в отдельных скважинах, на отдельных участках. Более чувствительной оказалась корреляция годовых темпов (срезок) U уровня. В качестве значимых для выявления временных рядов-аналогов принимались величина корреляции r больше 0,75, причем r меньше 0,5 свидетельствовало о практически независимых изменениях уровней. Далее временные ряды были интерпретированы в координатах $S \div \ln t$ и $U \div \frac{1}{t}$ (рис. 4 и 5). Целесообразность построения и анализа последнего графика определяется известной зависимостью

$$\frac{\partial S}{\partial t} = \frac{Q}{(4\pi kmt)}. \quad (1)$$

На основании обработки обоих графиков уточнены значения гидродинамических параметров водоносных горизонтов по опыту длительной эксплуатации водозабора. Полученные графики имеют вид прямых, причем прямая в осях $(U) \div \frac{1}{t}$ проходит через

начало координат, что характерно для расчетной схемы изолированного, неограниченного в плане пласта. При этом гидродинамическая роль удаленных от водозабора границ эквивалентна однородному, неограниченному в плане пласту с эффективными параметрами.

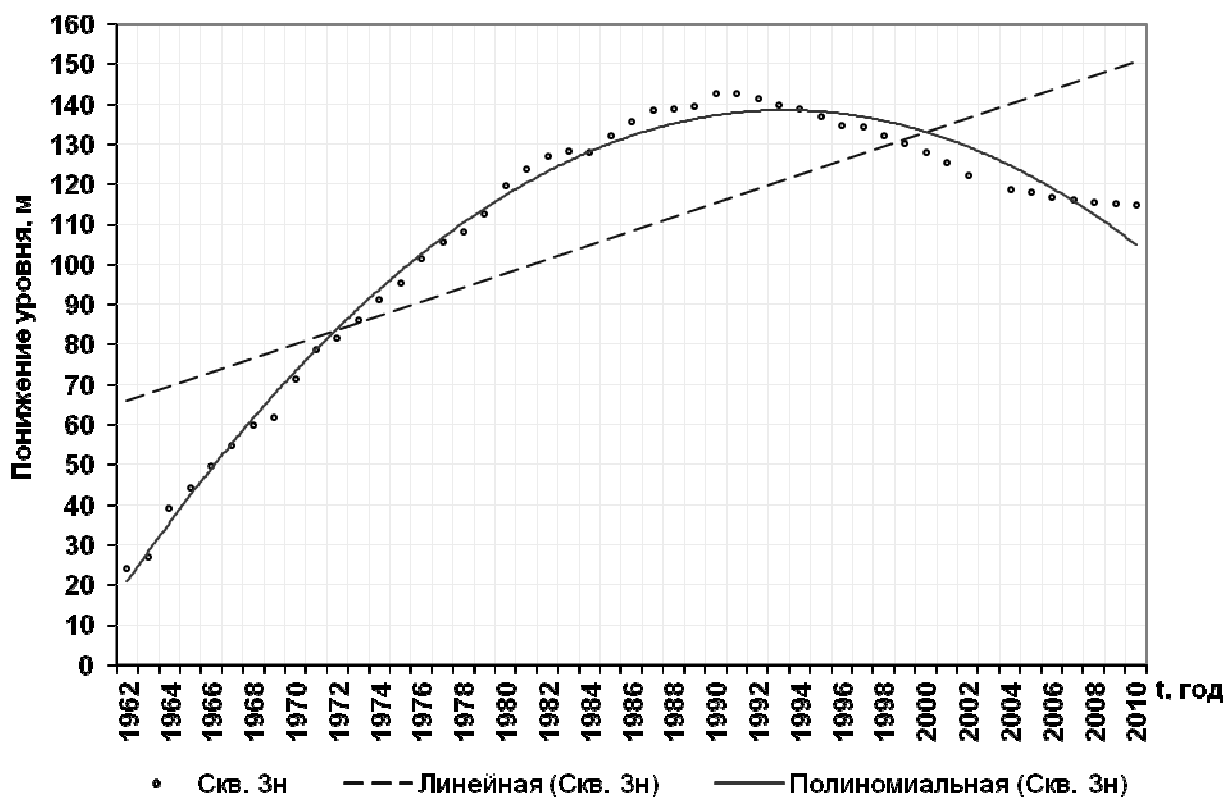


Рис. 3. Тренд анализ линейный и параболический по наблюдательной скважине 3н

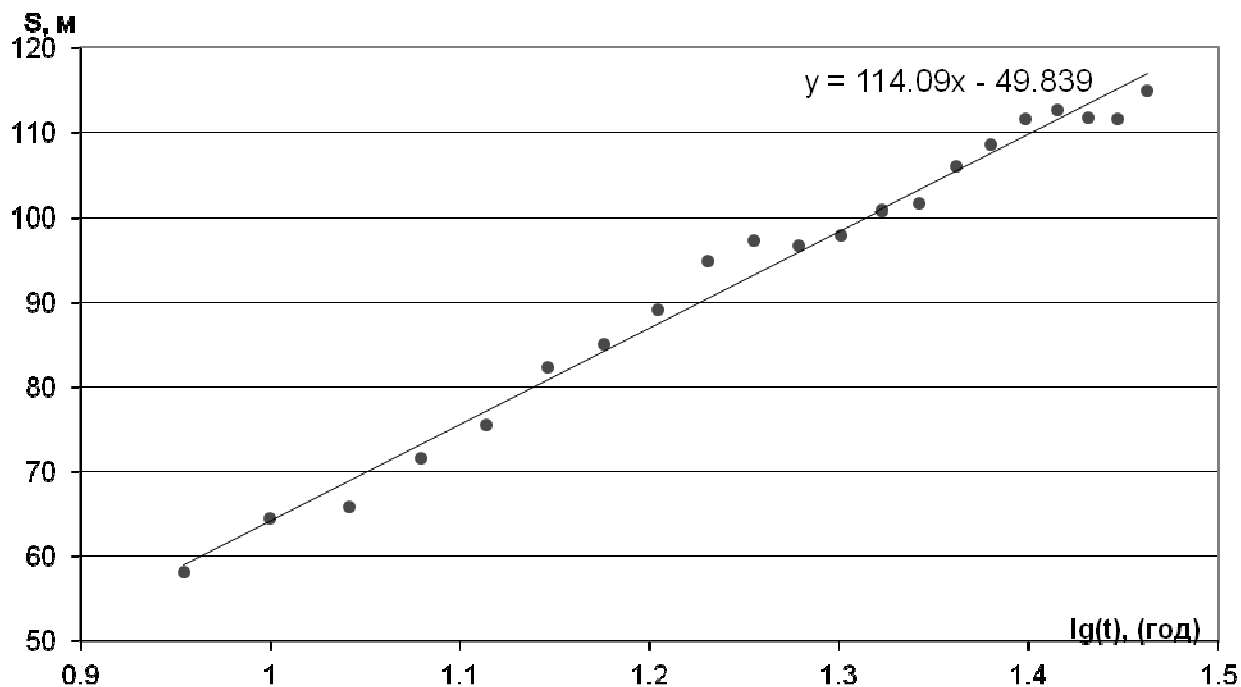


Рис. 4. График временного прослеживания уровня по наблюдательной скважине 38 г (с 1970 по 1990 гг.)

