

ОПЫТ РАЗВЕДКИ И ПОДСЧЁТА ЗАПАСОВ ПЛАСТОВОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ ПОДЗЕМНЫХ ВОД

ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ

ПОИСКИ И ПРЕДВАРИТЕЛЬНАЯ РАЗВЕДКА

ДЕТАЛЬНАЯ РАЗВЕДКА

Диагностика и интерпретация результатов ОЭО

Оценка гидрогеодинамических параметров

ПРОГНОЗНЫЕ РАСЧЁТЫ ВОДОЗАБОРА

ГИДРАВЛИЧЕСКИЙ МЕТОД

ГИДРОДИНАМИЧЕСКИЙ МЕТОД

Калибрация модели

Прогнозное моделирование

Балансовая структура эксплуатационного водоотбора

ПРОГНОЗ КАЧЕСТВА ВОДЫ ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ

ОПЫТ РАЗВЕДКИ И ПОДСЧЁТА ЗАПАСОВ ПЛАСТОВОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ ПОДЗЕМНЫХ ВОД

(по данным разведки для водоснабжения г. Шадринска,
Курганская геологоразведочная партия, Кондратьев В.Н.,
Зауральская партия геологического факультета МГУ, Штенгелов Р.С.
1969-72 г.г.)

Разведка проводилась в начале 70-х прошлого века для водоснабжения г. Шадринска Курганской области (в те времена – с населением около 70 тыс. жителей и несколькими крупными промпредприятиями). По единовременному обмеру, суммарное городское хозяйственно-питьевое потребление составило около 12-13 тыс. м³/сутки, из них 4-5 тыс. м³/сутки от централизованного городского водозабора (4 скважины), остальное – из децентрализованной системы ведомственных скважин и частных копаных колодцев в черте города. Кроме того, промпредприятия потребляют ещё около 15 тыс. м³/сутки технической воды из р.Исеть. Качество воды в Исети невысокое – сильная бактериальная заражённость, мутность и пр.

Водопотребность города на перспективу определена в 56 тыс. м³/сутки, из них 20 тыс. м³/сутки на первую очередь. Единственный удовлетворительный по качеству источник водоснабжения – подземные воды.

Район разведки расположен между горным сооружением Урала и р.Тобол и принадлежит Тобольскому артезианскому бассейну – это западная периферия Западно-Сибирского артезианского мегабассейна.

Основная артезианская структура создаётся моноклинально падающими на восток (с углами 1-5°) отложениями мезокайнозоя (рис. 8.6) – от меловых (залегающих на палеозойском фундаменте) до неогеновых и четвертичных отложений. До нижнего олигоцена включительно – морские отложения, причем эоцен в основном кремнистый (опоки, диатомиты) за счёт холодной бореальной трансгрессии. Выше залегает сложнопостроенная пёстрая континентальная толща (верхи палеогена, неоген и четвертичные образования), невыдержанная по площади, мощности и составу.

Рельеф территории – слаборасчленённая равнина с широкими речными долинами и пологими склонами. Основная река – Исеть, с долиной шириной 2-5 км, с обширными надпойменными террасами. Глубина эрозионного вреза 50-70, до 100 м.

Характерный сводный гидрогеологический разрез:

Воды спорадического распространения в континентальной толще четвертичных, неогеновых и верхнеолигоценовых отложений распространены на междуречьях и бортах

долин. Водовмещающие отложения обычно песчано-глинистые, мощностью 5-20 м, с невысокой проницаемостью; минерализация подземных вод часто повышенная.

В днище долины Исети распространён **водоносный горизонт** в аллювиальных отложениях поймы и надпойменных террас. Это грунтовые воды с небольшой глубиной залегания, минерализация до 0.5-0.8 г/л; они активно эксплуатируются копаными колодцами в мелких населённых пунктах.

Слабопроницаемый слой, включающий в себя *чеганские* глины $Pg_2^3 - Pg_3^1$ (мощностью 50-60 м) и нижезалегающие диатомиты и диатомитовые глины *ирбитской* свиты Pg_2^{2-3} мощностью до 40-50 м (в незеродированном состоянии под междуречьями). В пределах крупных эрозионных врезов чеганские глины размыты и аллювий лежит сразу на ирбитских диатомитах с остаточной мощностью от 10 до 30 м в районе Шадринска.

Водоносный горизонт в трещиноватых опоках *серовской* свиты (нижний эоцен, Pg_2^1) мощностью 50-60 м – это первый от поверхности напорный межпластовый горизонт. Он выдержан по площади и по составу и является маркирующим для всего Зауралья. Под междуречными пространствами опоковый горизонт перекрыт полным комплексом чеганских и ирбитских отложений, в днище долины Исети – только эродированными ирбитскими диатомитами. Напор над кровлей 10-50 м, в речных долинах на поймах скважины самоизливают.

Во всём Зауралье опоковый горизонт активно эксплуатируется. Качество воды пёстрое: на междуречьях 2-3, до 5-7 г/л; в речных долинах подземные воды обычно пресные или слабосоленоватые 0.8-1.3 г/л, но отмечаются и локальные зоны с минерализацией до 1.5-2.5 г/л, которые связывают с очагами разгрузки из нижележащего мелового горизонта.

По опыту эксплуатации (более 2-х тысяч скважин) известно, что фильтрационные свойства трещиноватых опок изменяются резко, но упорядоченно: в днищах долин проводимость опокового пласта достигает сотен и первых тысяч $m^2/сутки$; по направлению к междуречьям она быстро уменьшается и на расстоянии 2-3 км от днища долины составляет уже не более 1-50 $m^2/сутки$. Этот факт объясняют значительным разуплотнением опок (это слабые на разрыв полускальные породы) в результате снятия части геостатического давления в процессе четвертичного эрозионного врезания долин.

Слабопроницаемый слой бейделлитовых глин *талицкой* свиты (палеоцен, Pg_1). Под ними – толща маастрихт-датских глин, аргиллитов, мергелей ($K_2m - d$). Суммарная мощность более 100 м.

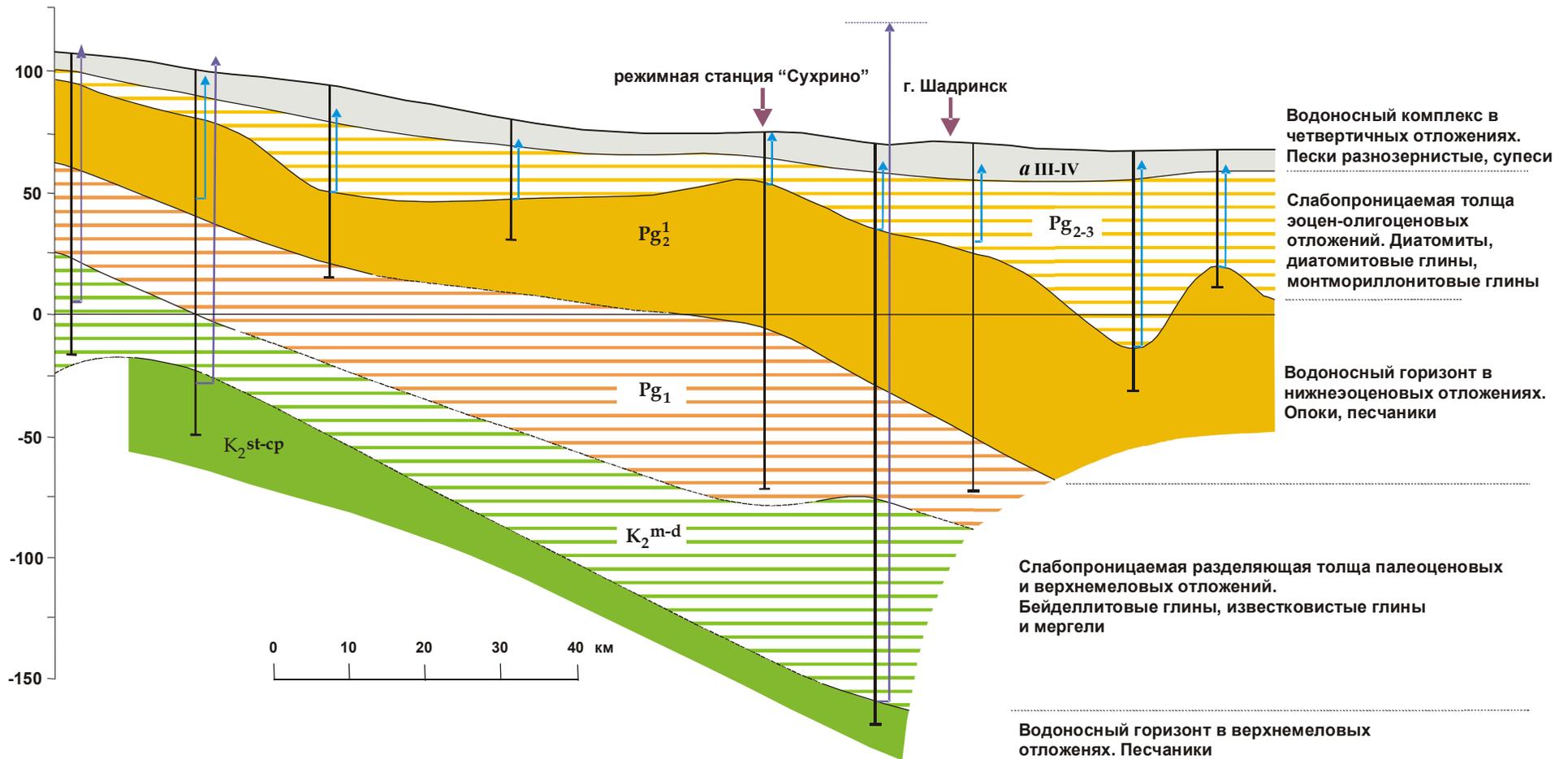


Рис. 8.6. Гидрогеологический разрез по днищу долины р. Исеть

Следующий межпластовый напорный **водоносный горизонт** – в верхнемеловых песчаниках ($K_{2st} - cp$) небольшой мощности 10-20 м; высоконапорный – в долине Исети напор над поверхностью земли около 50 м (давление 5.2 атм на устье скважины).

В целом для территории повсеместно выдерживается картина формирования потоков в слоистых толщах по схеме Мятиева-Гиринского: вертикальное распределение напоров на междуречьях нисходящее, в днищах долин рек – восходящее.

Из всех упомянутых водоносных горизонтов только опоковый может рассматриваться как *перспективный* для поисков МПВ. Четвертичный-неогеновый горизонт явно недостаточен – даже аллювий Исети имеет мощность не более 10-15 м и проводимость от единиц до максимум $150 \text{ м}^2/\text{сутки}$. Меловой горизонт непригоден по качеству – минерализация в районе Шадринска 9.8 г/л.

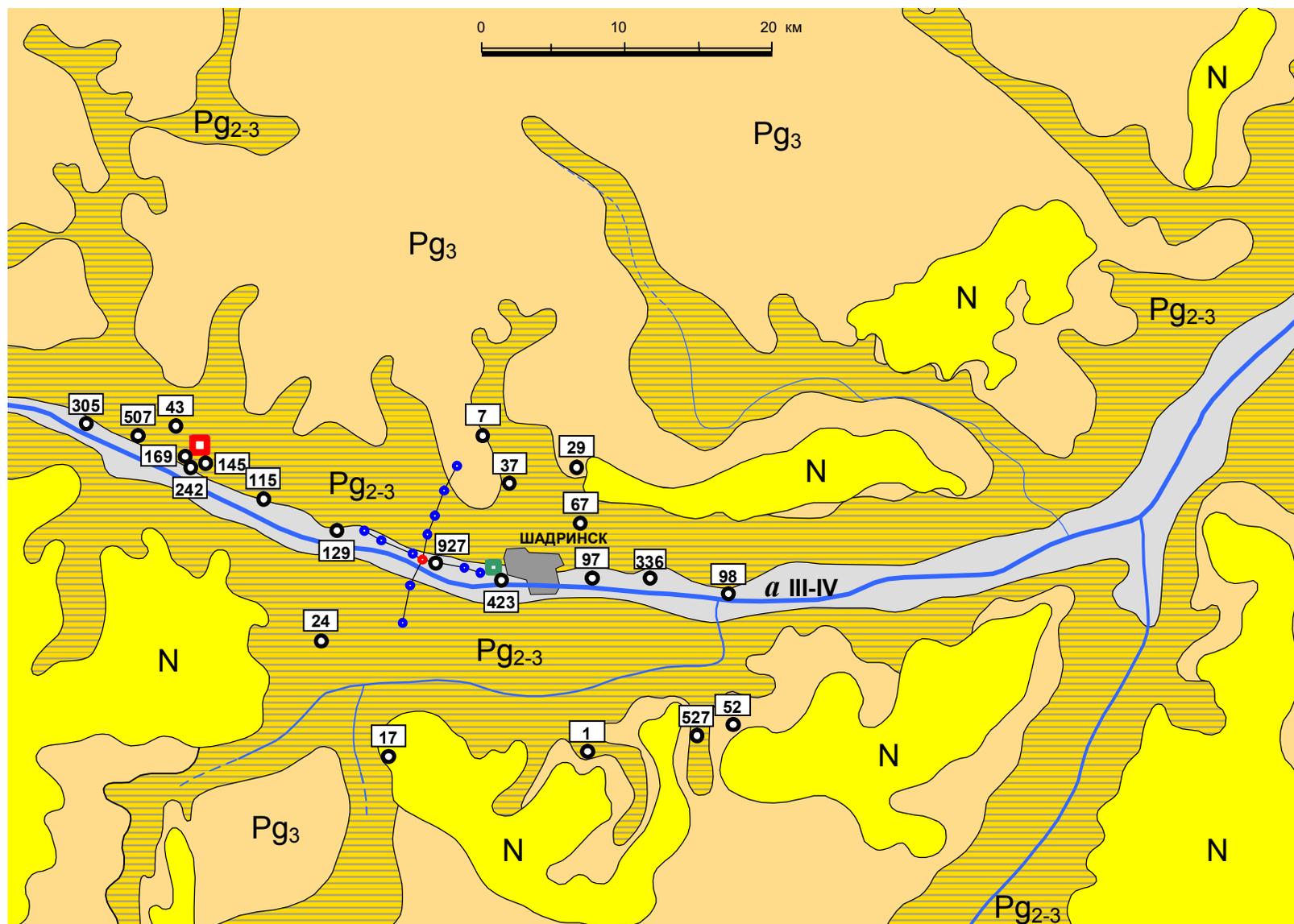
С учётом этих обстоятельств **поиски** проводились на опоковый горизонт в долине р.Исеть (рис. 8.7); пройдены продольные профили скважин с пробными и опытными одиночными откачками по террасам Исети и её левобережного притока Барневы, с несколькими водораздельными рассечками (по 2-3 скважины).

Участок **предварительной разведки** намечен в долине Исети в 4-5 км выше города, где поисковая скв.12 дала один из наиболее высоких удельных дебитов – более $900 \text{ м}^2/\text{сутки}$. На этом участке проведена серия одиночных откачек и две кустовые продолжительностью до месяца. Признаков выполаживания графиков временного прослеживания при кустовых откачках не наблюдалось. Определена проводимость опок в днище долины $T = 910 \text{ м}^2/\text{сутки}$ и пьезопроводность $a = 1.5 \cdot 10^5 \text{ м}^2/\text{сутки}$ (то есть упругая водоотдача $6 \cdot 10^{-3}$ – довольно высокая, что можно оправдать сильной трещинной разрушенностью неглубоко залегающего пласта опок).

Ширина полосы высокой проводимости в днище долины $L_{\Pi} \approx 2-3 \text{ км}$.

По результатам предварительной разведки произведен аналитический расчёт возможной производительности сосредоточенного водозаборного узла по схеме изолированного пласта-полосы с параллельными непроницаемыми границами, то есть в расчёте только на естественные (упругие) запасы ограниченного в плане пласта:

$$Q_3 = \frac{2\pi TS_{\text{доп}}}{\frac{3.55\sqrt{at_3}}{L_{\Pi}} + \ln \frac{L_{\Pi}}{2\pi r_c}}$$



43 Поисковая скважина (цифра – удельный дебит, м²/сутки)
● Наблюдательные скважины ОЭО

■ Режимная гидрогеологическая станция «Сухрино»
■ Городской водозабор г.Шадринска

Рис. 8.7

При $L_{\Pi} = 2500$ м, $S_{\text{доп}} = 30$ м (до кровли опок), $t_{\text{э}} = 10^4$ суток, $r_c = 1$ м (водозаборный узел из 3-х скважин) возможный эксплуатационный дебит составил бы $2810 \text{ м}^3/\text{сутки}$. Получается, что для выполнения полной заявленной потребности нужно 15-20 таких участков – где их разместить? С учётом взаимодействия участков потребуется не менее 100 км речной долины, что абсолютно нереально. Понятно также, что дополнительное уточнение параметров, ширины полосы или радиуса водозаборного сооружения вряд ли что-то принципиально изменит.

Однако, более тщательный анализ гидрогеологической обстановки даёт поводы для размышлений.