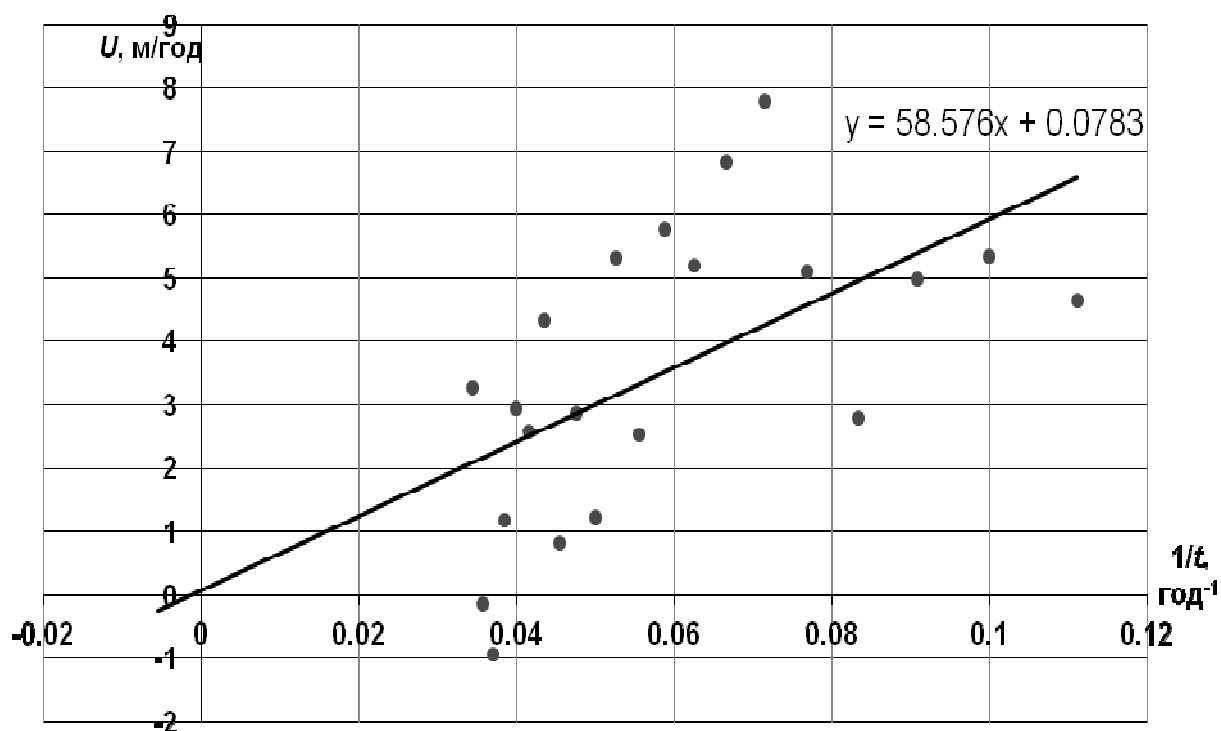


Рис. 5. График линейной регрессии U по наблюдательной скважине 38 г (с 1970 по 1990 гг.)

Преимуществом диагностики данных в координатах $(U) \div \frac{1}{t}$ является большая чувствительность по сравнению с $S \div \ln t$, что обнаруживается сопоставлением величин коэффициента корреляции и дисперсией при аппроксимации фактических данных прямыми в этих координатах.

Весьма эффективным является использование показателя годового темпа изменения уровня (U) при калибровке математических моделей сильно нарушенного режима Куюлусского месторождения подземных вод. Понижения уровня в скважинах достигают 100 – 160 м, несовпадения модели с фактическими данными не более 5 – 10 м. При средних фактических значениях U от 2 до 8 м/год с разным знаком, расхождение модели с натурой достигали 1-2 м/год, то есть сопоставление по темпам существенно более чувствительно, чем по величинам понижения уровня (рис.6, 7). Влияние на показатель U неравномерного по времени водоотбора компенсируется использованием процедуры скользящего осреднения с "окном" 3 года.

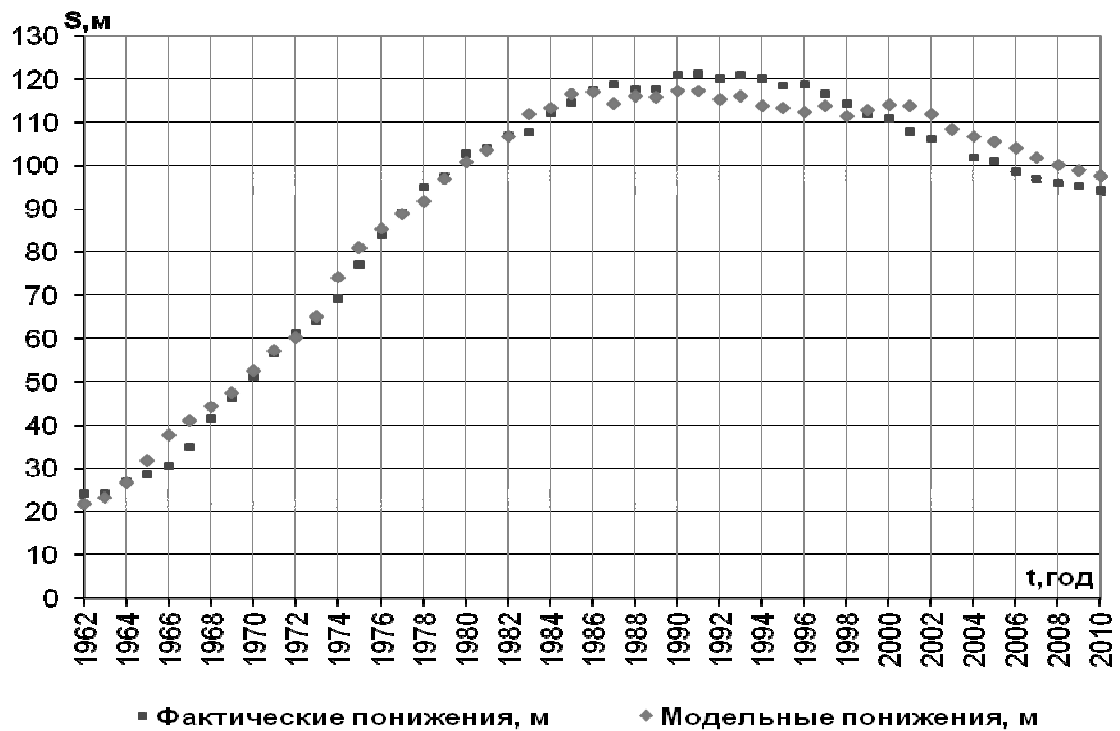


Рис. 6. Изменение понижений уровня во времени по скважине 38г (I альбский водоносный горизонт)

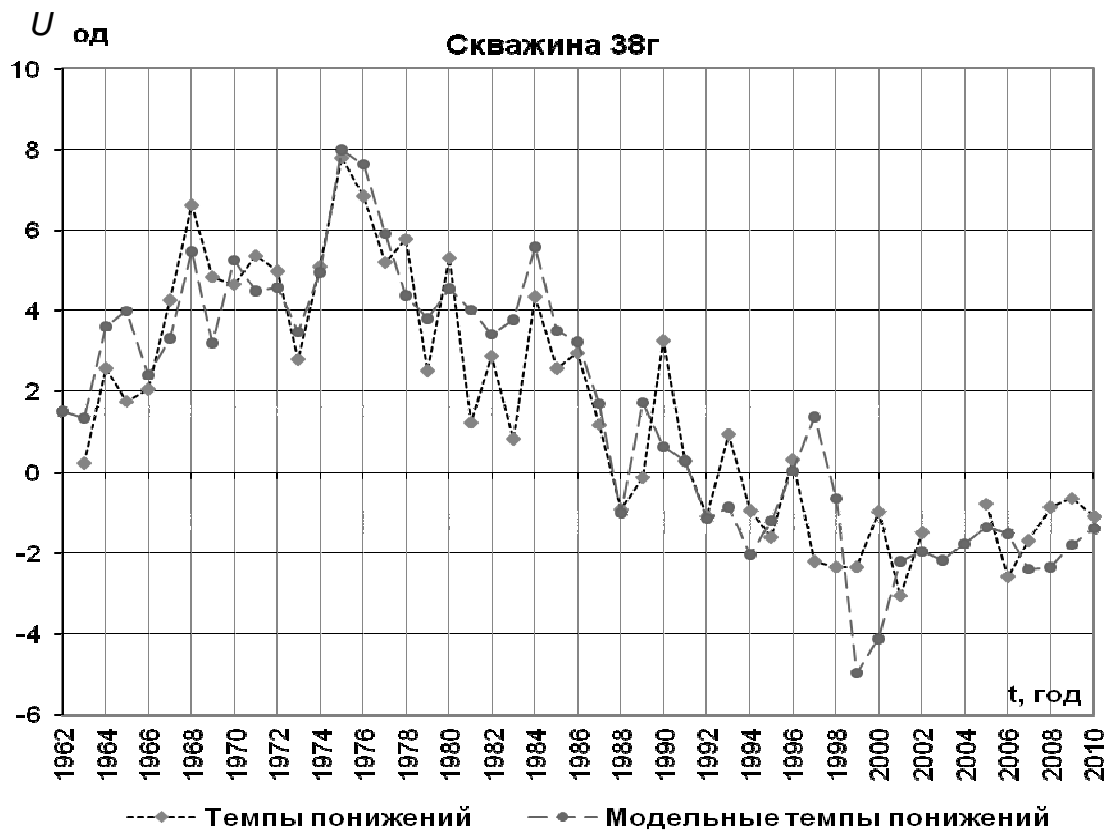


Рис. 7. Графики изменения темпов понижений уровня во времени по скважине 38г (I альбский водоносный горизонт)

2. Разработанная на основе анализа гидрогеохимического облика подземных вод горизонтов альб-сеноманского водоносного комплекса методика оценки технического состояния водозаборных скважин позволяет в составе объектного мониторинга оперативно выявлять и устранять перетоки между водоносными горизонтами.