1. Ведь даже действующий городской водозабор, эксплуатирующий опоковый горизонт, берёт почти 5 тыс. $\text{м}^3/\text{сутки}$ при понижениях около 6 м и – главное – при практически стационарном режиме (понижения не прогрессируют уже более 10 лет). Значит, действуют какие-то балансовые факторы, стабилизирующие депрессионную воронку горводозабора.

2. Можно также увидеть интересные обстоятельства при внимательном анализе естественной гидрогеодинамической обстановки. Пьезометрическая поверхность опокового горизонта имеет своеобразный характер. Карта гидроизопьез для территории Тобольского бассейна (рис. 8.8) отчётливо свидетельствует, что сток в межпластовом опоковом горизонте имеет типично *местный характер*, замыкаясь в пределах речных бассейнов разного порядка. На междуречьях градиенты напора совсем небольшие, а в бортовых частях долин они резко возрастают – в десятки, если не в сотни раз. Почему ?

Причин возрастания градиента напора в фильтрационном потоке может быть только две – они следуют из закона Дарси: либо *уменьшение проводимости* пласта, либо соответствующее *возрастание расхода* потока. Но с проводимостью всё обстоит как раз наоборот – она значительно возрастает при приближении к речным долинам. Следовательно, причиной столь заметного увеличения напорного градиента (к тому же на фоне возрастающей проводимости!) может быть только *очень значительное увеличение расхода* по опоковому пласту на подходе к речной долине.

Учитывая повсеместное межпластовое залегание горизонта, увеличение расхода потока в нём может быть обусловлено только *резким возрастанием интенсивности перетекания*.



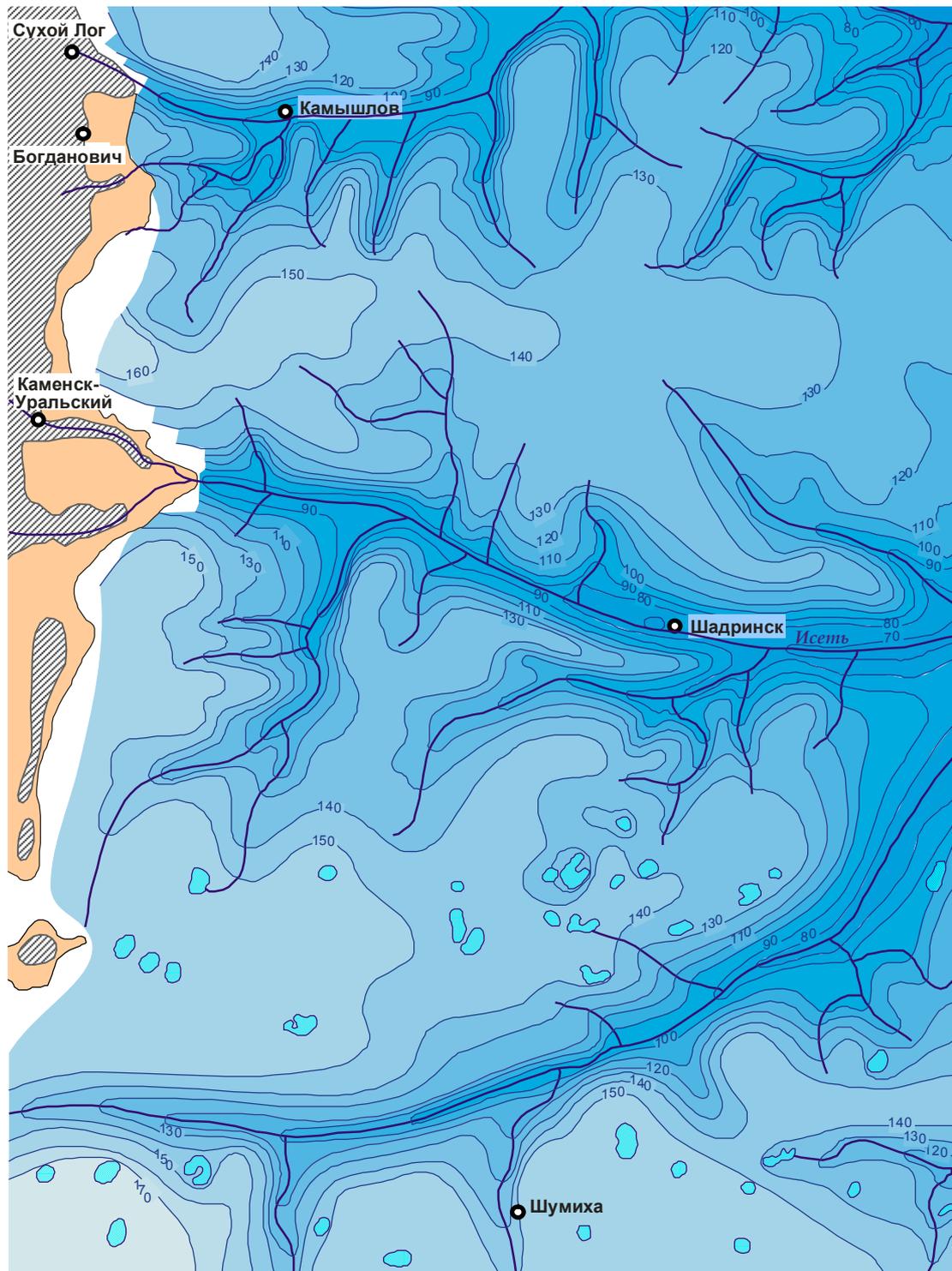


Рис. 8.8. Карта гидроизопьез нижнеэоценового водоносного горизонта (с сечением 10 м)

Тогда возникает очередной вопрос: почему так возрастает интенсивность перетекания в придолинной зоне? Опять же возможны две причины: либо возрастает *вертикальный градиент* напора, либо возрастает *проницаемость перекрывающего разделяющего слоя*.

Первая причина, по-видимому, как-то проявляется (немного увеличивается разность уровней, немного уменьшается мощность ирбитских диатомитов), но явно недостаточно. Остаётся предполагать многократное (на порядки!) возрастание K_0 в прибортовых частях речных долин. Скорее всего, здесь действует тот же генезис, что и для опок – разуплотнение, растрескивание диатомитов и глин при бортовом и донном отпоре в пределах четвертичных эрозионных врезов. Немаловажно также, что диатомиты (в отличие от опок) подвергались прямому физическому выветриванию в субаэральных условиях при врезании речной долины.

Факт усиленного перетекания (причём – именно *сверху*, из грунтового горизонта) подтверждается и характером изменения *химического состава* подземных вод в опоковом горизонте (рис. 8.9). На междуречьях, где низкие величины K_0 и ещё малые расходы в опоковом пласте, существует застойный режим водообмена и соответственно высокая минерализация, до 5-7 г/л. На бортах, как раз в области возрастания градиентов пьезометрической поверхности, наблюдается значительное снижение минерализации до 0.5-1 г/л. Локальное, «очаговое» возрастание её в днищах долин связано, вероятно, с восходящей разгрузкой минерализованных вод из мелового водоносного горизонта.

Очевидно, что при таком активном участии перетекания в естественном режиме опокового горизонта оно будет не менее существенно проявляться и *в условиях его эксплуатации*. Следовательно, при разведке необходимо основательно изучать процессы и параметры перетекания и делать прогнозы работы водозабора по соответствующей расчётной схеме. Это особо необходимо и для достоверного прогнозирования возможного изменения качества воды при длительной эксплуатации.

Поэтому было решено ориентировать **детальную разведку** на гидравлическую оценку ЭЗ, то есть провести опытно-эксплуатационную откачку большой длительности и интенсивности. ОЭО проводилась в летний период в течение 72 суток (июнь-август) из двух разведочно-эксплуатационных скважин (третья – резервная) с суммарным дебитом от 12 до 15 тыс. м³/сутки, то есть близко к необходимому эксплуатационному дебиту 1-ой очереди.

Положение опытно-эксплуатационного куста и схема наблюдательной сети при ОЭО показаны на рис. 8.7 и 8.10.



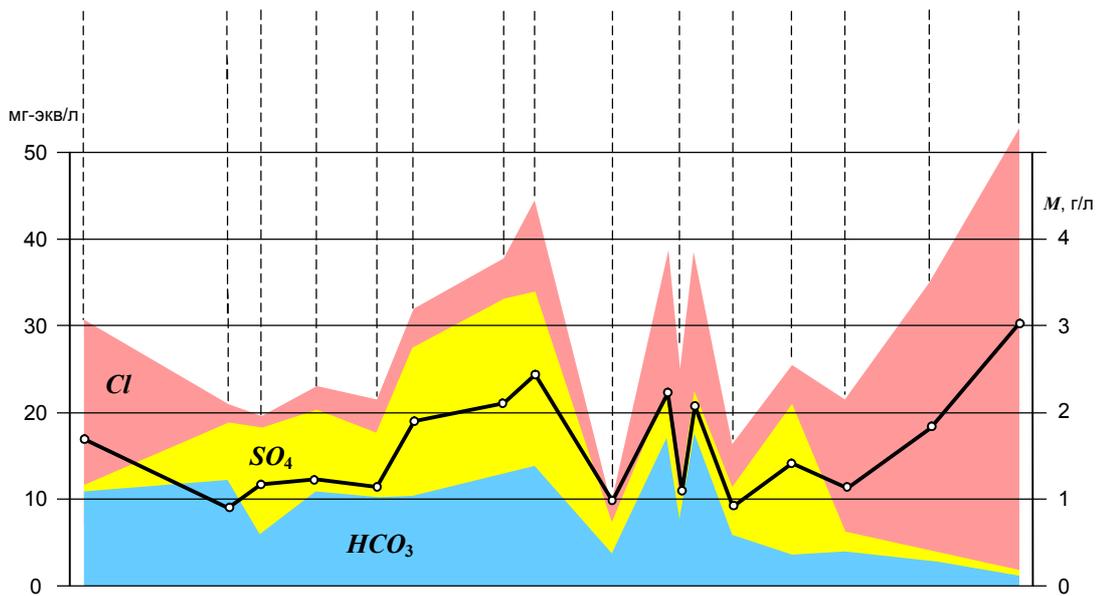
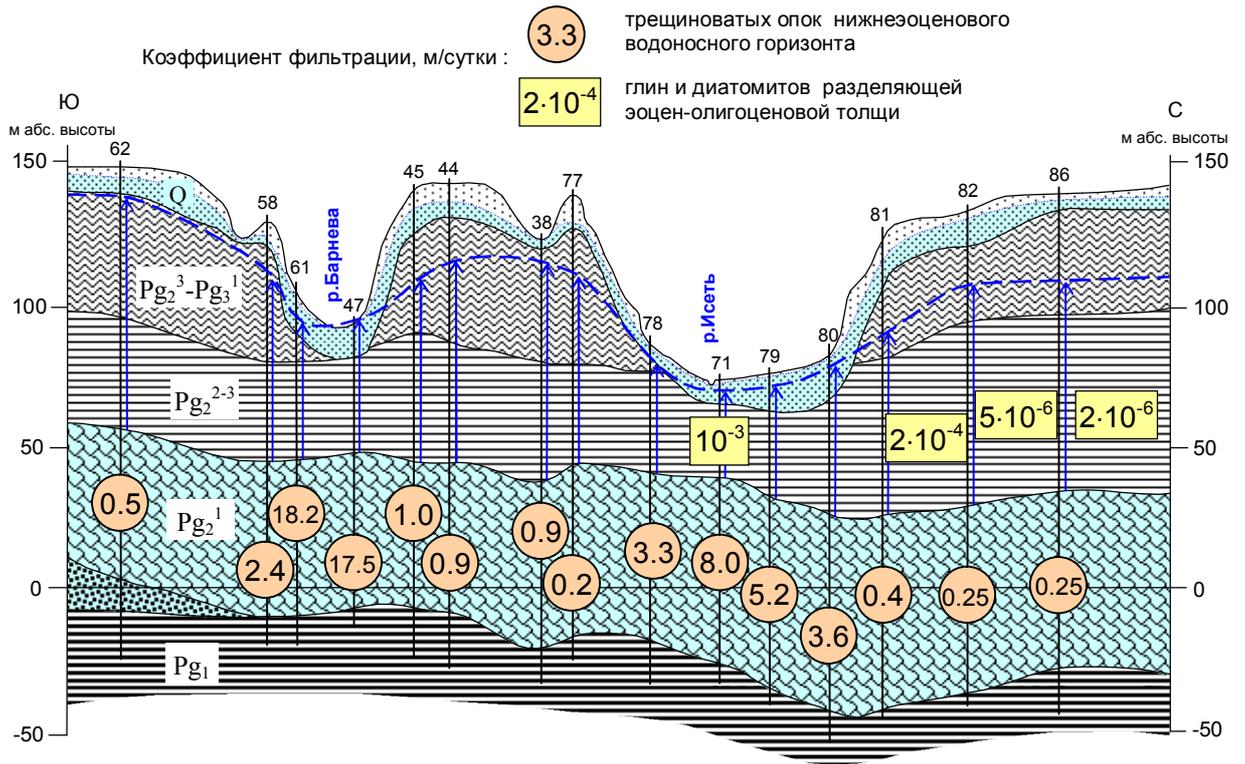


Рис. 8.9. Гидрогеологический разрез поперек долин р.р. Исеть и Барнева в створе опытно-эксплуатационного куста (с профилями общей минерализации и анионного состава подземных вод нижнеэоценового водоносного горизонта)

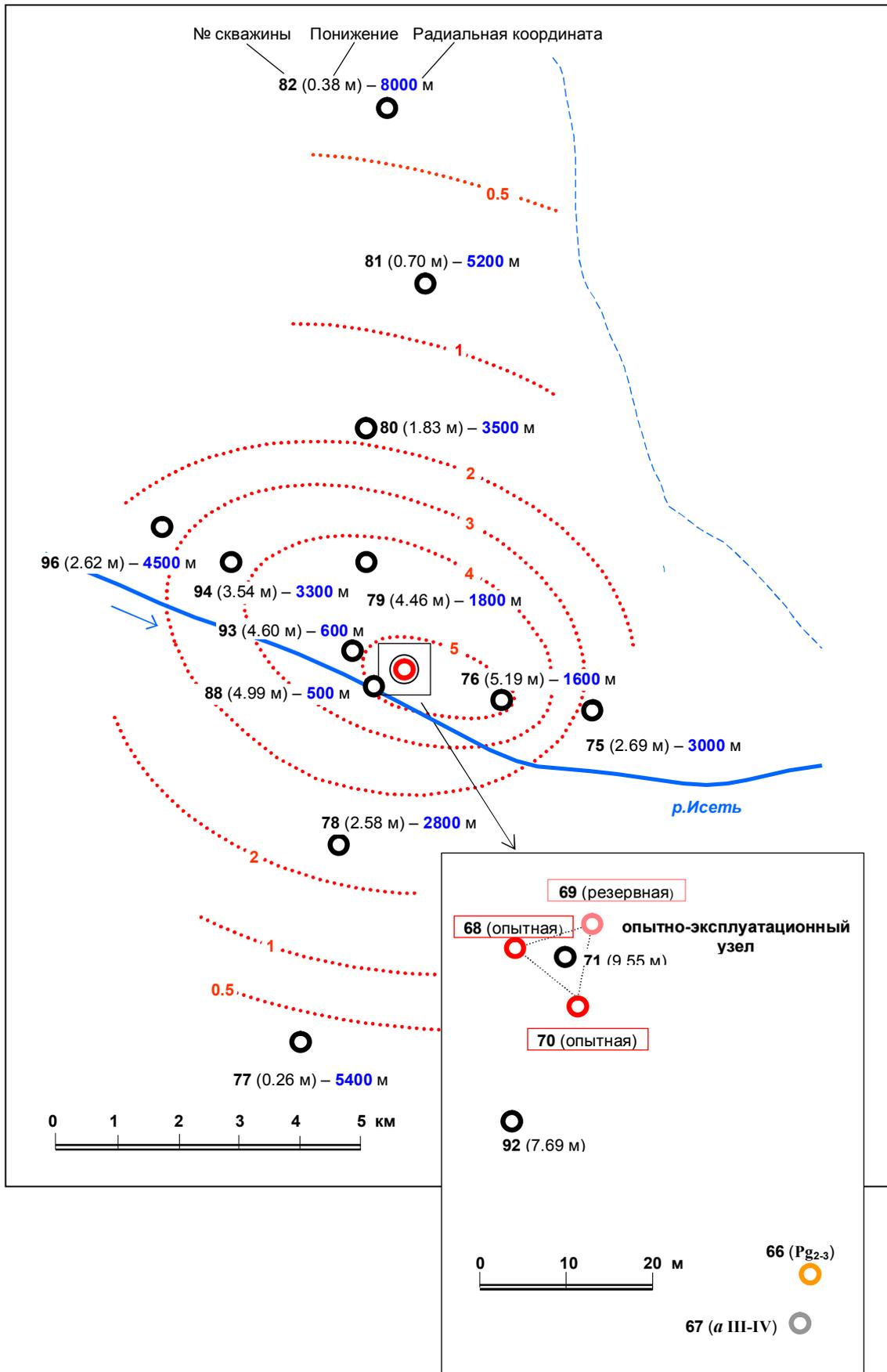


Рис. 8.10. Схема опытно-эксплуатационного куста (с изолиниями понижений на момент окончания откачки)

Наблюдения проводились в опытных и 14-ти наблюдательных скважинах на *опоковый* горизонт (радиальное удаление от 3 до 8000 м), а также по двум скважинам на *верхний разделяющий слой* диатомитов и на *смежный грунтовый горизонт* в аллювии. Кроме того, наблюдалась закрытая манометром скважина на *смежный меловой горизонт*.