По минерализации и химическому составу подземные воды альб-сеноманского комплекса относятся к соленым водам хлоридно-сульфатного или сульфатно-хлоридного натриевого состава. Увеличение минерализации и смена химического состава происходят в направлении от областей выходов пластов на севере до их погружения на юге и западе. На фоне этой закономерности в северо-западной части Южно-Мангышлакского артезианского бассейна выделяется зона солоноватых вод с минерализацией менее 5 г/дм³, образуя собственно Куюлууское месторождение площадью около 2500 км² (рис. 8). В створе существующих водозаборных скважин величина минерализации принимает значения от 2 до 4 г/дм³ и изменяется в плане и в разрезе. Корреляция временных рядов значений концентраций компонентов химического состава подземных вод по водозаборным скважинам выявила следующее. Практически содержания всех макрокомпонентов (Ca, Mg, Na+K, Cl, SO₄) имеют высокие коэффициенты корреляции ($r > 0,8$) с величиной минерализации и между собой (табл. № 1). Концентрации гидрокарбонат-иона и содержание фтора обратно пропорциональны вышеуказанным компонентам с коэффициентом корреляции не ниже 0,8. Выявленные закономерности позволили ограничиться изучением только временных рядов минерализации подземных вод.

Таблица 1

Матрица коэффициентов корреляции химического состава по водозаборным скважинам

	М	Cl	SO₄	HCO₃	Na+K	Ca+Mg	F
М	1,0	0,96	0,93	-0,86	0,91	0,90	-0,86
Cl	0,96	1,0	0,90	-0,84	0,89	0,86	-0,84
SO₄	0,93	0,90	1,0	-0,81	0,95	0,81	-0,82
HCO₃	-0,86	-0,84	-0,81	1,0	-0,83	-0,88	0,84
Na+K	0,91	0,89	0,95	-0,83	1,0	0,93	-0,85
Ca+Mg	0,91	0,86	0,81	-0,88	0,93	1,0	-0,83
F	-0,86	-0,84	-0,82	0,84	-0,85	-0,83	1,0

За весь период эксплуатации водозабора было выполнено более 14 тысяч химических анализов подземных вод по скважинам, расположенным как в створе водозабора, так и в зоне его влияния. Основной особенностью гидрохимического режима за рассматриваемый период

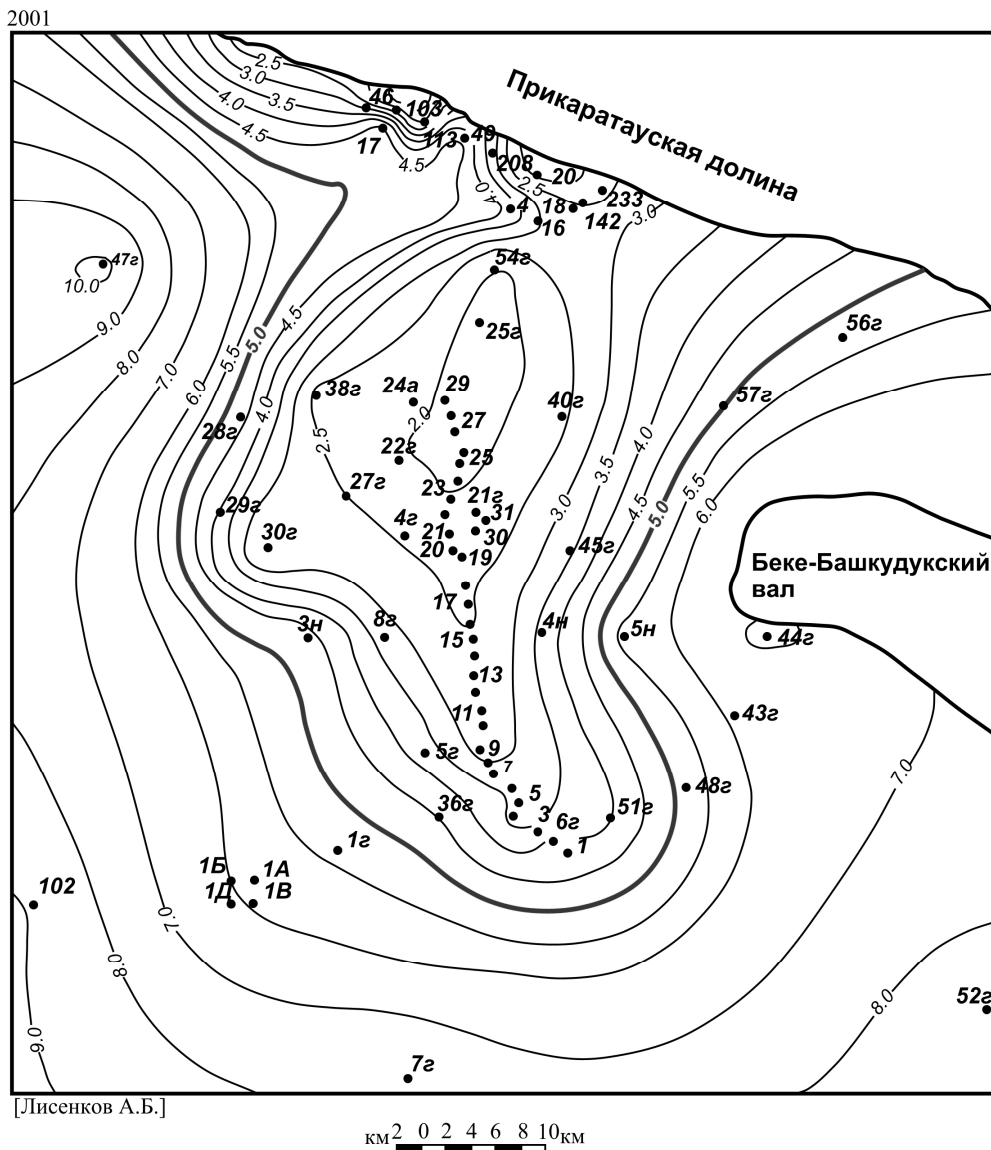


Рис.8. Карта минерализации первого альбского водоносного горизонта Куюлусского месторождения подземных вод.

является отсутствие статистически значимых временных трендов изменения минерализации и, следовательно, химического состава подземных вод, отбираемых из каждой скважины. Периодическая составляющая не выявлена, о чем свидетельствуют результаты гармонического анализа. Случайная составляющая не превышает 15 % от средних значений и обусловлена, по-видимому, как гетерогенно-слоистым строением водоносного пласта, так и точностью исполнения химических анализов. Графики автокорреляционной функции не выходят за пределы доверительного интервала.