Восстановление уровней прослежено в течение 18-ти суток, после чего был проведен пробный пуск (длительностью около 2-х недель) всех трёх разведочно-эксплуатационных скважин с суммарным дебитом около 230 л/с (20 тыс. м³/сутки).

Диагностика и интерпретация результатов ОЭО

Как видно на рис. 8.11, распределение статических уровней в разрезе имеет нисходящий характер – уровни опокового горизонта ниже поверхности грунтовых вод в аллювии (примерно на 3 м). Это «нарушение» принципиальной схемы Мятиева-Гиринского объясняется положением участка разведки в пределах депрессионной воронки городского водозабора. Его влияние во время ОЭО заметно по разнонаправленным колебаниям уровня на 0.1-0.5 м в скв. 75 (ближайшей к горводозабору).

В течение всего периода ОЭО сохранялся нестационарный режим снижения уровней.

В *верхнем разделяющем* слое с самого начала опыта наблюдалась адекватная реакция уровней – как вблизи опытного куста (скв. 66), так и на удалении около 500 м (у скв.88).

Относительно *верхнего смежного горизонта* в аллювии трудно сказать что-либо уверенно. В принципе снижение уровня в нём отмечено – почти на 0.8 м (скв. 67), но отнести его полностью или частично за счёт откачки нельзя – именно в это время шёл фоновый летнемеженный спад расхода и уровня р. Исеть, с которой аллювий достаточно хорошо связан. Наблюдения за рекой в створе опытного куста проводились, к сожалению, несистематично и некачественно (это очевидная погрешность проектирования и исполнения наблюдений при длительной ОЭО). По этим данным можно предполагать (но весьма неуверенно), что снижение уровня реки за период откачки составило не менее 0.5 м. По данным стационарного гидропоста Гидрометслужбы на Исети в Шадринске (в 5 км ниже по течению от опытного куста) спад уровня реки за этот период составил почти 1 м.

Следует также отметить, что проблема сброса откачиваемой воды (около 1 млн. м³) была решена не лучшим образом. Сброс производился на удалении менее 100 м от опытных скважин практически на рельеф (рис. 8.12), в малозаметную ложбину на поверхности террасы с последующим рассредоточенным стоком в направлении русла Исети. Если хотя бы 10-15% сбрасываемой воды просачивалось на уровень грунтовых вод, то это несомненно привело к подъёму уровней в зоне опытного куста и могло заметно исказить реальную реакцию аллювиального горизонта на откачку.



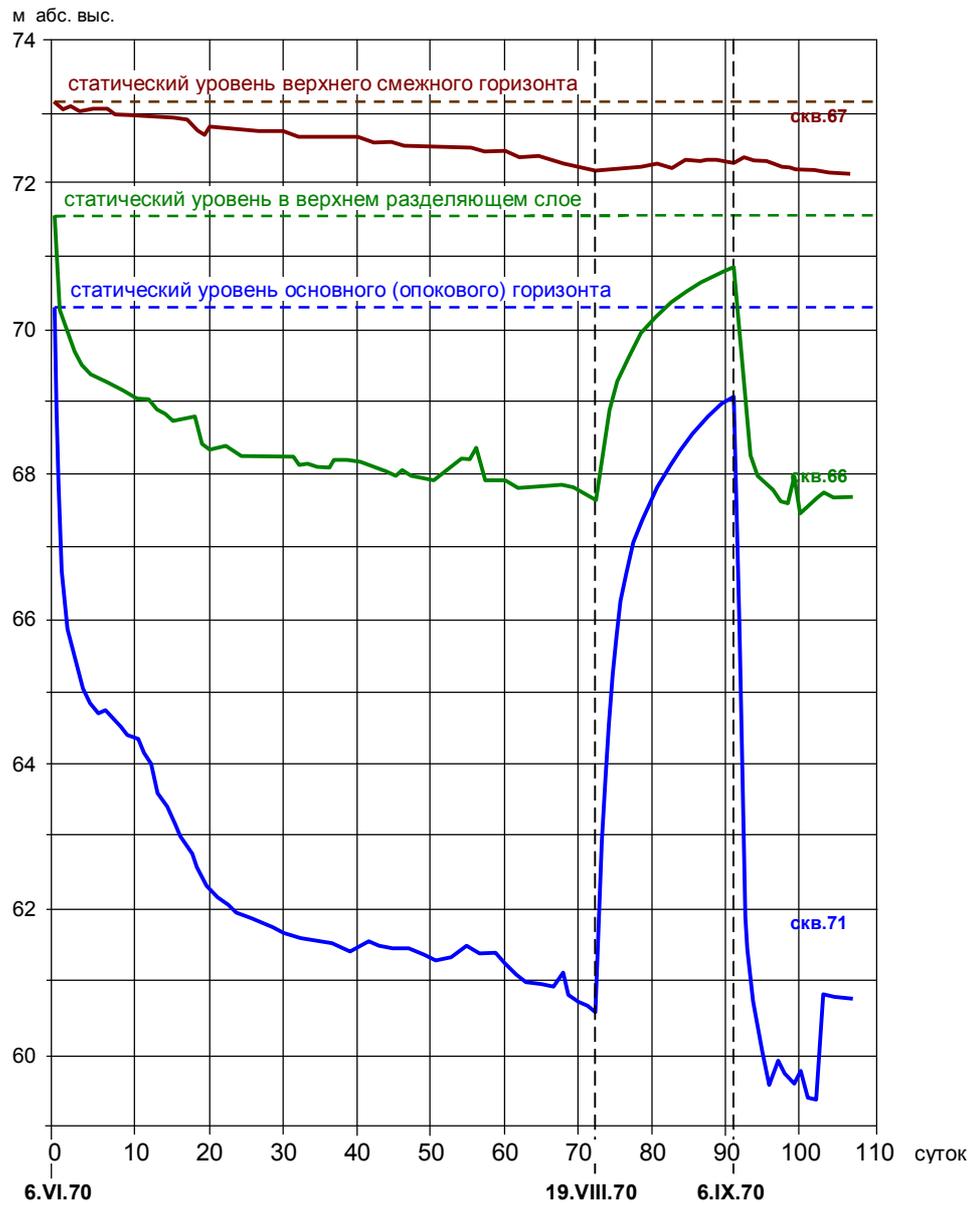


Рис. 8.11. Временное прослеживание уровней в ярусных пьезометрах

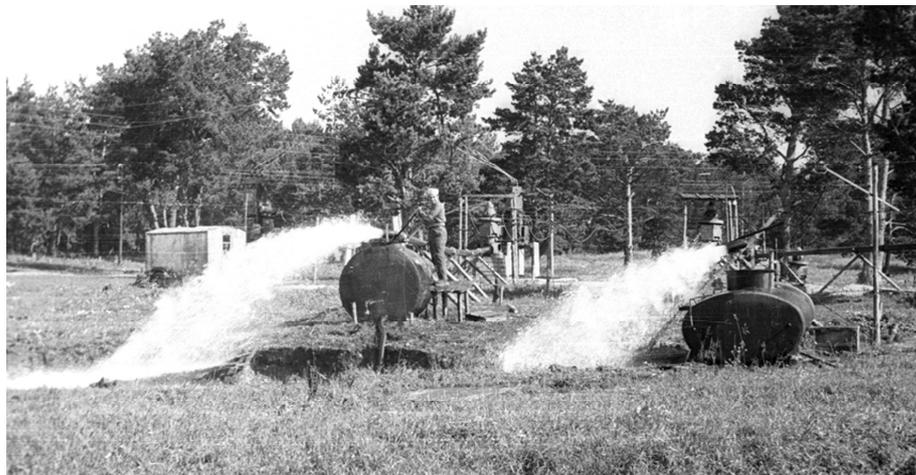


Рис. 8.12. Сброс откачиваемой воды на рельеф вблизи опытных скважин



Реакция *нижнего смежного горизонта* (мелового) горизонта на откачку по манометру не зафиксирована; в какой-то мере это можно объяснить невысокой чувствительностью использованного манометра – цена деления шкалы 0.2 атм, то есть примерно 2 м водного столба.

Поведение уровней *основного* (опокового) горизонта осложнено значительными колебаниями дебита (рис. 8.13, 8.14), поэтому дальнейшая диагностика и обработка графиков временного и комбинированного прослеживания проводилась в координатах удельных понижений и приведенного времени.

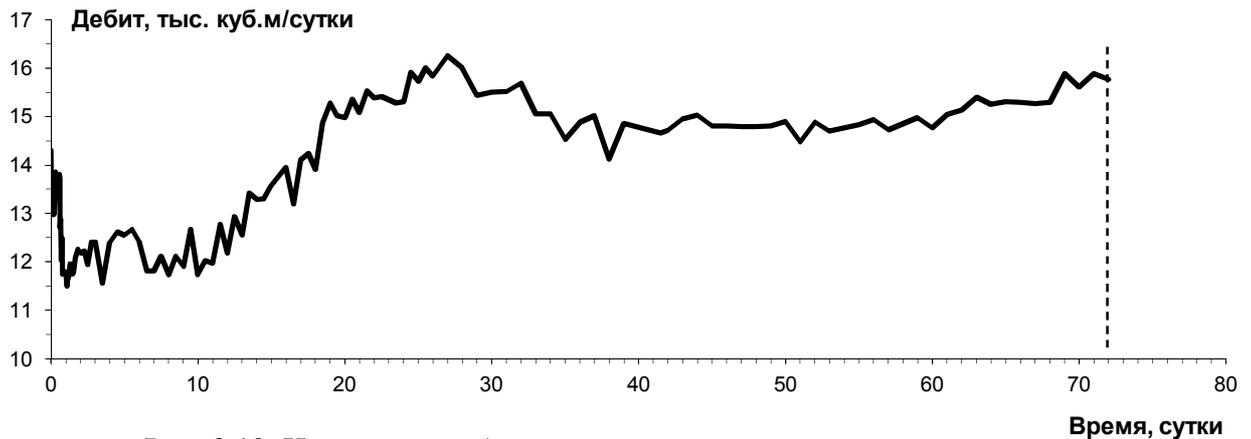


Рис. 8.13. Изменение дебита опытно-эксплуатационной откачки

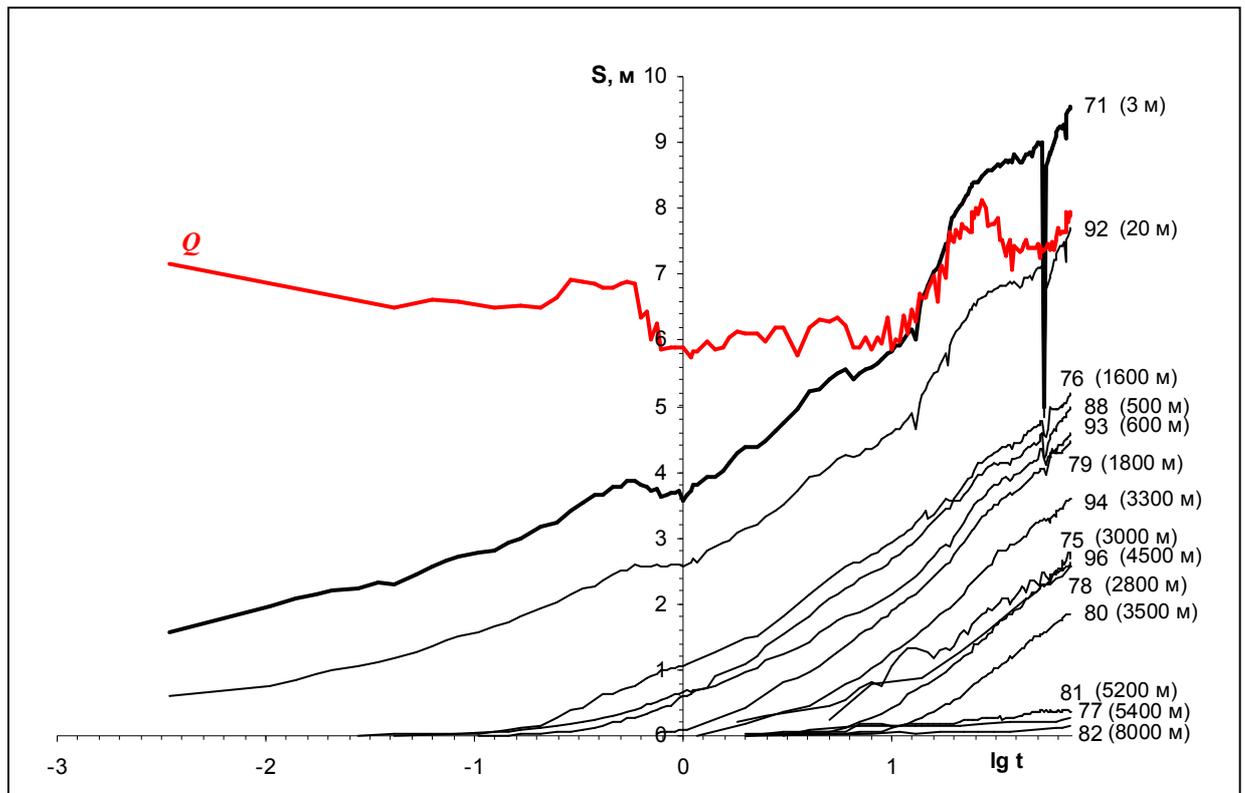


Рис. 8.14. Временное прослеживание понижений и дебита при опытно-эксплуатационной откачке

Отчётливых признаков перетекания, то есть хорошо выраженного выполаживания графиков временного прослеживания в опоковом горизонте, при откачке не наблюдалось; можно говорить лишь о том, что примерно через 20-25 суток наметилось постепенное, едва ощутимое замедление темпа развития удельных понижений (рис. 8.15). Однако, достоверность этого факта крайне низка, поскольку привodka времени в условиях переменного дебита имеет несомненно приближённый характер.

На графиках временного прослеживания для ближайших наблюдательных скважин № 71 (3 м) и № 92 (20 м) отчётливо выражен начальный пологий участок (рис. 8.14, 8.15) продолжительностью до 0.1-0.2 суток с последующим возрастанием крутизны в 2-3 раза. Такая форма графиков могла бы рассматриваться как закономерный постепенный переход к квазистационарному режиму, однако не в данном случае, так как для столь малых радиальных координат и при достаточно высокой пьезопроводности квазистационар наступает значительно раньше, в пределах нескольких минут.

Более вероятной причиной возрастания крутизны временных графиков может быть постепенное развитие депрессионной воронки из зоны днища долины с высокой проводимостью в окружающие области (борта долины) с более низкими фильтрационными свойствами. В таком случае можно уверенно предполагать, что в зоне расположения разведочно-эксплуатационных скважин проводимость опокового горизонта существенно повышена и составляет 2500-3000 м²/сутки, а на расстоянии 500-700 м (судя по времени начала перегиба графика, рис. 8.15) значительно уменьшается. Темп снижения уровней на втором этапе соответствует некоторой обобщённой проводимости неоднородной области (порядка 1000 м²/сутки).

Фильтрационная неоднородность опокового пласта в плане подтверждается характером площадного прослеживания понижений (рис. 8.16). Видно, что распределение понижений по скважинам в днище долины (№№ 71, 92, 88, 93, 76, 75, 94, 96) отвечает проводимости порядка 2800 м²/сутки, а по скважинам в направлениях обоих бортов долины (№№ 79, 78, 80, 81, 77, 82) – порядка 600 м²/сутки.

Характерным диагностическим признаком является также своеобразное «расслоение» совокупности кривых комбинированного прослеживания – чем больше радиальная координата скважины, тем левее (в области малых значений $\frac{t}{r^2}$) располагается её график (рис. 8.17).