Вывод об отсутствии направленного во времени изменения качества подземных вод подтверждается количественным анализом гидрогеологических условий эксплуатации. Латеральные градиенты изменения минерализации по пласту составляют в среднем $0,4 \text{ г/дм}^3/\text{км}$. Скорость конвективного переноса солей по пласту при средних значениях коэффициентов фильтрации $k = 0,5 - 1,0 \text{ м/сут}$, активной пористости $0,1 - 0,2$ и латеральных

уклонах потока к водозабору, не превышающих $5 \cdot 10^{-3}$, составляет 0,025 м/сут или до 8 м/год. Расстояние, на которое переместилась частица воды по пласту за 50-летний период эксплуатации, не превышает 450 м, а расчетное изменение минерализации – не более $0,2 \text{ г/дм}^3$. Последнее значение остается в пределах точности химического анализа для солоноватых вод.

Вертикальный диффузионно-конвективный водообмен через слабопроницаемые отложения определяется мощностью глинистого водоупора $m_0 = 30 \text{ м}$, коэффициентом фильтрации этих глин $k_0 = 10^{-7} \text{ м/сут}$, разницей в уровнях между соседними горизонтами – до 30 м и разницей в величинах минерализации до 5 кг/м^3 . Результирующая этого переноса, составляющая около $2 \cdot 10^{-6} \text{ кг/м}^2 \cdot \text{сут}$, могла бы привести к увеличению минерализации подземных вод в пласте средней мощности 100 м за 50 лет эксплуатации не более чем на $0,003 \text{ кг/м}^3$.

Вертикальный переток подземных вод в зоне расположения тектонических нарушений также вряд ли может существенно изменить режим химического состава отбираемых в процессе эксплуатации подземных вод, поскольку на месторождении за весь предшествующий период уже сформировалась устойчивая зона смешения подземных вод. Тектонические нарушения располагаются на расстояниях, превышающих сотни метров от водозаборных скважин, то есть существенно дальше границы области конвективного переноса за весь период эксплуатации.

Подземные воды в палеоценовом горизонте и в альб-сеноманском комплексе в районе Куюлусского водозабора имеют состав от сульфатно-хлоридного до хлоридного натриевого и минерализацию от 3 (первый альбский) до 8 г/дм^3 (палеоценовый и третий альбский горизонты). При этом в водах палеоценового горизонта процентное содержание солей Са в 2,5 раза, а Mg в 3,3 раза выше, чем в горизонтах альб-сеноманского комплекса за счет уменьшения относительной концентрации иона Na^+ . При практическом равенстве величин минерализации в палеоценовом и II+III альбских горизонтах, в последнем концентрация иона Mg^{2+} в 8 раз ниже (таблица №2).

Концентрация иона НСО^- в %-экв, во всех горизонтах альб-сеноманского комплекса в 2-4 раза выше, чем в палеоценовом горизонте, где его содержание не превышает 2 %-экв.

По классификации Сулина (рис.9) в области погружения палеоценовых отложений в водах повышается минерализация с 8 до $40-70 \text{ г/дм}^3$ и они характеризуются морским генезисом ($\text{Cl/Br} < 200$), хлоридно-натриевым составом, ($\text{Na/Cl} \leq 1$), тогда как воды всех горизонтов альб-сеноманского комплекса имеют метеорный генезис ($\text{Na/Cl} > 1$). Вблизи выходов палеоценовых отложений на периклинальной части Беке-Башкудукского вала (участок Куюлусского водозабора) величина минерализации не превышает 10 г/дм^3 , воды

имеют сульфатно-хлоридный натриевый состав ($Na/Cl \approx 1$). Это свидетельствует, по-видимому, о существовании здесь области питания палеоценового горизонта за счет перелива подземных вод альб-сеноманского комплекса по выявленным ранее зонам его разгрузки.

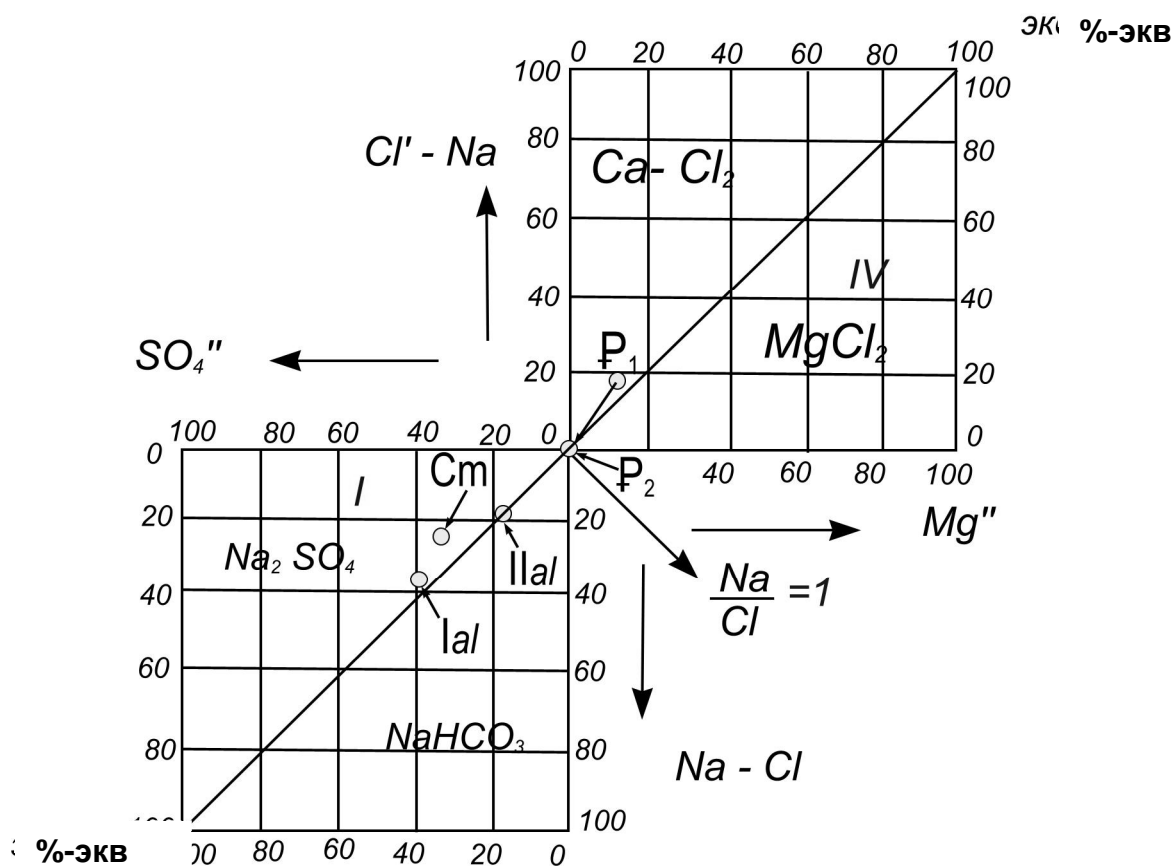


Рис. 9. Систематизация химических анализов подземных вод по классификации В.А. Сулина.

Абсолютные отметки урвней в альб-сеноманском комплексе в естественных условиях существенно превышали палеоценовые, а возможности метеорного питания в этом районе весьма ограничены вследствие аридности климата. Поступление солей сульфатов с водами альб-сеноманского комплекса создало благоприятные условия для жизнедеятельности сульфат-редуцирующих бактерий в палеоценовых морских отложениях, обогащенных органикой. Это обстоятельство подтверждается высокими концентрациями сероводорода (до 45 мг/дм^3) в водах палеоценового горизонта вблизи его выходов (центральная часть Куюлусского водозабора) и практически полным его отсутствием в зоне погружения.

Таким образом, основные отличия состава вод палеоценового горизонта от альб-сеноманских обусловлены его повышенной минерализацией (от 8 г/дм^3 и более) по сравнению с водами сеноманского ($3-5 \text{ г/дм}^3$) и первого альбского ($2-4 \text{ г/дм}^3$) и более низкими относительными концентрациями ионов HCO_3^- и Na^+ . Антагонистами Na^+ в данном случае выступают ионы Ca^{2+} и Mg^{2+} . Как показывает выполненный нами регрессионный

анализ, величина общей жесткости и содержание иона Ca^{2+} имеют высокие коэффициенты корреляции с общей минерализацией в подземных водах альб-сеноманского комплекса ($r = 0.9$), тогда как корреляция Mg^{2+} с минерализацией несколько хуже ($r = 0.8$). Этим обстоятельством определен выбор коэффициента, характеризующего особенности показателей химического состава вод палеоценового горизонта в сравнении с альб-сеноманскими. Таким коэффициентом нами принято соотношение HCO_3/Mg , которое изменяется от 0,1-0,15 для палеоценового до 0,8-3,5 для горизонтов альб-сеноманского комплекса (табл. 2).

Увеличение минерализации подземной воды, поступающей в скважину эксплуатирующую сеноманский или первый альбский горизонты, свидетельствует о наличии перетоков по стволу скважин из палеоценового или II+III альбских горизонтов. При этом, уменьшение коэффициента HCO_3/Mg свидетельствует о возможном поступлении в скважину воды из палеоценового горизонта, тогда как практическое сохранение величины этого коэффициента при одновременном росте минерализации говорит о возможном поступлении более соленых вод из II+III альбских горизонтов. Справедливость такой методики предварительной оценки источника возможного увеличения солености воды подтверждена данными каротажных исследований скважин 12,20, 34с, выполненных в 1980 – х гг. по причине изменения химического состава воды, отбираемой из этих скважин. Указанные скважины были затампонированы. В последующие годы значимых изменений величин минерализации и соотношения HCO_3/Mg подземных вод не происходило, что свидетельствует об удовлетворительном техническом состоянии этих скважин.

Таблица 2

Средние содержания компонентов в подземных водах на участке Куюлусского водозабора, %-экв

Водоносный горизонт	Na	Ca	Mg	HCO_3	Cl	SO_4	M, г/дм ³	$\frac{\text{HCO}_3}{\text{Mg}}$
Палеоценовый	65	19	16	2	65	33	8	0,13
Сеноманский	88	7	5	4	65	31	4	0,80
I альбский	91	6	3	8	53	39	2,7	2,67
II+III альбские	95	3	2	7	75	18	6,6	3,5

3. С 2000 года на гидродинамический режим эксплуатации водозабора оказывают влияние внешние границы в западной и южной части распространения I альбского водоносного горизонта. В соответствии с принципом адаптации скорректирована и откалибрована математическая модель. Адекватность модели подтверждена эпигнозными расчетами.

В 2002 г для переоценки запасов подземных вод в ГКЗ РК была построена региональная модель. На основании этой модели разрабатывались прогнозы и рекомендации,

в частности, был осуществлен перевод всех скважин 1 альбского горизонта на эксплуатацию самоизливом. В настоящее время появилась необходимость в повторной калибровке фильтрационной схемы этого горизонта. При калибровке рассматривался период эксплуатации с 2002 по 2010 гг.

Латеральные размеры региональной модели условий эксплуатации Куюлусского месторождения подземных вод определяются площадью распространения водоносных горизонтов и радиусом влияния водоотбора в течение расчетного периода времени. В связи с этим, границами модели на севере и востоке является подошва выходов водоносных пластов на поверхность земли. Здесь задается граничное условие $Q = 0$ (закрытый контур). На западе и юге граница модели удалена на расстояние, определяемое радиусом влияния на конец эпигнозного периода 2010 г, т.е. 50 лет эксплуатации. При средней величине пьезопроводности пласта $a^* = 3 \cdot 10^5 \text{ м}^2/\text{сут}$ радиус влияния оказывается равным

$$R_{эл} = 1.5\sqrt{a^* \cdot t} = 1.5\sqrt{3 \cdot 10^5 \cdot 18250} = 111 (\text{км}) \quad (1)$$

Допустимая ошибка при решении обратной задачи принята на уровне 10-15 м или 10%, что обусловлено погрешностями в определении положения уровня в наблюдательных и водозаборных скважинах, расходов отдельных скважин, влиянием неравномерной их эксплуатации на определение положения уровня на январь каждого года, и возможно недоучетом влияния гетерогенно-слоистого строения пластов.

Как видно из графика сопоставления понижений уровня $S_m - S_{\phi}$ (рис. 10), модель 2002 г содержит систематическую ошибку. Полученные на этой модели понижения в точках, соответствующих наблюдательным скважинам, практически повсеместно оказались меньшими, чем фактические. Расхождения модели с натурой достигали в среднем 10-20 м, среднеквадратичное отклонение – 12,6 м, то есть до 10,5% от величины фактического понижения уровня. Эти расхождения возникли после 2000 г и достигли своего максимума в 2010 г, причем наибольшие значения ошибки характерны для западной (скв 28г, 38г) и южной (скв 36г, 51г) частей модели.

Ошибка калибровки модели связана в основном с существованием закрытых границ в первом альбском водоносном горизонте на расстояниях порядка 80-100 км от центра водозабора. Влияние этих границ начало проявляться после 40 лет эксплуатации водозабора, то есть после 2000 г. В связи с этим, влияние удаленных границ в модели 2002 г не учтено.

На модели 2010 г закрытые границы были заданы на расстоянии 84 км. к западу и на расстояние 80 км к югу от центра Куюлусского водозабора. Кроме того были ухудшены фильтрационные параметры пласта в восточной части модели, вблизи выходов водоносных пород в сводовой части Беке-Башкудукского вала. По остальным параметрам фильтрационная схема была оставлена без изменений.

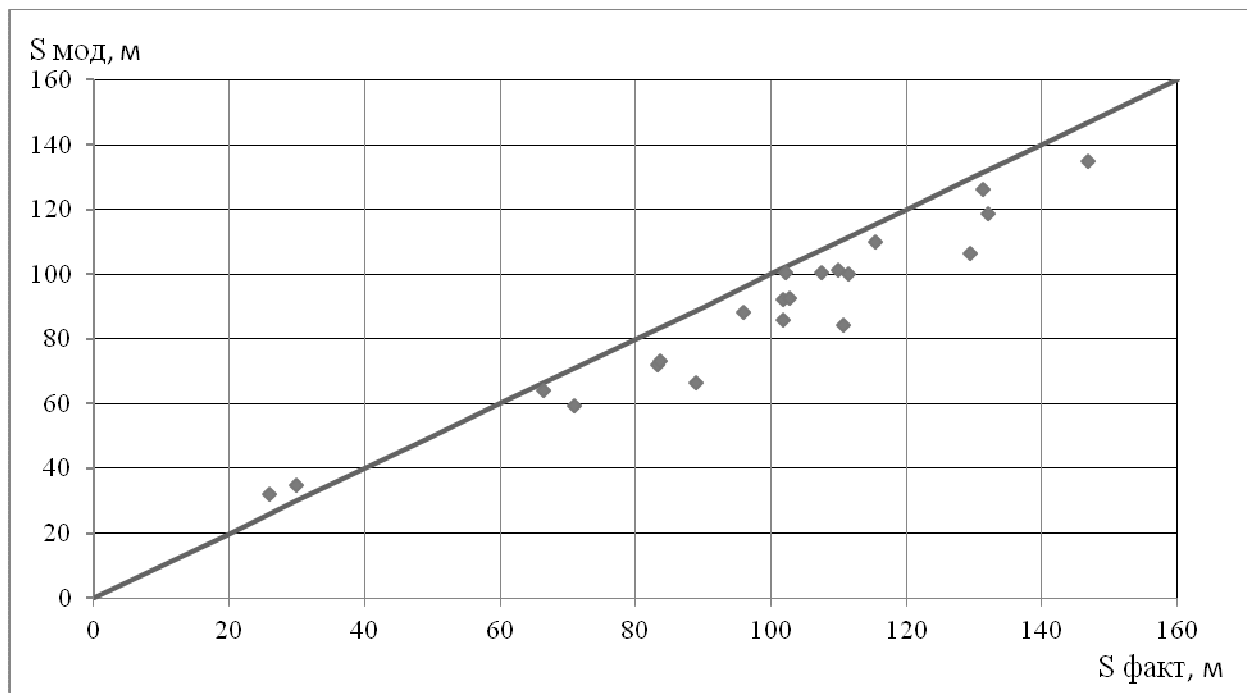


Рис. 10. Сопоставление фактических и модельных значений понижений уровня на модели 2002 г

Размеры скорректированной моделируемой области водоносного пласта сократились на 32 км в широтном и на 16 км в меридиональном направлении по сравнению с ранее существующей схемой и стали равными 142 и 148 км, соответственно. При этом данные о положении уровней воды по наблюдательным скважинам характеризуют территорию размером 60 км в широтном и 70 км в меридиональном направлениях, то есть радиус изученной территории оказывается всего в 2 раза меньше, чем радиус площади распространения водоносного пласта. По западной и южной границам изученной территории величина понижения уровня достигает 80-100 м или порядка 50-60% от понижения уровня по линии водозаборных скважин.