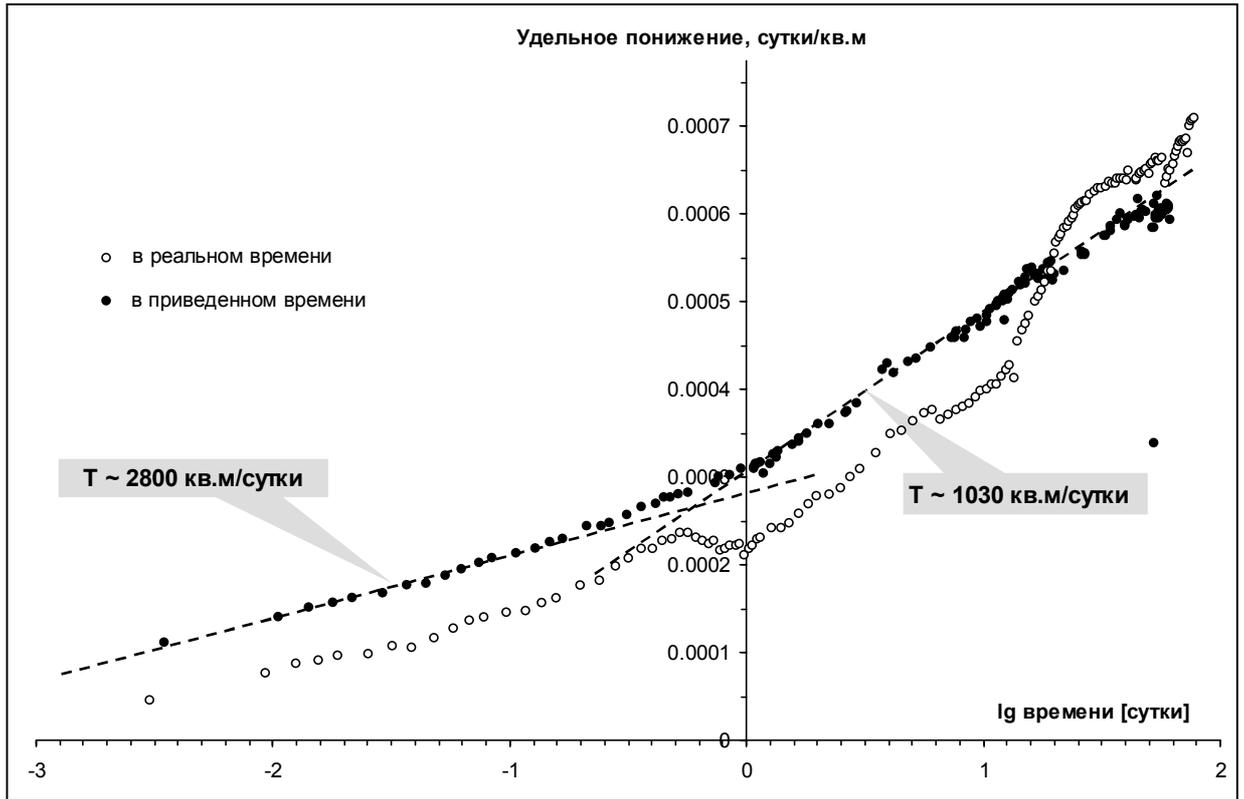


Рис. 8.15. Временное прослеживание удельного понижения в скв. 71

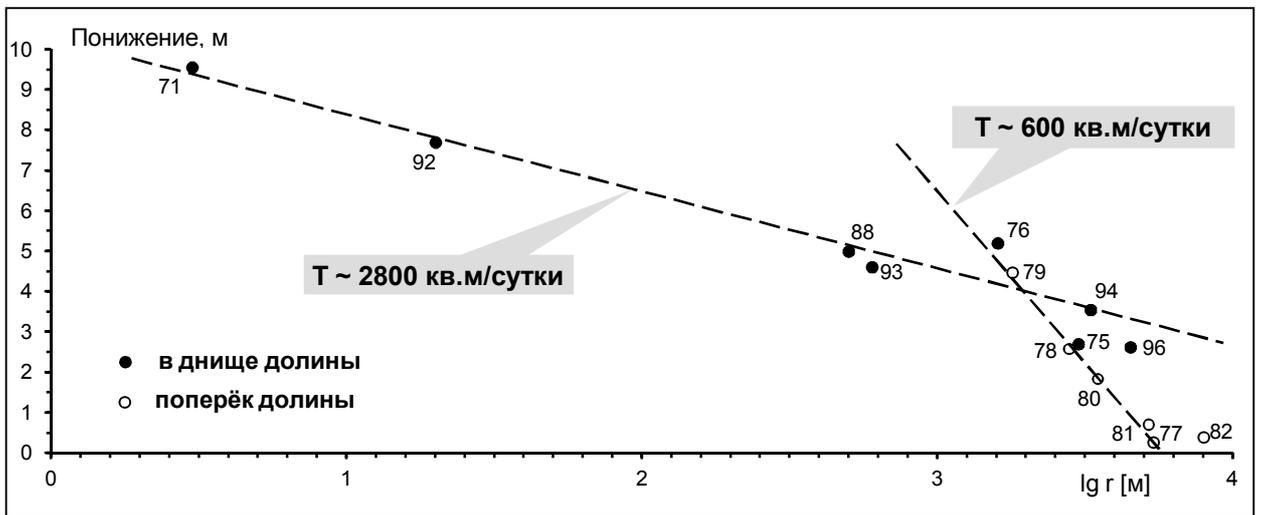


Рис. 8.16. Площадное прослеживание конечных понижений при опытно-эксплуатационной откачке

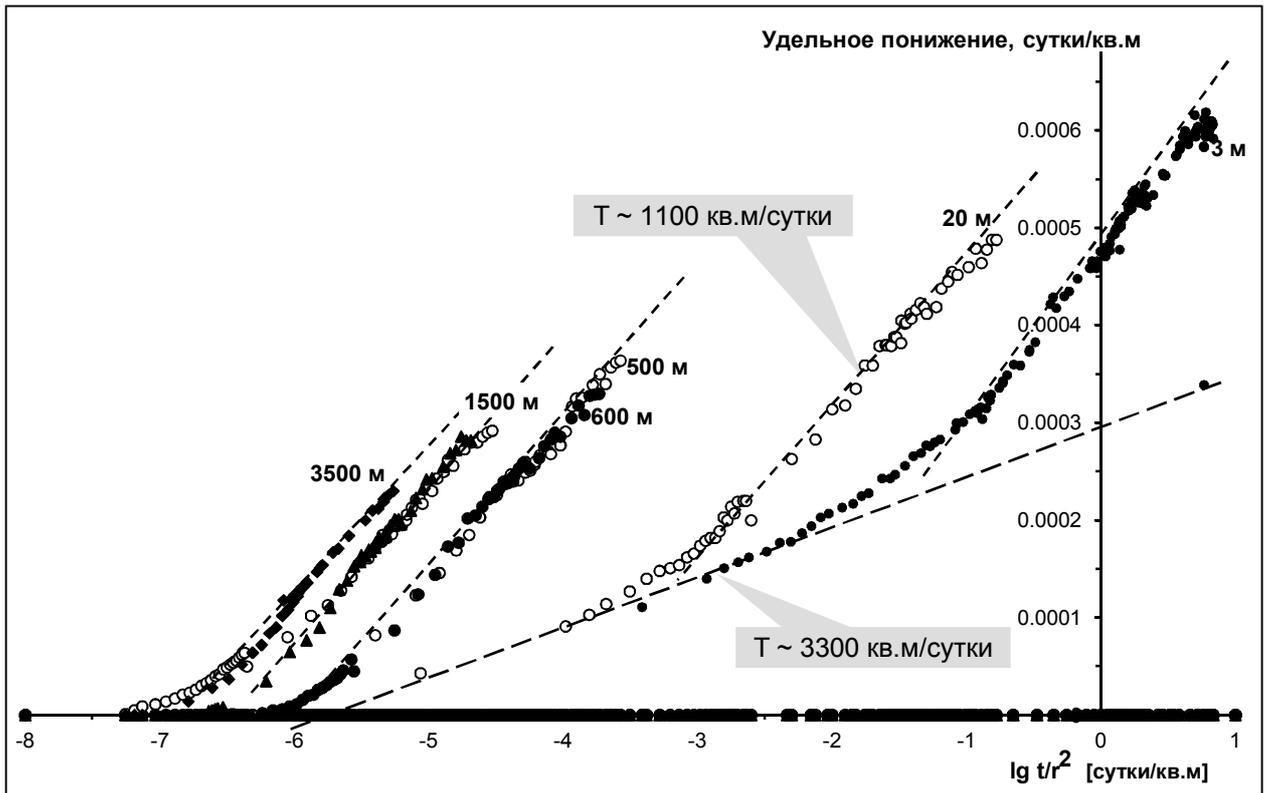


Рис. 8.17. Комбинированное прослеживание удельных понижений при опытнo-эксплуатационной откачке

Такая форма комбинированного прослеживания свойственна ограниченным пластам, когда по мере развития депрессионной воронки в неё попадают области с заметно пониженной проводимостью (вплоть до непроницаемых контуров). Конфигурация этих областей может быть различной, однако степень «расслоения» комбинированного графика возрастает с увеличением степени ограниченности пласта.

Асимптота к начальным участкам графиков для ближайших скважин №№ 71 и 92 имеет уклон, отвечающий проводимости около 3300 м²/сутки, что подтверждает предположение о существовании зоны повышенной проводимости в районе опытнo-эксплуатационного узла.

Важно, что все рассмотренные диагностические признаки подтверждаются и по данным наблюдений за восстановлением уровней (рис. 8.18-20), поскольку они не искажены колебаниями дебита, в отличие от периода снижения при откачке. На рис. 8.21 показано изменение уклона графика временного прослеживания восстановления для скв. № 71. Уклон рассчитан как отношение разности величин повышения уровня ΔH к разности логарифмов времени от начала восстановления для каждой пары последовательных замеров.



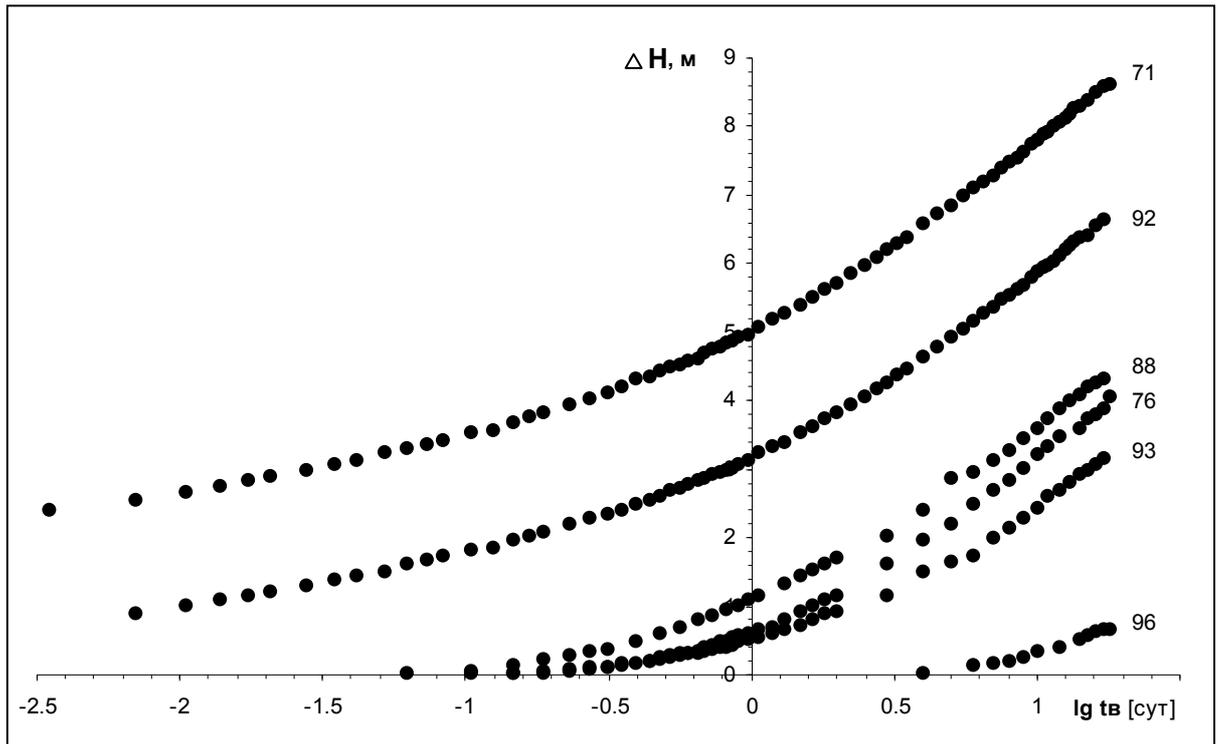


Рис. 8.18. Временное прослеживание восстановления уровней после опытно-эксплуатационной откачки

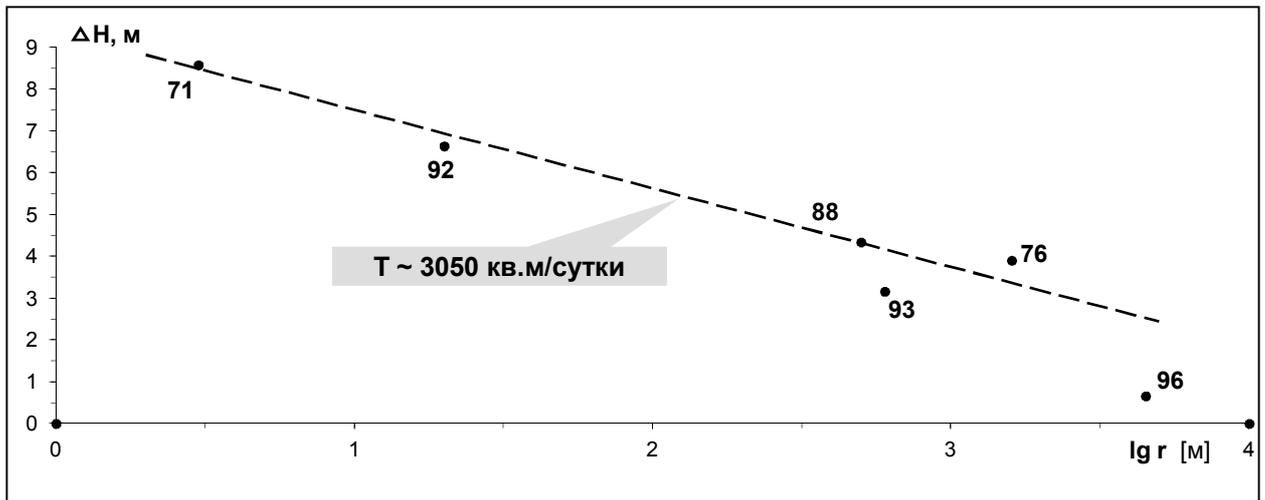


Рис. 8.19. Площадное прослеживание восстановления уровней после ОЭО

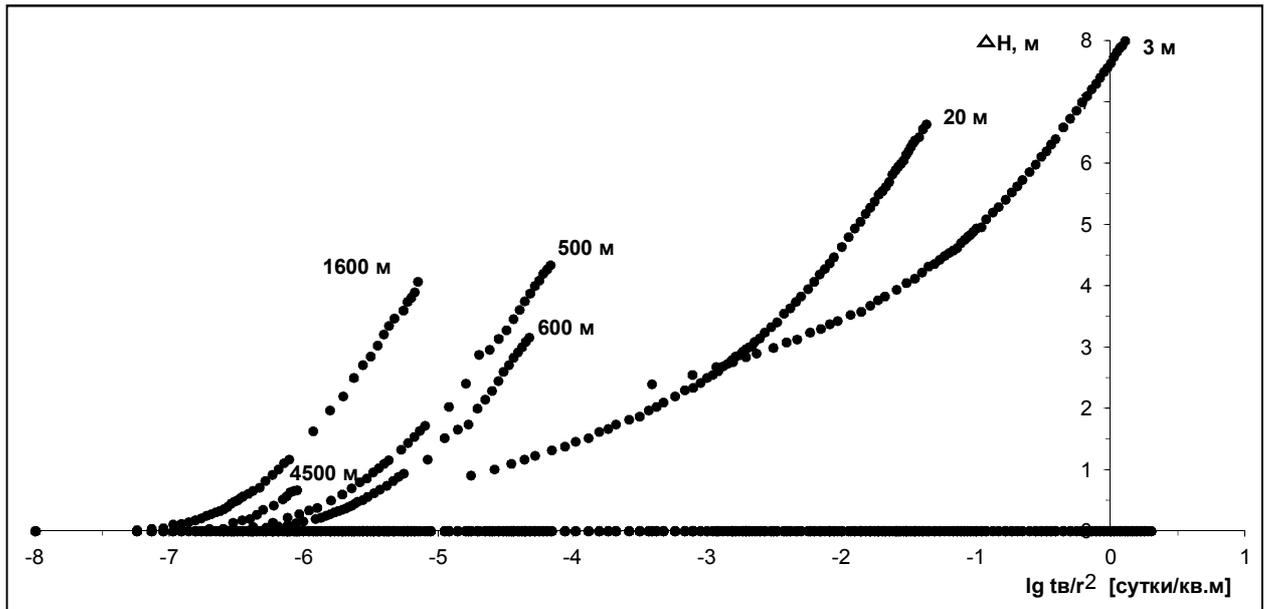


Рис. 8.20. Комбинированное прослеживание восстановления уровней после ОЭО

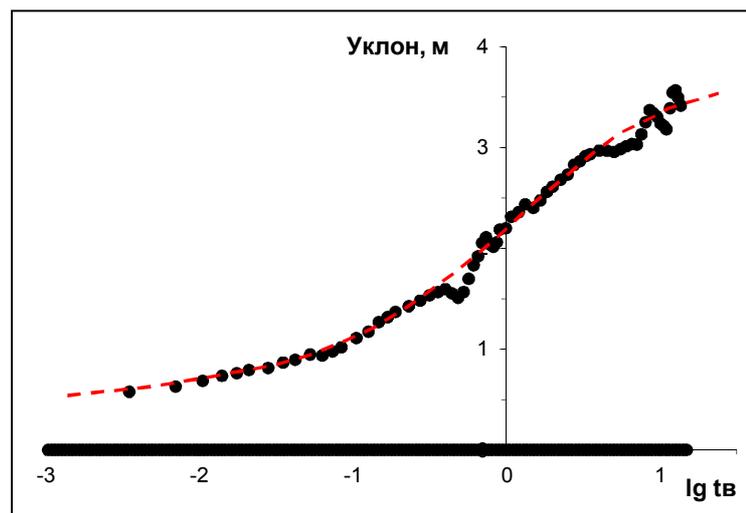


Рис. 8.21. Изменение уклона графика временного прослеживания восстановления уровня по скв. 71

Можно отметить два важных обстоятельства:

1. На начальном участке (до 4-5 суток) уклон временного прослеживания восстановления постоянно возрастает, что однозначно подтверждает ухудшение фильтрационных свойств в окружающей области.