В связи с этим, изученность территории Куюлусского месторождения по первому альбскому горизонту может быть признана достаточной для создания постоянно-действующей модели и выполнения задачи по управлению работой водозабора в оптимальном режиме.

Величина понижений уровня на уточненной фильтрационной схеме практически совпадает с результатами моделирования на исходной схеме до начала 2000-х гг, то есть влияние заданных закрытых границ до этого времени не проявляется. После 2000 г практически на всей территории модели понижения уровня возросли, причем по точкам модели, соответствующим наблюдательным скважинам, понижения уровня отличается от фактических не более чем на 5-8 м, то есть величина ошибки моделирования уменьшилась почти в 2 раза и не превышает 5% от фактической величины понижения уровня в районе водозабора (табл. 3). Это обстоятельство свидетельствует о достоверном задании граничных

условий и фильтрационных свойств водоносного пласта в пределах территории Куюлусского месторождения. При этом отклонение модельных понижений от фактических по скважинам имеют разный знак и, как видно по графику S_m-S_f (рис. 11), характеризуются случайной, а не систематической, ошибкой. Значение стандартного отклонения разницы фактического и модельного понижений получено равным 5,82 м или 6% от среднего значения понижения в створе водозаборных скважин.

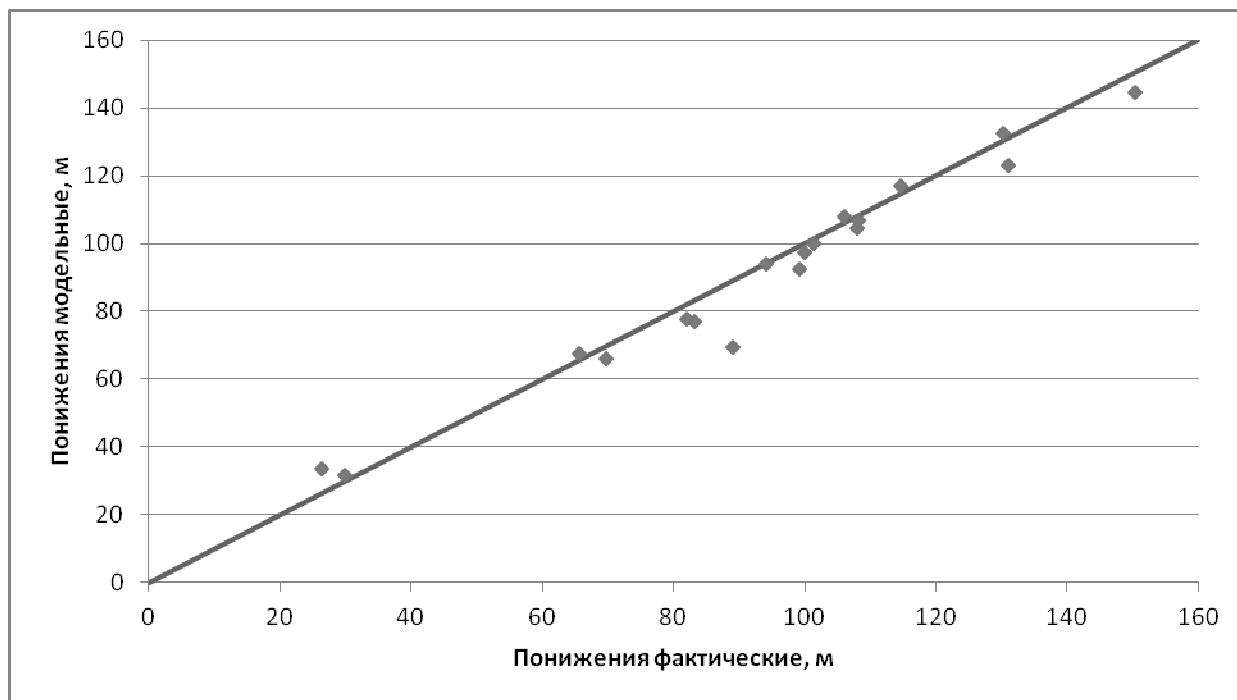


Рис. 11. Сопоставление фактических и модельных значений понижений уровня на модели 2010 г

4. Эффективное управление текущей эксплуатацией подземных вод в сложных гидрогеологических условиях в оптимальном режиме может быть реализовано только на основе комплексного использования региональных и локальных математических моделей, постоянно адаптирующихся данными наблюдений за режимом работы водозабора. Основным фактором, определяющим оптимальные условия эксплуатации Куюлусского водозабора, в настоящее время является сохранение самоизлива подземной воды.

Защита природной среды от возрастающего влияния эксплуатации подземных вод является одной из важнейших проблем гидрогеологии. Для решения этой проблемы необходимо выявлять, оценивать и прогнозировать техногенные изменения в подземных водах, получать всестороннюю информацию о состоянии нарушенного режима и качества подземных вод. Эта информация позволяет обеспечивать управление природоохранной деятельностью и экологической безопасностью при эксплуатации месторождения подземных вод водозаборами, оптимизировать влияние изменения гидрогеологических условий на

окружающую природную и техногенную среды. Научные основы принципов организации и содержания режимных наблюдений за состоянием подземных вод изложены в работах Г.Н. Каменского, Н.Н. Биндемана, А.В. Лебедева, А.А. Коноплянцева, В.С. Ковалевского, С.М. Семенова. Целенаправленная научно обоснованная система регламентированных наблюдений за состоянием подземных вод под воздействием природных и техногенных факторов, систематизации, обработки и анализа результатов наблюдений, обеспечивающая решение задач прогноза, контроля и регулирования нарушенного режима и качества называется мониторингом подземных вод. Вследствие этого, основным инструментом исследования и интерпретации режима подземных вод являются детерминированные модели.

Эффективность функционирования мониторинга крупного водозабора подземных вод определяется, с одной стороны, содержанием, наблюдений которым наполняется его база данных в течение всего периода эксплуатации и, с другой, используемыми методами обработки этих данных.

Сложность гидрогеологических условий Куюлусского месторождения определяется практическим отсутствием естественных ресурсов подземных вод, напорно-безнапорными условиями формирования эксплуатационных запасов существующего водозабора, расположенного в краевой части артезианского бассейна, существенной неоднородностью химического состава подземных вод.

Основные требования к управлению эксплуатацией Куюлусского месторождения подземных вод заключаются в следующем: 1) максимальное продление срока эксплуатации подземных вод при заданных ограничениях на суммарный водоотбор, допустимые понижения уровней и сохранение качества подземных вод; 2) рациональное использование насосного оборудования и минимальные эксплуатационные затраты; 3) построение эффективных моделей, достаточно полно учитывающих гидрогеологические, санитарно-гигиенические, технико-экономические условия месторождения подземных вод, которые возможно реализовать с минимальными затратами на ЭВМ; 4) комплексное использование долго- и краткосрочных гидрогеологических прогнозов: на основе первых выполняют оценку эксплуатационных запасов подземных вод, на базе вторых выбирают реальный режим эксплуатации с учетом возможности самоизлива и рационального выбора насосного оборудования; 5) создание адаптирующейся системы управления (АСУ), регулирующей в продолжение всего периода эксплуатации на основе наблюдений за режимом подземных вод и техническими условиями работы скважин, т.е. поддержание адаптационной обратной связи системы "Водозабор – ЭВМ"; 6) использование рекомендаций АСУ для уточнения гидрогеологических прогнозов, продления периодов фонтанирования скважин, контроля за КПД насосов и приобретением новых, машинной обработки и хранения многолетних

наблюдений за режимом подземных вод, при необходимости для очередной переоценки эксплуатационных запасов.

На первом этапе исследований решена серия эпигнозных задач на региональной модели с целью уточнения гидродинамических параметров, типа граничных условий каждого из пластов. На моделях воспроизведен опыт 50-летней эксплуатации рабочих водоносных горизонтов альб-сеноманского комплекса и выполнен как долгосрочный (на 25 лет), так и четырехлетний прогноз с 2010 до 2013 года. Площадь региональных моделей масштаба 1:200 000 составляет 40 тыс. км². Модели являются постоянно-действующими адаптирующимися системами, которые базируются на результатах объектного мониторинга. Такие модели позволяют выполнить прогноз изменения уровня в связи с длительной эксплуатацией водозабора в центральной части изучаемой территории с учетом особенностей строения водоносных пластов и влияния внешних удаленных границ.

Гидродинамические параметры пласта обоснованы многочисленными опытами, выполненными в процессе разведочных работ и эксплуатации подземных вод. Объектный мониторинг на месторождении позволил поставить и решить задачу по уточнению гидрогеологических условий Куюлусского месторождения подземных вод в условиях его длительной эксплуатации.

На региональных моделях воспроизведен весь период разведки и эксплуатации водозабора с 1959 по 2010 гг. Достоверность полученных результатов определялась сходимостью модельных понижений уровней подземных вод и их темпов с фактическими, как по водозаборным, так и по наблюдательным скважинам, с учетом реальных расходов из конкретных скважин, заданных на модели.

На втором этапе создана локальная модель, как крупномасштабная врезка в региональную. Продолжительность прогнозного периода, рассматриваемого на локальной модели, отвечает потребностям краткосрочного гидродинамического прогноза и не превышает 3-5 лет. Оптимальное управление работой водозабора предполагает рассмотрение многочисленных вариантов режима работы отдельных водозаборных скважин, возможность выявления взаимного влияния каждой скважины на величину снижения уровня. Площадь блоков региональной модели в районе водозабора составляет 4 км², а расстояние между скважинами изменяется от 1 до 2 км, поэтому в каждом расчетном блоке расположено по 2-3 скважины. Это оправдано при решении задачи оценки запасов подземных вод, но делает невозможным рассмотрение особенностей режима эксплуатации каждой скважины. Моделирование в этом случае целесообразно осуществлять на локальных крупномасштабных моделях-врезках, которые представляют собой ключевые участки региональной (мелкомасштабной) модели.

Локальная постоянно-действующая модель охватывает меньшую область, чем модель месторождения, при этом в изучаемом водозаборе скважины расположены в отдельных блоках и их расходы не суммируются. Модель позволяет оценить влияние каждой скважины, ее расход, но она не учитывает долговременные изменения гидрогеологических условий месторождения и влияние внешних удаленных границ. Поэтому внешние граничные условия для локальной модели, задаваемые в виде постоянных понижений, уточняются на мелкомасштабной региональной модели.

На третьем этапе осуществлена калибровка локальной модели по данным прогнозного решения, выполненного на региональной модели как эталон. При этом на локальной модели выставлены начальные условия, соответствующие существующему в начале 2010 г. положению уровней подземных вод, полученных с региональной модели (рис. 12). Водоотбор из скважин и внешние граничные условия на локальной модели заданы на прогноз идентичными задаваемым на региональной модели. Полученные изменения уровней на локальной модели по опорным точкам (водозаборным скважинам) должны соответствовать таким же изменениям на региональной модели.

На четвертом этапе решения задачи текущего управления эксплуатацией водоотбора выполнено моделирование на локальных крупномасштабных моделях-врезках (рис.13).

Результатом этих исследований явилось создание постоянно действующей геофильтрационной модели для оперативного управления режимом работы водозабора на месторождении. Локальная модель позволяет облегчить управление распределением расходов между скважинами. Задавая на модели перераспределение расходов в скважинах, определяем вызванное этим изменение уровня (в разных частях линейного ряда). По контуру локальной модели заданы граничные условия первого рода, постоянные уровни, определенные решением прогнозной задачи на региональной модели. Таким образом, на локальной модели учтено влияние внешних границ пласта. Размеры локальной модели составляют около 4 тыс. км² в масштабе 1:100000, то есть размеры блоков равны 1 км. Каждая водозаборная скважина расположена в отдельном блоке модели. Это позволяет более полно учитывать особенности режима их эксплуатации, осуществлять выбор оптимального распределения водоотбора между отдельными скважинами линейного ряда.

Использование локальных моделей позволяет:

- Более детально оценить режим эксплуатации каждой скважины.
- Существенно сократить размеры моделируемой области пласта, уменьшить количество расчетных блоков и тем самым ускорить процесс решения каждого варианта прогнозного распределения водоотбора при выборе оптимального режима текущей эксплуатации скважин.

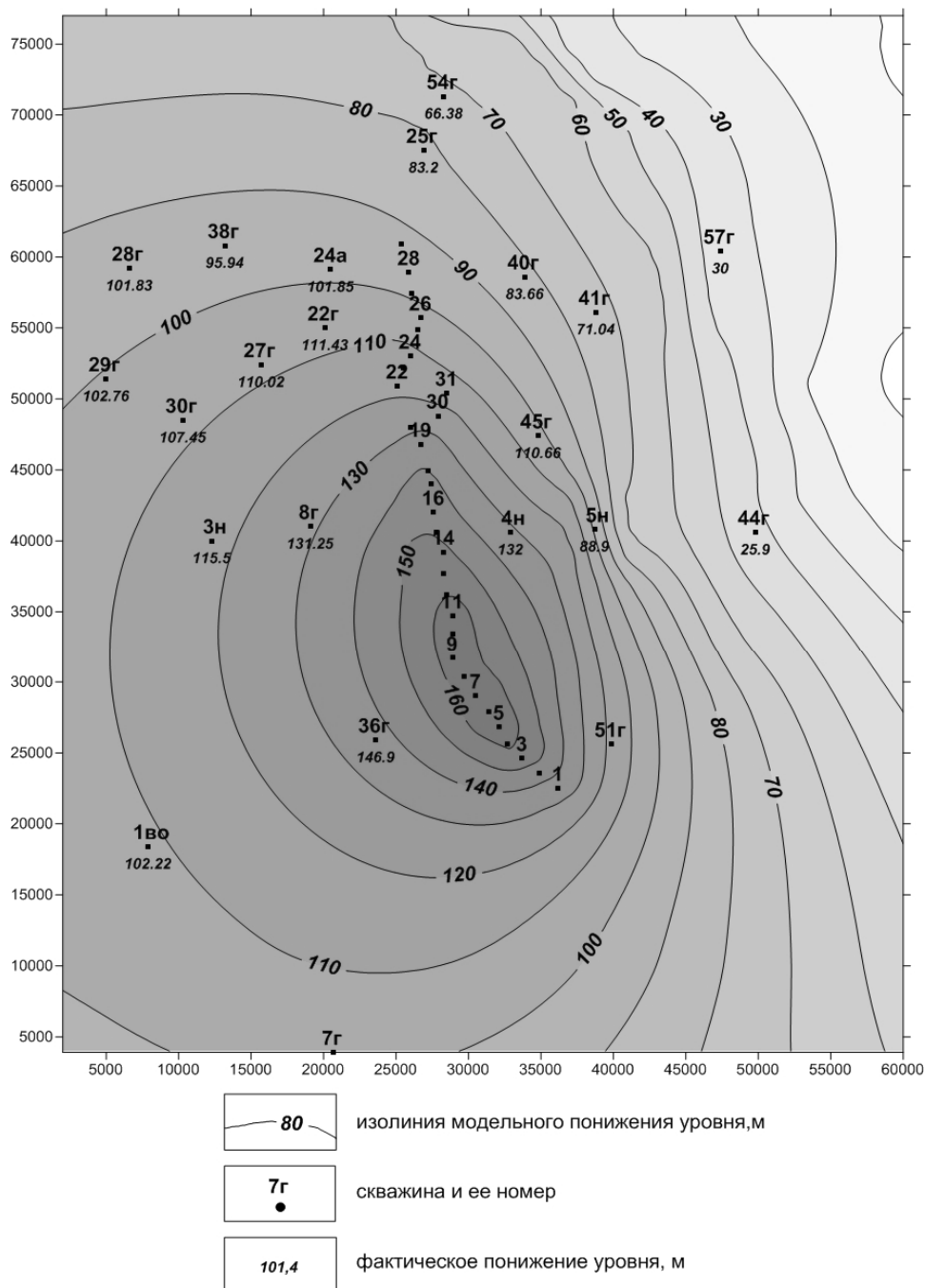


Рис. 12. Карта модельных понижений на 2010 г.