2. После 4-5 суток темп возрастания уклона начинает постепенно уменьшаться, что, скорее всего, вызвано проявлением взаимодействия со смежными горизонтами.

В завершение диагностики данных ОЭО напомним, что в пластах полосообразной конфигурации после начального криволинейного участка устанавливается постоянная линейная зависимость понижения уровня (и повышения при восстановлении) в координате времени \sqrt{t} . Однако, в рассматриваемой ситуации Шадринского месторождения форма «корневого» графика заметно отличается от прямолинейной (рис. 8.22, А) и характеризуется постоянным выполаживанием при снижении. При восстановлении эта тенденция также выражена, хотя и менее уверенно в силу кратковременности наблюдений.

Однозначная трактовка этого факта затруднительна. Он может быть обусловлен проявлением как минимум двух причин:

1. Фильтрационная неоднородность опокового пласта в зоне месторождения не в полной мере отвечает классической схеме «пласта-полосы» с истинно непроницаемыми границами ($T = 0$), поскольку уменьшение проводимости на бортах долины происходит хотя и значительно, но постепенно и не достигает нулевых значений.

2. Выполаживание «корневого» графика (как и любого другого временного прослеживания) можно объяснять и влиянием развивающегося перетекания из аллювиального горизонта.

Для анализа действия названных факторов предпринято имитационное моделирование опытно-эксплуатационной откачки продолжительностью 72 суток с дебитом 15 тыс. м³/сутки для двух вариантов фильтрационной схемы, параметрически близких к условиям разведываемого месторождения:

1. Однопластовая система (только опоковый горизонт) с прямолинейными контурами зон неоднородности по проводимости: с постепенным уменьшением от 800 (в средней части) до 25 м²/сутки (к боковым границам моделируемой области); упругая водоотдача $1 \cdot 10^{-3}$.

2. Двухпластовая система:

- нижний пласт аналогичен предыдущему варианту;
- верхний пласт (аллювиальный горизонт) безнапорный, мощностью 10 м с гравитационной водоотдачей 0.08; коэффициент фильтрации в средней части области 10 м/сутки, на периферии 0.5 м/сутки;
- разделяющий слой (диатомиты и глины ирбитской и чеганской свит): в средней части области мощностью 30 м с коэффициентом фильтрации $1 \cdot 10^{-3}$ м/сутки; на периферии мощностью 60 м с коэффициентом фильтрации $1 \cdot 10^{-4}$ м/сутки.

Результаты моделирования показывают (рис. 8.22, Б), что в однопластовой схеме (вариант 1) выполаживание «корневого» графика происходит крайне слабо, хотя и имеет место, а при наличии перетекания (вариант 2) оно выражено весьма отчётливо. Это является весомым подтверждением проявления перетекания в ходе ОЭО на Шадринском месторождении.



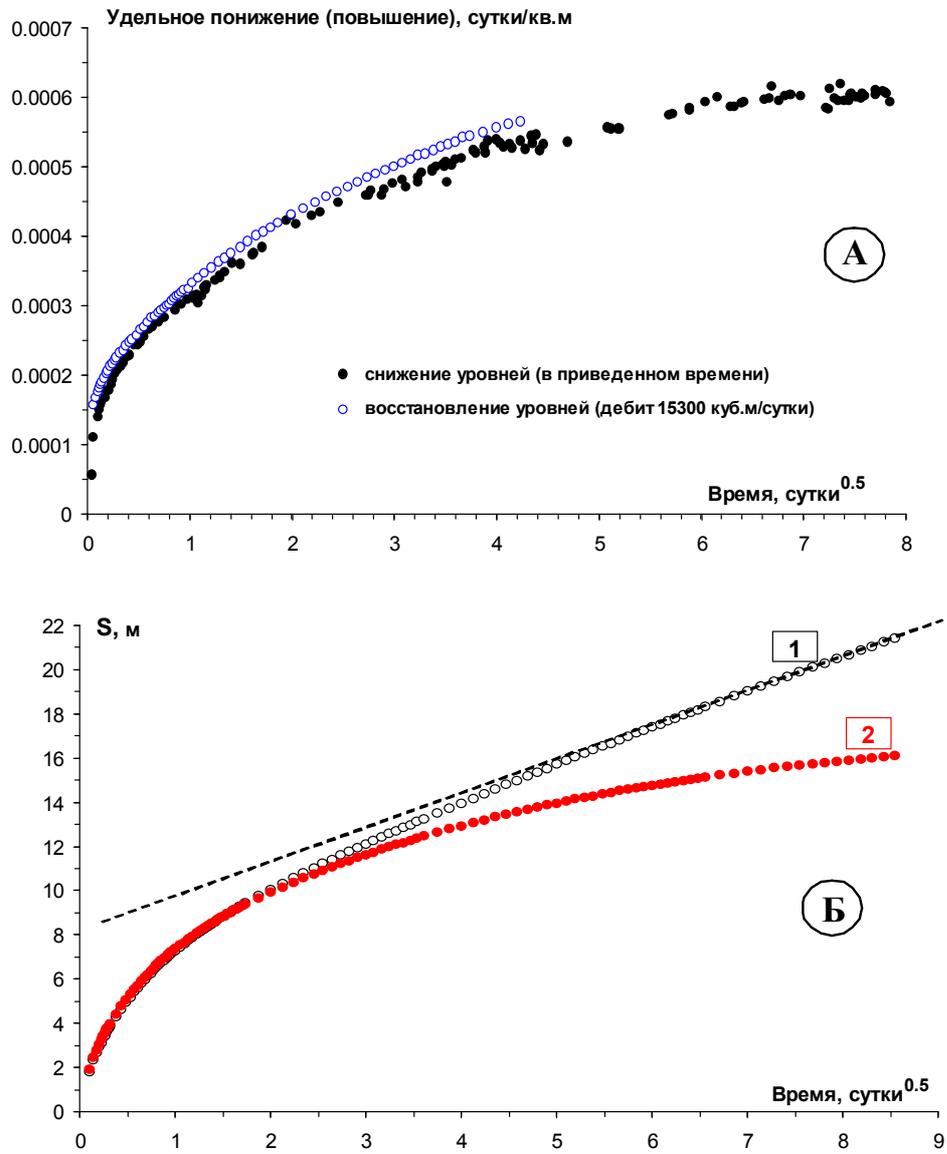


Рис. 8.22. Форма графиков временного прослеживания (в координате времени \sqrt{t}) при опытно-эксплуатационном опробовании (А) и на имитационной модели (Б):
1 – в однопластовой системе, 2 – в двухпластовой системе

Оценка гидрогеодинамических параметров

По совокупности диагностических признаков можно утверждать, что в зоне разведуемого месторождения подземных вод подтверждается характерная для Зауралья схема полосообразной фильтрационной неоднородности опокового горизонта – повышенная трещинная проницаемость под четвертичными эрозионными врезами и быстрое затухание трещиноватости в направлении междуречий. Исходя из генетической обусловленности этого явления, возможно его количественное описание с помощью регрессионной зависимости вида:

$$K = K^* e^{-\alpha m'},$$

где K – коэффициент фильтрации трещиноватых опок, m' – «остаточная» мощность дочетвертичных пород, перекрывающих опоковый пласт, определяемая в каждой точке как разность абсолютных отметок подошвы четвертичных отложений и кровли опокового пласта, K^* , α – эмпирические коэффициенты, равные для Шадринского месторождения 19.8 м/сутки и 0.0045 м⁻¹ соответственно (рис. 8.23).

С использованием этой зависимости построена карта *проводимости* опокового водоносного горизонта (рис. 8.24). Понятно, что эта карта является предварительной основой и в обобщённом виде отражает лишь региональные закономерности изменчивости проводимости опокового пласта в зоне месторождения. Её уточнение для целей прогноза должно выполняться в процессе калибровки модели месторождения.

Оценка пьезопроводности и *упругой водоотдачи* опокового горизонта выполнена по начальным участкам билогарифмического временного прослеживания. Более поздние участки кривых существенно деформированы проявлением неоднородности пласта и могут давать искажённые оценки пьезопроводности – это наглядно подтверждается упомянутым выше «расслоением» графика комбинированного прослеживания. Оценки пьезопроводности находятся в диапазоне $3 \cdot 10^5 - 1.4 \cdot 10^6$ м²/сутки, среднее значение упругой водоотдачи (с исключением экстремальных низких и высоких значений) $1.7 \cdot 10^{-3}$.



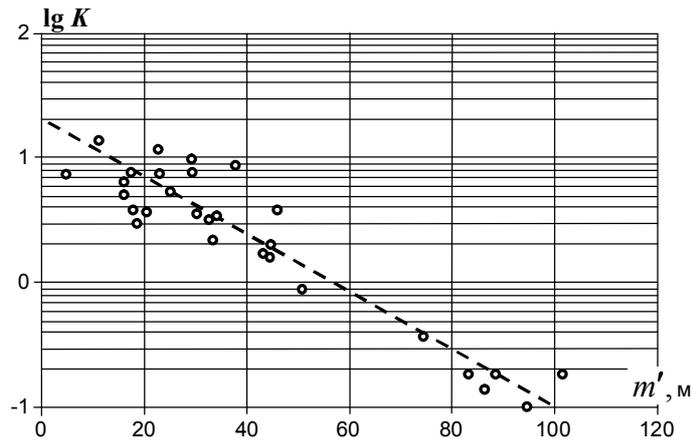


Рис. 8.23. Зависимость значений коэффициента фильтрации трещиноватых опок от «остаточной» мощности дочетвертичных пород

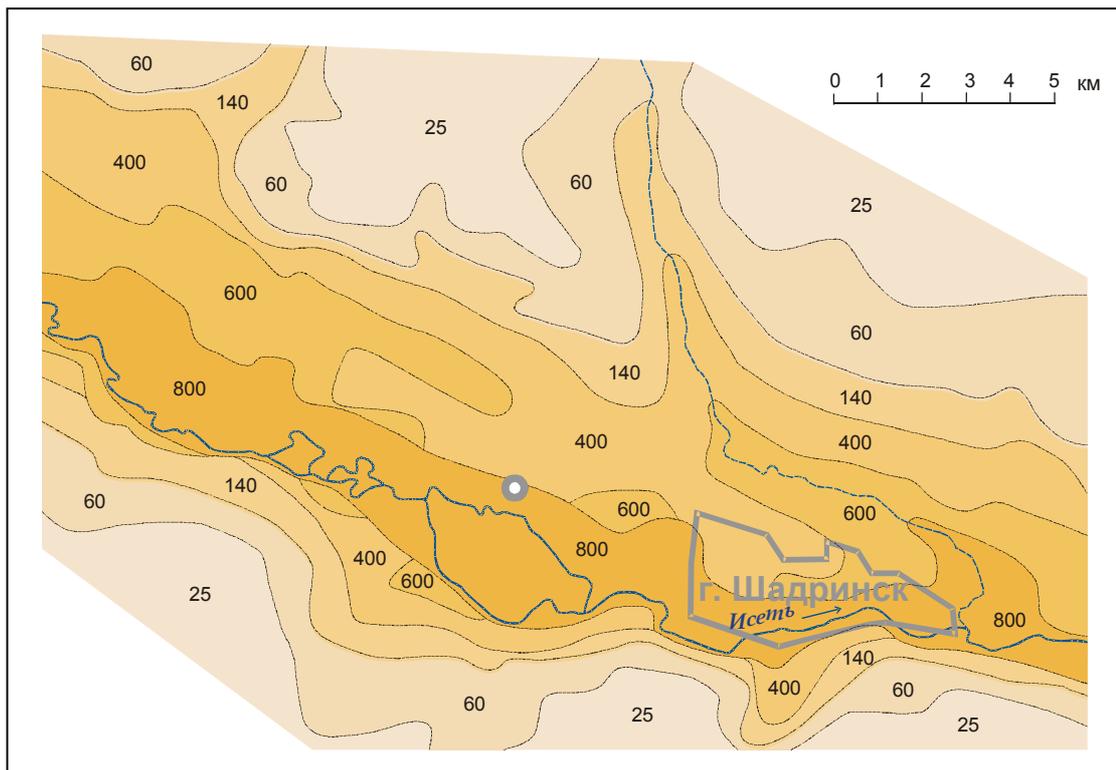


Рис. 8.24. Предварительная карта проводимости нижнеэоценового водоносного горизонта в зоне Шадринского месторождения

Оценка параметров *перетекания* выполнена по билогарифмическому временному прослеживанию $\lg \frac{S}{Q} \div \lg t$ (эталонные кривые перетекания) с приведенным временем (рис. 8.25). Площадное прослеживание (вообще очень эффективное для оценки перетекания) здесь не поддаётся обработке, так как на нём заметно отражается плановая неоднородность опокового пласта.

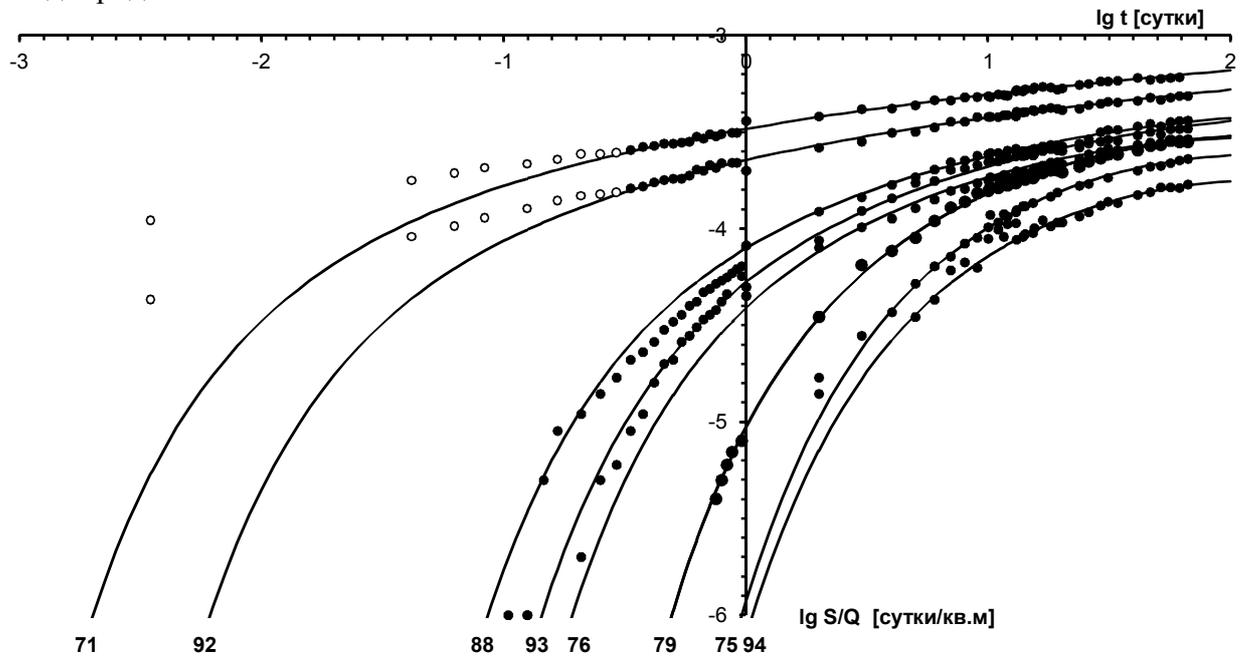


Рис. 8.25. Оценка параметров перетекания по билогарифмическому временному прослеживанию удельных понижений при опытно-эксплуатационной откачке

Полученные значения фактора перетекания B (в диапазоне 4500 – 8000 м) являются обобщёнными, то есть характеризуют взаимодействие с обоими смежными горизонтами. Для того, чтобы выделить из этой величины «долю» участия каждого из разделяющих слоёв (перекрывающего и подстилающего опоковый водоносный горизонт), необходимо принять какую-то предпосылку о соотношении их проницаемости. Поскольку нижний разделяющий слой залегает на значительных глубинах (более 100 м) и не подвергался размыву и выветриванию в четвертичное время, можно уверенно предполагать, что его проницаемость K_{00} ниже, чем у верхнего разделяющего слоя диатомитов K_0 .