Вместе с тем на функционирование локальных моделей накладываются определенные ограничения:

- Начальные уровни, расходы, граничные условия и строение пласта должны полностью соответствовать региональным моделям 1 : 200 000 масштаба.
- Радиус влияния от эксплуатации водоотбора на прогнозный период не должен превышать расстояния до границ локальной модели. Таким образом, период краткосрочного прогноза на модели не должен превышать 3-5 лет. По прошествии этого периода необходимо проводить уточнение внешних граничных условий локальной модели путем воспроизведения условий эксплуатации на следующие 3-5 лет на региональной модели.

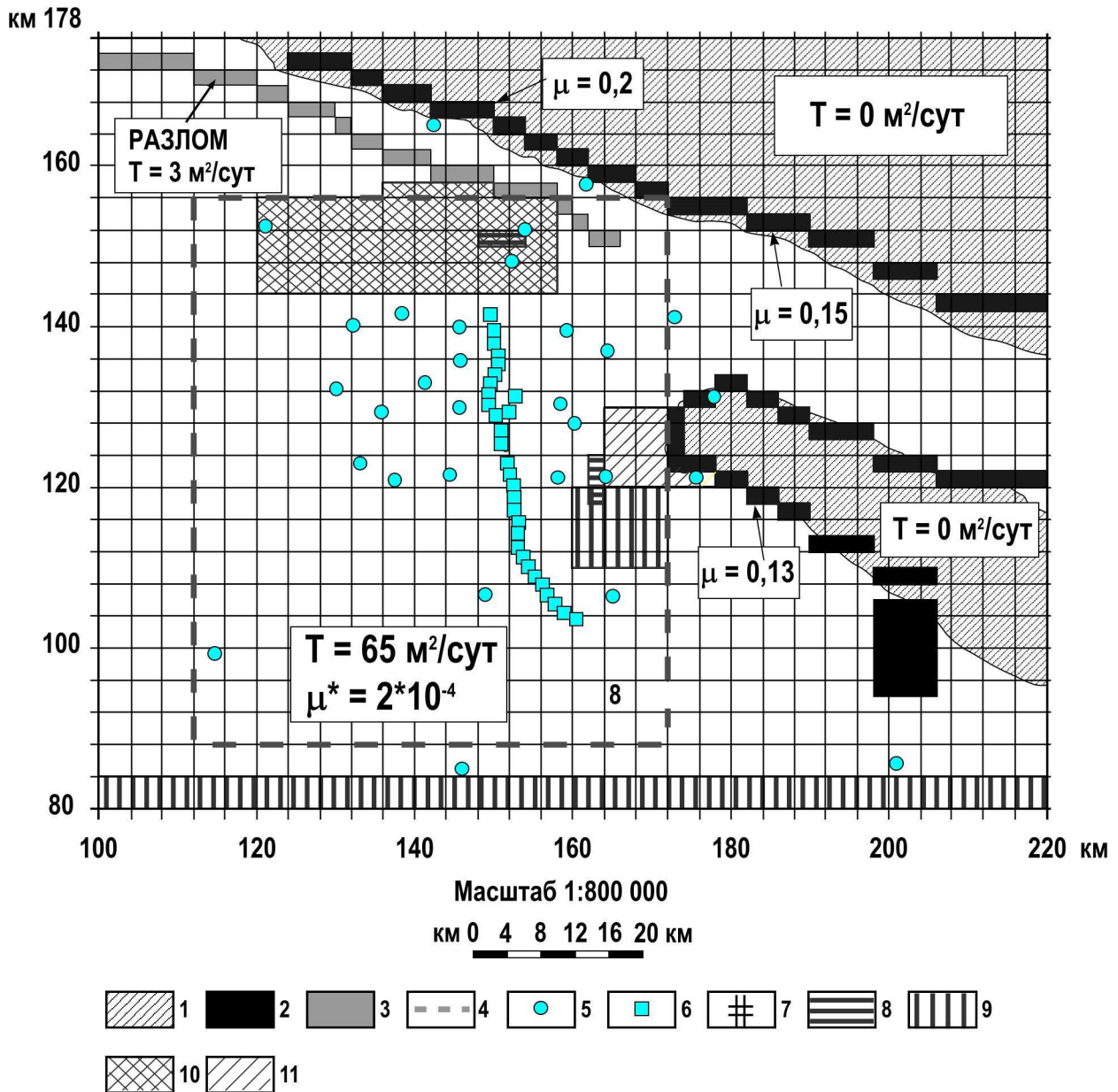


Рис.13. Соотношение региональной и локальной моделей:

1 – область отсутствия водоносного пласта; 2 – выходы пласта на модели; 3 – линия разлома; 4 – граница локальной модели; 5 – наблюдательная скважина; 6 – водозаборная скважина; 7 – сетка модели: 1 ячейка соответствует 4-м блокам региональной и 16 блокам локальной модели; 8 – 11 – водопроводимость, м²/сут: 8 – 3, 9 – 30, 10 – 50, 11 – 90.

Подземные воды Куюлусского месторождения в настоящее время используются для технического водоснабжения, а в смеси с дистиллированной водой для приготовления воды хозяйственно-питьевого назначения. Вследствие десятикратного преобладания дистиллированной воды в смеси, соленость подземной воды ограничивается значением 4 г/дм³, то есть величина минерализации воды в существующих условиях имеет

второстепенное значение. Более важным критерием оптимизации режима водозабора в настоящее время является сохранение самоизлива из скважин.

Основные выводы и задачи дальнейших исследований

В процессе выполнения исследований получены следующие основные результаты.

1. Одним из основных диагностических признаков при выявлении особенностей сильно нарушенного режима подземных вод является величина темпа понижения уровня. Этот показатель в условиях нестационарной фильтрации обладает большей чувствительностью по сравнению с величиной понижения уровня.

2. На условия напорно-безнапорной нестационарной фильтрации при эксплуатации подземных вод Куюлусского месторождения с 2000 г оказывают влияние отдаленные закрытые границы, расположенные в южной и западной частях области влияния водозабора.

3. За 50-летний период эксплуатации водозабора не произошло существенных изменений минерализации подземной воды, извлекаемой из скважин, что установлено в результате статистической обработки данных химических анализов и геомиграционных расчетов.

4. Сероводород в водах палеоценового горизонта в области его выходов на дневную поверхность формируется за счет поступления сульфат-иона из нижележащего альб-сеноманского водоносного комплекса и жизнедеятельности сульфатредуцирующих бактерий.

5. Основным фактором, определяющим оптимальные условия эксплуатации, в настоящее время является сохранение самоизлива подземной воды. Управление эксплуатацией подземных вод Куюлусского месторождения в оптимальном режиме основывается на комплексном использовании разработанных региональных и локальных геолого-математических моделей, адаптированных данными мониторинга действующего водозабора.

Список работ, опубликованных по теме диссертации

1. Применение методов математической статистики при обработке гидрогеологической информации (на примере Куюлусского месторождения подземных вод Казахстана) // Инженерные изыскания. М.: 2012, №2.С. 64-71
2. Анализ гидродинамического и гидрогеохимического режима эксплуатации Куюлусского месторождения с целью повышения эффективности функционирования системы объектного мониторинга // Материалы VI Международной научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Молодые - наукам о Земле». РГГРУ. М.:2012.С.147-149
3. Принципы организации объектного мониторинга на крупном водозаборе (Куюлусское месторождение, Казахстан) // Молодой ученый. М.: 2012, №2. С. 95-99