Выполним сравнительные расчёты для разных соотношений проницаемости разделяющих слоёв по формуле

$$B = \sqrt{T \frac{m_0 m_{00}}{K_0 (m_{00} + \lambda m_0)}}, \text{ где } \lambda = \frac{K_{00}}{K_0}.$$

Результаты расчётов приведены в таблице 8.1.

Таблица 8.1. Значения обобщённого фактора перетекания

K_0 , м/сутки	$\lambda = 1 (K_0 = K_{00})$		$\lambda = 0.1 (K_0 = 10K_{00})$		$\lambda = 0.02 (K_0 = 50K_{00})$	
	K_{00} , м/сутки	B , м	K_{00} , м/сутки	B , м	K_{00} , м/сутки	B , м
$5 \cdot 10^{-3}$	$5 \cdot 10^{-3}$	1920	$5 \cdot 10^{-4}$	2160	10^{-4}	2180
10^{-3}	10^{-3}	4300	10^{-4}	4830	$2 \cdot 10^{-5}$	4880
$5 \cdot 10^{-4}$	$5 \cdot 10^{-4}$	6080	$5 \cdot 10^{-5}$	6830	10^{-5}	6910
10^{-4}	10^{-4}	13580	10^{-5}	15260	$2 \cdot 10^{-6}$	15450

Можно заключить: 1) наиболее вероятный диапазон значений $K_0 - 10^{-3} - 10^{-4}$ м/сутки; 2) величина B реагирует на изменение λ очень слабо, поэтому при наблюдаемом диапазоне опытных оценок обобщённого B нельзя даже ориентировочно судить о соотношении проницаемости верхнего и нижнего разделяющих слоёв. Поэтому для дальнейших расчётов временно принимается $\lambda = 0.1$ в надежде на последующее уточнение этого предположения. Расчёты K_0 по опытным данным в этом случае дают такие результаты (табл. 8.2):

Таблица 8.2. Оценка параметров верхнего разделяющего слоя по данным ОЭО

№№ скв.	r , м	r/B	B , м	T , м ² /сутки	K_0 , м/сутки	χ_0 , сутки ⁻¹
71	3	0.00067	4460	1105	$1.62 \cdot 10^{-3}$	$5.4 \cdot 10^{-5}$
92	20	0.004	5010	1224	$1.42 \cdot 10^{-3}$	$4.7 \cdot 10^{-5}$
88	500	0.0861	5810	1019	$8.79 \cdot 10^{-4}$	$2.9 \cdot 10^{-5}$
93	600	0.0995	6030	967	$7.75 \cdot 10^{-4}$	$2.6 \cdot 10^{-5}$
76	1500	0.1892	7930	946	$4.38 \cdot 10^{-4}$	$1.5 \cdot 10^{-5}$
79	1800	0.3147	5720	677	$6.03 \cdot 10^{-4}$	$2.0 \cdot 10^{-5}$
75	3200	0.4819	6640	830	$5.48 \cdot 10^{-4}$	$1.8 \cdot 10^{-5}$
94	3500	0.4986	7020	597	$3.53 \cdot 10^{-4}$	$1.2 \cdot 10^{-5}$
Среднее					$8.3 \cdot 10^{-4}$	$2.8 \cdot 10^{-5}$



Ещё одним эффективным приёмом оценки параметров взаимодействия водоносных горизонтов является решение плоско-профильных обратных задач по естественному режиму фильтрации (по ленте тока единичной ширины от междуречья до днища долины). Такие задачи могут решаться на модели или аналитически. В качестве исходных данных по длине ленты тока должны быть известны:

- распределение проводимости основного горизонта T ,
- отметки уровней основного (H) и смежного (H^0) горизонтов,
- распределение мощности разделяющего слоя m_0 (при отсутствии таких данных

результатом расчёта будет комплексный параметр перетока $\chi_0 = \frac{K_0}{m_0}$).

Лента тока разбивается на блоки таким образом, чтобы узлы сетки отвечали точкам (скважинам) с известными значениями напоров. Идея расчёта базируется на очевидном балансовом уравнении потока в основном горизонте – расход оттока по пласту из i -го блока q_i^- равен расходу притока по пласту q_i^+ ± расход взаимодействия со смежным горизонтом q_i^0 :

$$q_i^- = q_i^+ \pm q_i^0,$$

где $q_i^- = \frac{T_i^-}{L_i^-}(H_i - H_{i+1})$; $q_i^+ = \frac{T_i^+}{L_i^+}(H_{i-1} - H_i)$; $q_i^0 = K_{0,i}L_i \frac{(H_i^0 - H_i)}{m_{0,i}}$;

T_i^+ , T_i^- – проводимость пласта между узлами i и $i-1$ (приток), $i+1$ (отток) узлами соответственно, L – размер блока по длине ленты тока (индексация соответствующая, нумерация по i – по направлению потока от междуречья к долине).

Значения K_0 или χ_0 для каждого блока могут быть найдены аналитически из уравнения баланса. При решении на модели задаются ГУ 1 рода: в основном горизонте – уровни в первом и последнем узле, в смежном горизонте – во всех узлах. Затем производится подбор значений χ_0 , при которых в контрольных узлах сетки основного горизонта удовлетворяются известные значения напоров.

На Шадринском месторождении такие решения были предприняты для профилей от левобережного водораздела к долине Исети – непосредственно в зоне месторождения (рис. 8.9) и на площади режимной гидрогеологической станции в 15 км выше по течению Исети (рис. 8.26). По результатам решения этих задач ясно прослеживается неоднородность K_0 от 10^{-3} в днище долины до $10^{-5} - 10^{-6}$ м/сутки на междуречьях.



13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	<i>i</i>
300	200	200	200	200	200	350	1100	1500	2000	2000	2000	2000	$L_i, \text{ м}$
475	550	550	550	550	500	300		150		40		15	$T_i, \text{ м}^2/\text{сутки}$
76.95	76.97	77.02	77.11	77.24	77.39			83.00	92.78	112.63	119.00	125.00	$H_i, \text{ м}$
	75.02	76.26	76.50	76.74	77.00			85.00	107.00	138.48	139.00		$H_i^0, \text{ м}$
	17	8	7	8	10			30	55	60	70		$m_0, \text{ м}$
	0.038	0.1375	0.2475	0.3575	0.4125			1.1123	0.8383	0.397	0.0478		$q_i^-, \text{ м}^3/\text{сутки}$
	0.1375	0.2475	0.3575	0.4125	0.3818			0.8383	0.397	0.0478	0.03		$q_i^+, \text{ м}^3/\text{сутки}$
	-0.0995	-0.11	-0.11	-0.055	-0.0307			0.274	0.4413	0.3492	0.0178		$q_i^0, \text{ м}^3/\text{сутки}$
	0.0043	0.0058	0.0063	0.0044	0.0039			0.0027	0.00085	0.00041	0.000031		$K_{0,i}, \text{ м/сутки}$

зона инверсии уровней

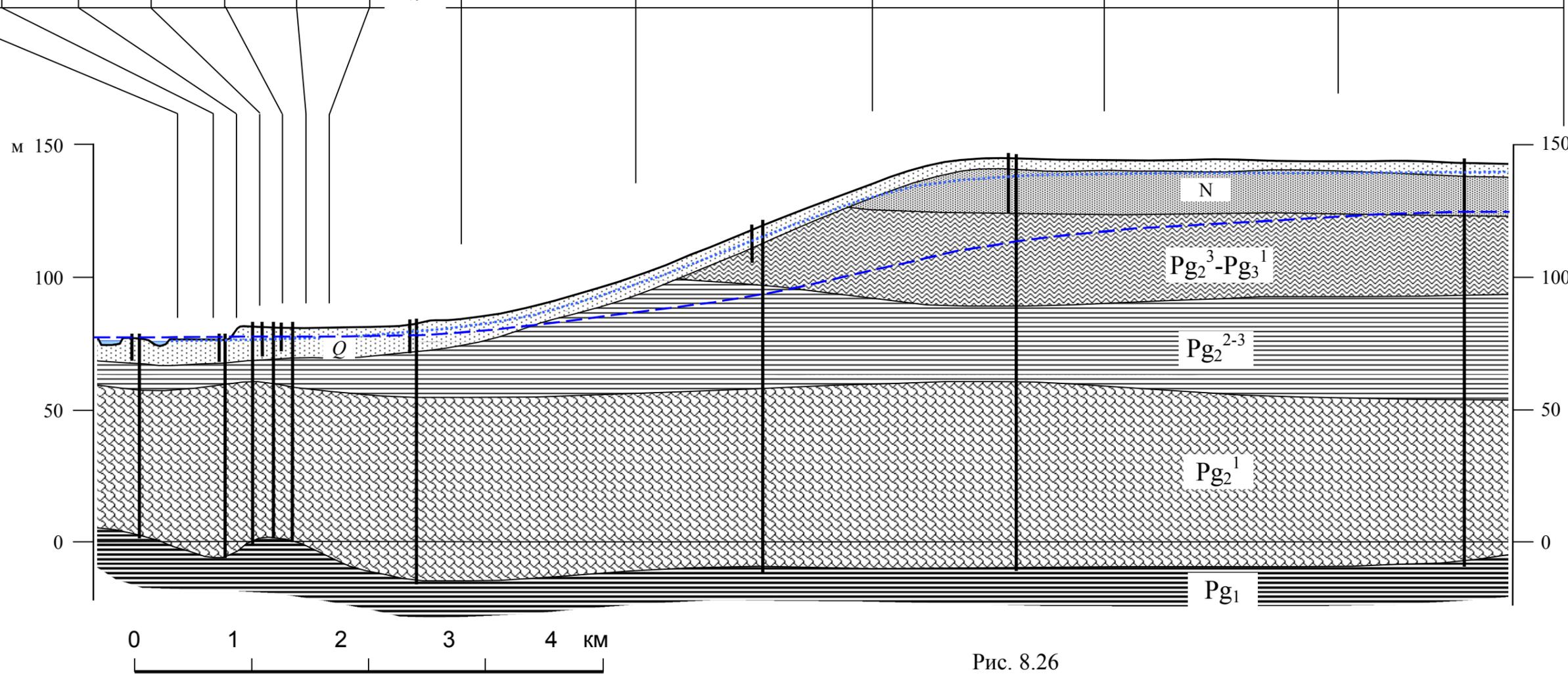


Рис. 8.26

ПРОГНОЗНЫЕ РАСЧЁТЫ ВОДОЗАБОРА

Очевидно, что сложность природных условий месторождения предопределяет необходимость применения для расчёта возможной производительности водозабора либо гидравлического подхода (по результатам проведенной ОЭО), либо построения гидрогеодинамической модели.

Гидравлический метод

– К концу откачки среднее понижение в разведочно-эксплуатационных скважинах №№ 68 и 70 составило

$$S_{\text{ОЭО}} = \frac{16.6 + 16.99}{2} = 16.8 \text{ м.}$$

– Средний дебит в интервале от 20 суток до окончания откачки 14 950 м³/сутки.

– Удельная срезка уровня в эксплуатационных скважинах к концу откачки (61 сутки приведенного времени)

$$\varphi_0 = \frac{S_{\text{ОЭО}}}{Q_{\text{ОЭО}}} = \frac{16.8}{14950} = 1.124 \cdot 10^{-3} \text{ сутки/м}^2.$$

– Принимаются два неизбежных принципиальных допущения:

1. Величина удельной срезки не зависит от дебита – такое допущение вполне правомерно, поскольку допустимое понижение уровней принимается только до кровли опокового горизонта.

2. Предполагается, что темп снижения уровней, установившийся при опытно-эксплуатационной откачке в координате логарифма приведенного времени (рис. 8.15), сохранится на весь прогнозный период эксплуатации водозабора.

– Установившийся уклон графика прослеживания удельной срезки в логарифме приведенного времени $C = 1.739 \cdot 10^{-4}$ сутки/м² (по скв. № 71, в непосредственной близости от разведочно-эксплуатационных, рис. 8.15).

– Прогнозная удельная срезка уровня на полный расчётный срок эксплуатации

$$\varphi_{\text{п}} = \varphi_0 + C (\lg 10^4 - \lg 61) = 1.509 \cdot 10^{-3} \text{ сутки/м}^2. \quad (8.4)$$

– Соответственно возможный эксплуатационный дебит

$$Q_3 = \frac{S_{\text{доп}}}{\varphi_{\text{п}}} = \frac{30}{1.509 \cdot 10^{-3}} \approx 19.88 \text{ тыс. м}^3/\text{сутки.}$$



Гидродинамический метод

Использовать аналитические расчёты водозабора в рассматриваемой обстановке нецелесообразно в связи с существенной фильтрационной неоднородностью основного горизонта и сложными, не до конца ясными условиями взаимодействия водоносных горизонтов. Достоверность моделирования также во многом проблематична, поскольку многие важные гидрогеодинамические параметры при разведке были изучены явно недостаточно или не изучены вовсе. Однако, попытка построения гидрогеодинамической модели месторождения на достигнутом уровне изученности всё же имеет смысл – в первую очередь, для выявления и количественной оценки значимости балансово-гидрогеодинамических механизмов, действующих в пластовой водоносной системе при её эксплуатации водозабором. Понятно, что из-за неполноты разведочных данных многие параметры на такой модели приняты приближённо, по данным работ на сопредельных участках в долине р. Исеть и на основе экспертных оценок – в частности, все параметры аллювиального горизонта и его связи с рекой, параметры нижнего разделяющего слоя, мелового водоносного горизонта и др.

Модель месторождения реализована в **плоско-пространственной структуре** (с использованием предпосылок перетекания, которые в данном случае несомненно выполняются).

Сеточная разбивка моделируемой области – квадратная, со стороной блока $\Delta x = 100$ м.

В базовом варианте модели принята следующая **параметрическая характеристика** водоносной толщи:

Верхний смежный водоносный горизонт: в днище долины (аллювий р.Исеть) – начальная мощность 10 м, коэффициент фильтрации 10 м/сутки (начальная проводимость 100 м²/сутки), гравитационная водоотдача 0.08. На бортах долины (делювий) и на междуречьях (неогеновые отложения) коэффициент фильтрации 0.5 м/сутки, водоотдача 0.03.

Верхний разделяющий слой: в днище долины – мощность 30 м, коэффициент фильтрации 10⁻³ м/сутки; на бортах долины и междуречьях – мощность 50 м, коэффициент фильтрации 10⁻⁴ м/сутки.

Основной водоносный горизонт (опоковый): мощность 50-60 м, проводимость (по предварительной карте, рис. 8.24) 25-800 м²/сутки, в зоне разведочно-эксплуатационных скважин 2800 м²/сутки, упругая водоотдача 1.5·10⁻³.



Нижний разделяющий слой: мощность 120 м, коэффициент фильтрации 10^{-4} м/сутки (в днище долины) и 10^{-5} м/сутки (на бортах долины и междуречьях).

Нижний смежный водоносный горизонт (меловой): мощность 10-20 м, проводимость $10 \text{ м}^2/\text{сутки}$, упругая водоотдача 10^{-4} .

Внешние граничные условия области по всем слоям модели заданы непроницаемыми на значительном удалении от водозаборного участка: на междуречьях – в зоне уменьшения проводимости основного горизонта до $25 \text{ м}^2/\text{сутки}$, вверх и вниз по долине реки – на расстоянии 9-10 км по линиям тока естественного потока подземных вод в основном пласте.

Внутренние граничные условия 3 рода заданы в первом слое модели по контурам русла р. Исеть. Река в пределах области моделирования имеет типично равнинный характер (рис. 8.27), со спокойным течением, многочисленными протоками и старичными озёрами; русловые отложения мощностью $m_p = 1-2$ м имеют илисто-суглинистый состав. При коэффициенте фильтрации K_p в диапазоне 0.01-0.03 м/сутки, ширине русла $G = 50-60$ м и проводимости аллювиального водоносного горизонта T порядка $100 \text{ м}^2/\text{сутки}$ параметры сопротивления ложа р. Исеть составят:

- удельное фильтрационное сопротивление русловых отложений $f_p = \frac{m_p}{K_p} \approx 75$ суток,
- коэффициент перетока в ложе реки $\chi_p = \frac{1}{f_p} \approx 0.013 \text{ сутки}^{-1}$,
- фактор перетекания в ложе реки $B = \sqrt{Tf_p} \approx 85$ м,
- приведенная ширина реки $\bar{G} = \frac{G}{B} \approx 0.65$, то есть река является «узкой»,
- обобщённая эквивалентная длина $\Delta L^* = B \operatorname{cth} \frac{G}{B} \approx 150$ м, что практически совпадает

с оценками по данным нестационарного режима половодья 1974 г. на режимной гидрогеологической станции.

Дополнительная проводимость для «речного» блока модели при этих параметрах равна:

$$T^* = \frac{LG}{f_p} \approx 75 \text{ м}^2/\text{сутки}$$

(L – длина русла реки в блоке, в среднем равная размеру блока $\Delta x = 100$ м).

Уровень конверсии граничного условия 3 рода принят на 3 м ниже уровня реки.





Рис. 8.27. Река Исеть на участке разведочных работ

Калибрация модели Шадринского МПВ является трудоёмкой и методически сложной – в силу её многофакторности – задачей. На начальном этапе следует выполнить оценку чувствительности модели к вариации параметров фильтрационной схемы. При этом необходимо учитывать возможность «нелинейности» чувствительности во времени, так как медленно развивающиеся процессы (перетекание, осушение гравитационной ёмкости и др.) по-разному проявляются за относительно короткое время опытно-эксплуатационного опробования и при длительной эксплуатации водозабора.

Для Шадринского месторождения выборочная оценка чувствительности выполнена по такой схеме:

– для вышерассмотренного базового набора параметров фильтрационной схемы зафиксированы модельные понижения к концу ОЗО и к концу проектного расчётного периода (25 лет \approx 9125 суток) в нескольких пространственно разделённых точках:

- 1) скв. 71 (опытно-эксплуатационный узел, то есть проектное положение водозаборного узла),
- 2) скв. 96 (наиболее удалённая по днищу долины, то есть по зоне наиболее высокой проводимости основного горизонта),



3) скв. 82 (наиболее удалённая по борту долины, то есть в направлении резкого уменьшения проводимости),

4) скв. 67 (на смежный аллювиальный горизонт).

– затем выполнены аналогичные модельные решения, в каждом из которых изменено значение одного из параметров фильтрационной схемы – в сторону его увеличения и уменьшения в 1.5-2 раза (табл. 8.3);

– в каждом варианте решения фиксируются понижения в вышеназванных точках модели и рассчитывается относительная чувствительность по изменению величины понижения по сравнению с базовым вариантом.

Таблица 8.3. Вариация параметров для оценки чувствительности модели

Элемент фильтрационной схемы	Значения параметра		
	Уменьшенное	Базовое	Увеличенное
Дополнительная проводимость ложа реки T^* , м ² /сутки (для площади русла в блоке 5500 м ²)	37.5	75	150
Гравитационная водоотдача верхнего смежного горизонта $\mu_{алл}$	0.04	0.08	0.16
Коэффициент фильтрации верхнего разделяющего слоя K_0 , м/сутки	0.00067	0.001	0.0015
Упругая водоотдача основного водоносного горизонта μ^*	0.00075	0.0015	0.003
Коэффициент фильтрации нижнего разделяющего слоя K_{00} , м/сутки	0.00005	0.0001	0.0002
Проводимость основного водоносного горизонта в зоне проектного водозаборного узла (Т-71), м ² /сутки	2000	2800	3300
Проводимость основного водоносного горизонта в западной (верхней по течению) зоне днища долины (Т-96), м ² /сутки	200	250	600



Полученные результаты (табл. 8.4) достаточно показательно иллюстрируют некоторые проблемы постановки калибрационных задач. Исследованные элементы фильтрационной схемы различаются по своему «поведению» при кратковременном опробовании и на длительный прогноз:

К группе I относятся факторы, которые активно проявляются как при ОЭО, так и при длительной работе водозабора. В первую очередь, это коэффициент фильтрации верхнего разделяющего слоя K_0 , что вполне естественно для месторождения подземных вод в

Таблица 8.4. Результаты оценки чувствительности модели

Калибруемый параметр	Группа	№ скв.	Для периода опытно-эксплуатационной откачки				Для полного расчётного срока эксплуатации					
			Значения параметра									
			базовое	уменьшенное		увеличенное		базовое	уменьшенное		увеличенное	
S, м	S, м	$\Delta S, \%$	S, м	$\Delta S, \%$	S, м	S, м	$\Delta S, \%$	S, м	$\Delta S, \%$			
Экв. длина ΔL	III	71	11.10	11.10	0.00	11.10	0.00	15.35	15.10	-1.63	15.79	2.87
Водоотдача аллювия	III			11.12	0.18	11.08	-0.18		15.61	1.69	14.87	-3.13
K_0	I			11.88	7.03	10.22	-7.93		17.11	11.47	13.87	-9.64
Упругая водоотдача	II			11.49	3.51	10.27	-7.48		15.38	0.20	15.29	-0.39
K_{00}	IV			11.12	0.18	11.07	-0.27		15.36	0.07	15.33	-0.13
Проводимость (Т-71)	I			11.66	5.05	10.88	-2.35		15.91	3.65	15.13	-1.70
Проводимость (Т-96)	IV			11.13	0.52	10.97	-1.17		15.40	0.33	15.15	-1.30
Экв. длина ΔL	III	96	3.15	3.15	0.00	3.15	0.00	7.38	7.15	-3.12	7.78	5.42
Водоотдача аллювия	III			3.17	0.63	3.14	-0.32		7.66	3.79	6.87	-6.91
K_0	I			3.79	20.32	2.46	-21.90		9.02	22.22	6.03	-18.29
Упругая водоотдача	II			3.54	12.38	2.36	-25.08		7.41	0.41	7.31	-0.95
K_{00}	IV			3.17	0.63	3.13	-0.63		7.38	0.00	7.37	-0.14
Проводимость (Т-71)	IV			3.15	0.00	3.15	0.00		7.38	0.00	7.38	0.00
Проводимость (Т-96)	I			3.25	6.09	2.74	-13.02		7.49	1.49	6.97	-5.56
Экв. длина ΔL	III	82	0.25	0.25	0.00	0.25	0.00	5.45	5.32	-2.39	5.69	4.40
Водоотдача аллювия	III			0.25	0.00	0.25	0.00		5.75	5.50	5.00	-8.26
K_0	I			0.35	40.00	0.15	-40.00		6.52	19.63	4.61	-15.41
Упругая водоотдача	II			0.46	84.00	0.06	-76.00		5.52	1.28	5.32	-2.39
K_{00}	IV			0.25	0.00	0.25	0.00		5.46	0.18	5.45	0.00
Проводимость (Т-71)	IV			0.25	0.00	0.25	0.00		5.45	0.00	5.45	0.00
Проводимость (Т-96)	IV			0.25	0.00	0.24	-4.00		5.49	0.73	5.34	-2.02
Экв. длина ΔL	III	67(al)	0.22	0.22	0.00	0.22	0.00	3.73	3.32	-10.99	4.45	19.30
Водоотдача аллювия	II			0.38	72.73	0.12	-45.45		3.88	4.02	3.37	-9.65
K_0	I			0.15	31.82	0.30	36.36		3.38	-9.38	4.07	9.12
Упругая водоотдача	II			0.24	9.09	0.19	-13.64		3.74	0.27	3.71	-0.54
K_{00}	IV			0.22	0.00	0.22	0.00		3.73	0.00	3.73	0.00
Проводимость (Т-71)	IV			0.22	0.00	0.22	0.00		3.73	0.00	3.73	0.00
Проводимость (Т-96)	IV			0.22	0.00	0.22	0.00		3.75	0.54	3.66	-1.88

пластовой водоносной системе артезианского бассейна. Важно также отметить, что вариация этого параметра вызывает отклик во всех наблюдаемых точках моделях.

К этой же группе можно отнести и проводимость основного горизонта (Т-71, Т-96), однако влияние её изменения ощутимо проявляется лишь в ближайших зонах модели.

В группу II попадает упругая водоотдача основного горизонта μ^* , значимость которой резко снижается при длительной работе водозабора, что также вполне закономерно при взаимодействии со смежным грунтовым водоносным горизонтом.

III группа включает факторы, роль которых при коротком ОЭО практически не проявляется, но возрастает при длительном водоотборе. Это эквивалентная длина ΔL , роль которой особенно проявляется для верхнего (аллювиального) горизонта.

Для гравитационной водоотдачи $\mu_{алл}$ обнаруживается своеобразная ситуация:

– для понижений в основном горизонте её роль хотя и незначительно, но возрастает; по-видимому, это связано с постепенно развивающимся процессом перетекания, который в значительной мере обеспечивается гравитационной водоотдачей грунтового горизонта,

– для самого грунтового горизонта (скв. № 67) роль собственной водоотдачи, напротив, заметно снижается во времени (группа II). Этот факт можно интерпретировать в рамках теории формирования депрессии при откачках, согласно которой при больших временах величина понижения определяется, в основном, проводимостью и граничными условиями.

Дальнейшая калибровка предварительного варианта модели выполнена по данным нестационарного прослеживания понижений в наблюдательных скважинах при опытно-эксплуатационной откачке.

При корректировке проводимости основного пласта в целом соблюдалась геологически обусловленная закономерность снижения трещинной проницаемости опок от днища долины к междуречьям. Однако, для согласования модельных результатов с опытными данными по всем наблюдавшимся скважинам абсолютные значения проводимости и конфигурация зон фильтрационной неоднородности (по принципу «лоскутного одеяла») подверглись значительной корректировке (рис. 8.28).

Величина упругой водоотдачи при калибровке не корректировалась; необходимые изменения пьезопроводности для согласования формы графиков прослеживания понижений достигались за счёт корректировки проводимости опокового пласта. Гравитационная водоотдача верхнего смежного горизонта сохранена без изменений (рис. 8.29), поскольку, во-первых, данные по единственной точке наблюдений (скв. 67) крайне



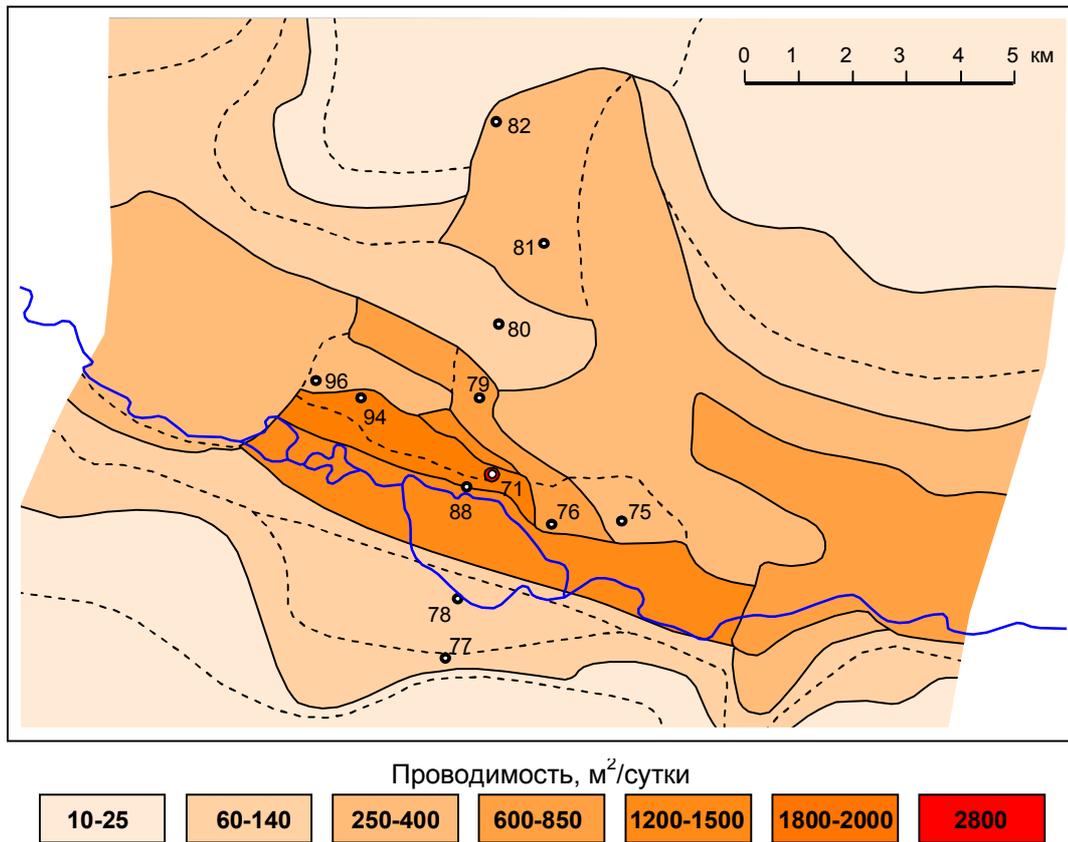


Рис. 8.28. Карта проводимости основного горизонта (по результатам калибровки)

ненадёжны и, во-вторых, чувствительность основного горизонта к этому параметру за период ОЭО невелика (табл. 8.4).

В связи с низкой чувствительностью модели сохранены без изменений и другие элементы фильтрационной схемы: дополнительная проводимость ложа реки, фильтрационные свойства верхнего и нижнего смежных горизонтов.

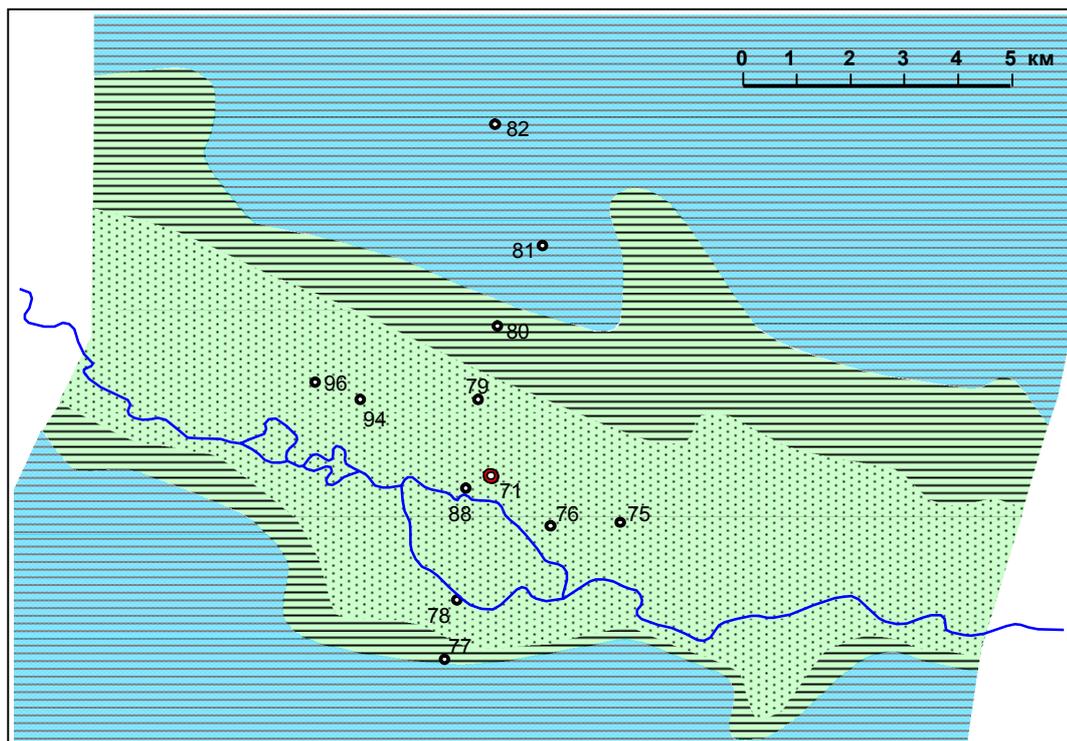
Конфигурация зон неоднородности слабопроницаемых разделяющих слоёв (верхнего и нижнего) сохранена неизменной (рис. 8.29); в днище речной долины несколько увеличен коэффициент фильтрации верхнего разделяющего слоя (до $1.5 \cdot 10^{-3}$ м/сутки).

Направленность калибрационных корректировок параметров контролировалась как по конечным величинам понижений (табл. 8.5, рис. 8.30), так и по форме графиков временного прослеживания за весь период ОЭО (рис. 8.31, 8.32). Можно заключить, что в результате калибровки на модели достигнуто удовлетворительное согласование темпа развития депрессионной воронки во времени и достигнутых конечных понижений. Исключение составляют:

– скв. 67 на аллювиальный водоносный горизонт: эта аномалия вполне предсказуема, потому что, как показано выше, фактическая величина понижения в этой скважине неизвестна. Очевидно лишь, что на модели величина понижения не должна быть больше наблюдаемой – это условие выполняется.

– скв. 88 на основной горизонт (в ближайшей к опытному узлу зоне): понижение на модели значительно (на 2 м) больше фактически наблюдаемого. Вероятно, это отклонение связано со сложным характером неоднородности трещинной проницаемости опок, которую сложно воспроизвести на дискретной сеточной модели.

– скв. 71 на основной горизонт (приблизённо соответствует затрубной скважине опытного узла): как видно на рис. 8.32, модельный темп снижения уровня устойчиво (около 10%) превышает фактически наблюдавшийся. Это свидетельствует о «жесткой» модельной схематизации реальной совокупности гидрогеодинамических факторов в локальной зоне расположения опытного куста.



Коэффициент фильтрации верхнего и (нижнего) разделяющих слоёв, м/сутки

0.0015
(0.0001)

0.0001
(0.00001)

Водоотдача и (коэффициент фильтрации, м/сутки) верхнего смежного горизонта

0.08
(10)

0.03
(0.5)

Рис. 8.29. Карта проницаемости разделяющих слоёв, водоотдачи и фильтрационных свойств верхнего смежного водоносного горизонта (по результатам калибровки модели)

Таблица 8.5. Результаты калибровки модели по конечным понижениям

Скв.	Водоносный горизонт	Радиальная координата, м	Понижение на конец опытно-эксплуатационной откачки, м		
			фактическое	на модели	
71	нижнеэоценовый	~ 3	9.55	10.74	
88		500	4.99	6.94	
79		1800	4.46	4.47	
80		3500	1.83	1.85	
81		5200	0.70	0.76	
82		8000	0.38	0.35	
78		2800	2.58	2.55	
77		5400	0.26	0.26	
76		1600	5.19	5.16	
75		3000	2.69	2.74	
94		3300	3.54	3.38	
96		4500	2.62	2.61	
67		аллювиальный	45	0.76	0.30

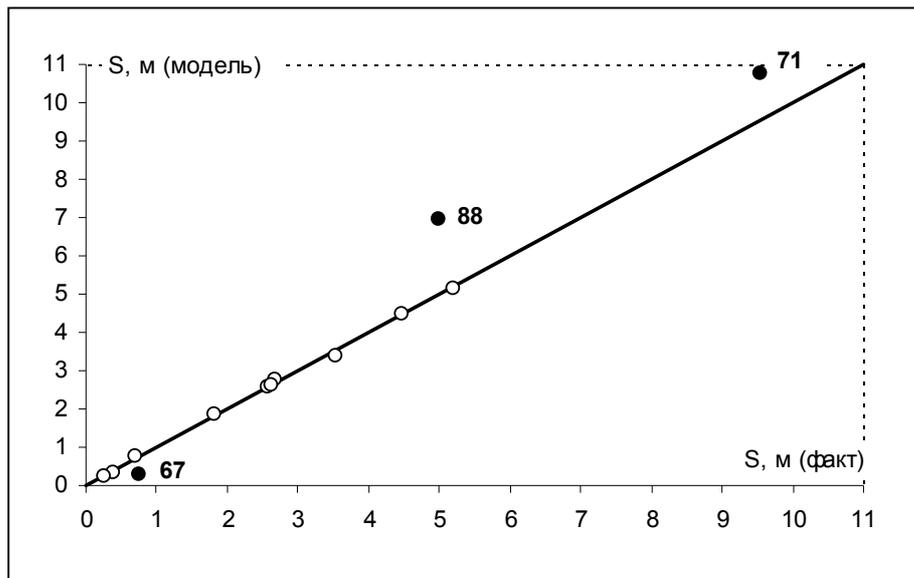


Рис. 8.30. Сравнительная диаграмма конечных понижений по результатам калибровки

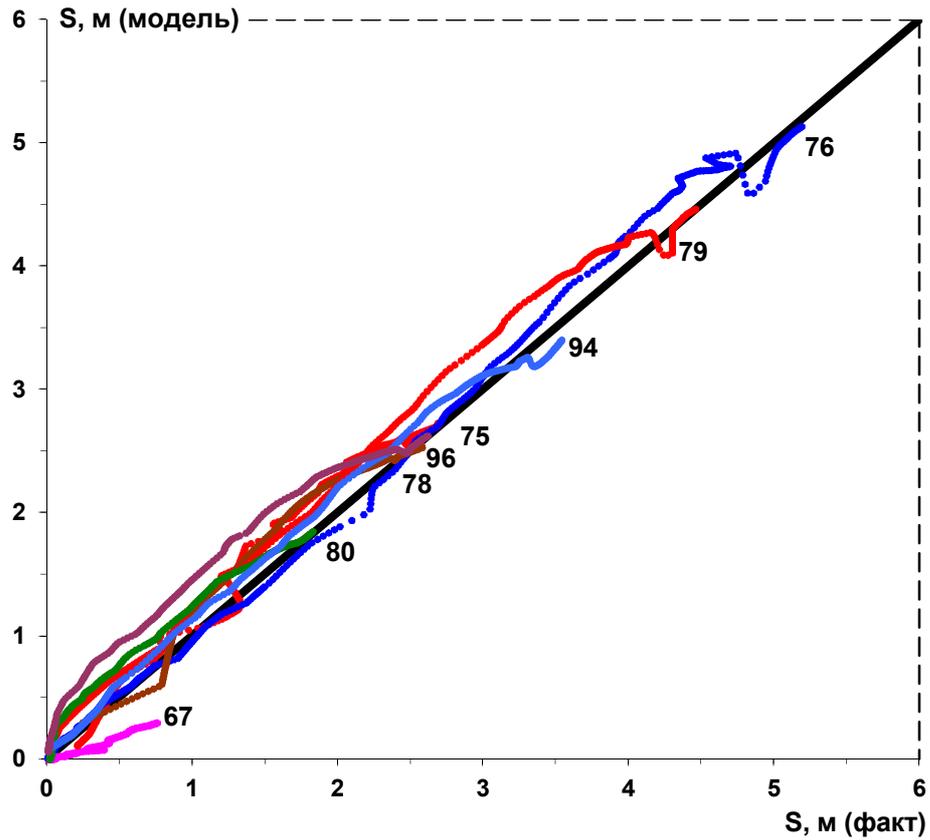


Рис. 8.31. Сравнительная диаграмма графиков временного прослеживания по результатам калибровки

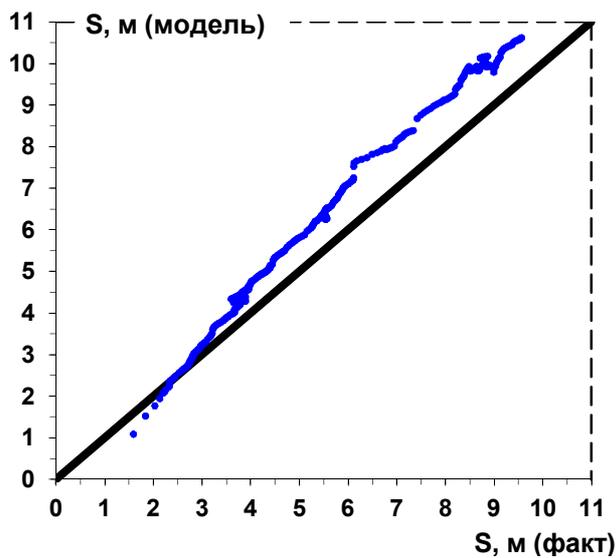


Рис. 8.32. Сравнительная диаграмма графика временного прослеживания по скв. 71 по результатам калибровки модели

Прогнозное моделирование на откалиброванной модели выполнено в нескольких вариантах.

Предварительно необходимо отметить, что прогнозные решения выполнены для того же размера модели, который использован при калибрации по данным ОЭО. Понятно, что прогнозная область влияния водозабора будет больше, однако достоверных данных для расширения области моделирования (в особенности – по днищу долины р.Исеть) недостаточно. Поэтому результаты всех рассматриваемых ниже прогнозных решений являются в какой-то степени «жёсткими» по величинам понижений уровней во всей пластовой водоносной системе.

Допустимое понижение уровня основного горизонта $S_{\text{доп}} = 30$ м (до подошвы верхнего разделяющего слоя).

Водозаборное сооружение – узел из трёх скважин в вершинах равностороннего треугольника со стороной 10 м, диаметр фильтра 16'' (0.4 м), технический радиус водоприёмной части скважины $r_c = 0.2$ м. Эквивалентный радиус «большого колодца» $r_{\text{вз}} = \sqrt[3]{0.2 \cdot 10 \cdot 10} = 2.71$ м.

Корректное сопоставление гидравлического и модельного прогнозов (что несомненно необходимо и интересно) возможно лишь при допущении постоянства физико-геологического состояния водоприёмной части существующих опытно-эксплуатационных и будущих эксплуатационных скважин.

Для этого необходимо определить расчётный радиус опытно-эксплуатационных скважин r_c^0 с понижением S_c по формуле:

$$\lg r_c^0 = \lg r_n - 2.73 \frac{T}{Q} (S_c - S_n),$$

где r_n , S_n – радиальная координата и понижение в наблюдательной скважине (в нашем случае – скв.71 $r_n \sim 3$ м, $S_n = 9.55$ м), Q – дебит (в нашем случае – средний на завершающем этапе 14 950 м³/сутки), T – проводимость пласта в области действующей скважины (2800 м²/сутки).

При среднем понижении в действующих скважинах $S_c = 16.8$ м расчётный радиус, учитывающий сопротивление фильтра и прискважинной зоны, составляет $5.85 \cdot 10^{-4}$ м.

При таком значении расчётного радиуса удельная (на единицу дебита) потеря напора на входе в действующие скважины составляет:



$$\overline{\Delta S^0} = \frac{1}{2.73T} \lg \frac{r_c}{r_c^0} = 3.294 \cdot 10^{-4} \text{ сутки/м}^2.$$

Удельная (на единицу дебита) поправка к сеточному решению S_M в водозаборном блоке:

$$\overline{\Delta S_M} = \frac{S_c - S_M}{Q_3} = \frac{1}{T} \left(\frac{1}{2\pi} \ln \frac{\Delta x}{r_{B3}} - 0.25 \right) = 1.158 \cdot 10^{-4} \text{ сутки/м}^2.$$

Таким образом, суммарная удельная поправка к модельному решению в водозаборном блоке составляет:

$$\overline{\Delta S} = \overline{\Delta S^0} + \overline{\Delta S_M} = 4.452 \cdot 10^{-4} \text{ сутки/м}^2.$$

В **I варианте** прогнозное решение заключалось в подборе такого дебита водоотбора Q_3 , при котором понижение уровня в водозаборном блоке модели составляет $S_M = S_{\text{доп}} - \overline{\Delta S} \cdot Q_3$. Подобранная в ходе решения величина дебита 21 400 м³/сутки, понижение в водозаборном блоке модели $S_M = 20.50$ м, при этом $\overline{\Delta S} \cdot Q_3 = 9.53$ м; прогнозное понижение в водозаборном узле 30.03 м.

Этот результат весьма показателен: возможный дебит водозабора в несколько раз больше, чем по аналитическому расчёту для формальной расчётной схемы изолированного полосообразного пласта! Конечно, эта оценка достаточно условна, учитывая приближённый характер параметрической основы модели, тем не менее эффект очевиден.

Однако, полный анализ полученного решения резко снижает, а точнее – уничтожает этот внешний эффект, поскольку при таком дебите водозабора образуется обширная (к концу расчётного срока 4-5 км в поперечнике, рис. 8.33) область полного осушения верхнего водоносного горизонта, то есть понижения уровней грунтовых вод превосходят полную обводнённую мощность аллювия (10 м).

Формирование постепенно расширяющейся зоны осушения аллювиального горизонта начинается примерно в середине расчётного срока эксплуатации. Её конфигурация (рис. 8.33) своеобразна: во-первых, наиболее глубокая часть депрессии на левобережье смещена относительно водозаборного узла и, во-вторых, на правом берегу видна локальная депрессия с понижениями до 6-7 м. Эти особенности вызваны влиянием реки, удерживающей уровни верхнего горизонта и расчленяющей общую депрессионную воронку, формирующуюся в связи с площадным перетеканием в основной горизонт.



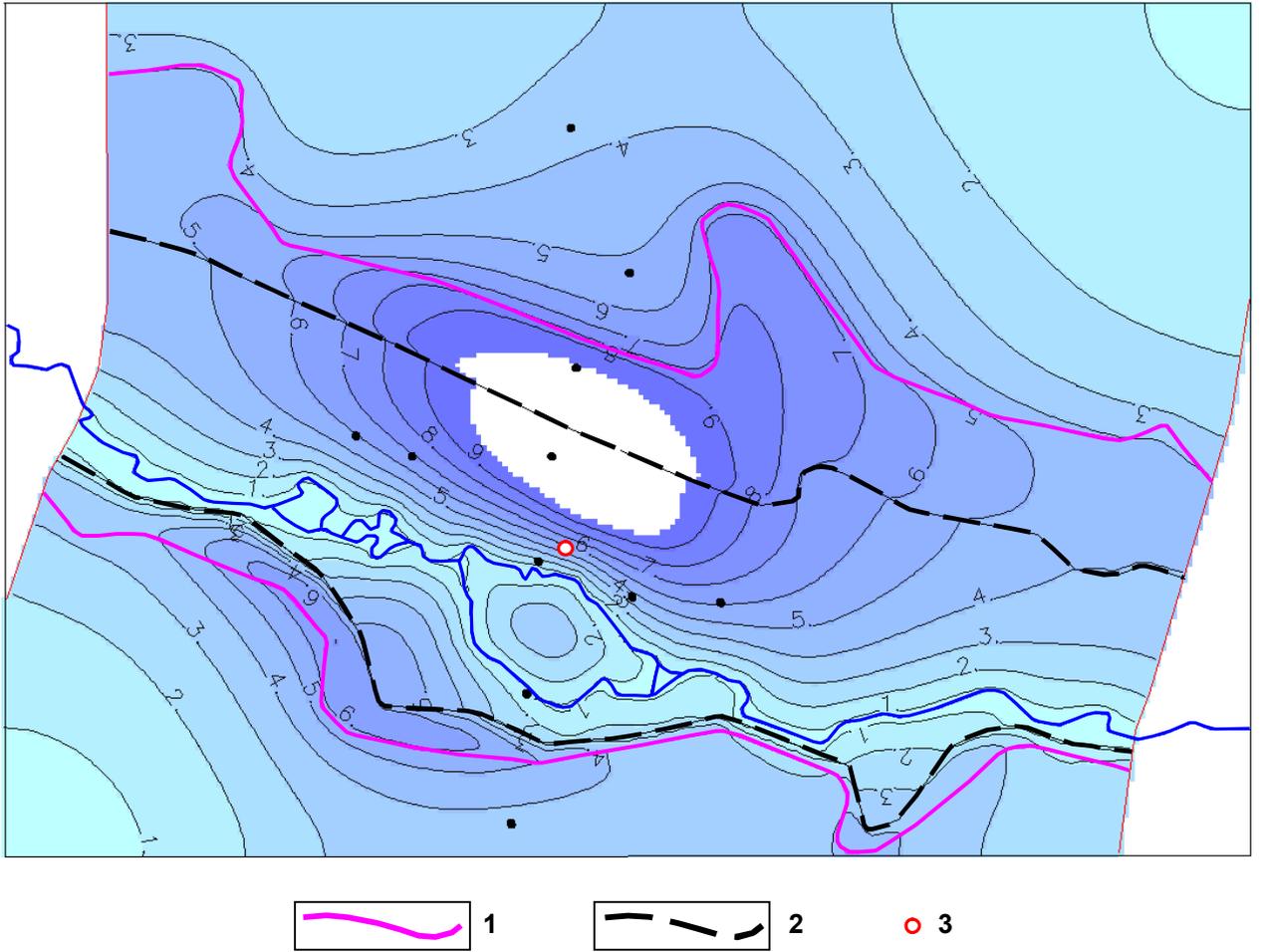


Рис. 8.33. Изолинии понижений уровня верхнего водоносного горизонта на расчётный момент 10^4 суток при дебите водозабора $21\,400\text{ м}^3/\text{сутки}$ (1 – контур зоны высокой проницаемости верхнего разделяющего слоя, $1.5 \cdot 10^{-3}\text{ м/сутки}$; 2 – контур зоны высокой проницаемости верхнего водоносного горизонта, 10 м/сутки ; 3 – водозаборный узел)

Как видно на модельных графиках временного прослеживания понижений (рис. 8.34), за расчётный период эксплуатации 10 000 суток не достигается стабилизация уровней, то есть задействованные на модели «питающие» граничные условия 3 рода (река, связанная с верхним водоносным горизонтом) не в состоянии удержать уровни. В течение первого года эксплуатации формируется отчётливо выраженный ложностационарный этап развития понижений в основном водоносном горизонте (кривая 2). Его проявление связано с началом реакции верхнего (аллювиального) безнапорного горизонта с гравитационной водоотдачей (кривая 3).

Далее снижение уровней в основном горизонте плавно переходит в режим гравитационного этапа. В отличие от классической схемы снижение уровней безнапорного верхнего горизонта на этом этапе происходит заметно интенсивнее, чем в основном горизонте. Это вполне закономерно, так как при снижении уровней верхнего горизонта происходит прогрессирующее уменьшение его проводимости.

Интересно сравнить результаты моделирования с ранее выполненным предварительным гидравлическим прогнозом, согласно которому понижение 30 м достигается при дебите $Q_3 = 19\,880 \text{ м}^3/\text{сутки}$. Для перехода от удельных срезов к понижениям формула (8.4) преобразуется к виду:

$$S_{\Pi} = \varphi_0 Q_3 + C Q_3 (\lg 10^4 - \lg 61).$$

При $\varphi_0 = 1.124 \cdot 10^{-3} \text{ сутки/м}^2$, $C = 1.739 \cdot 10^{-4} \text{ сутки/м}^2$ прогнозная величина понижения $S_{\Pi} = 22.35 + 7.66 = 30.01 \text{ м}$.

Сопоставление кривых 8 (гидравлический прогноз) и 2 (моделирование) на рис. 8.34 отчётливо демонстрирует «слабое место» гидравлического прогноза: в нём не учитывается существование длительного ложностационарного участка, который задерживает развитие понижения и тем самым позволяет повысить возможный дебит водоотбора. Однако, гораздо более важно, что в рассматриваемой ситуации гидравлическим методом принципиально невозможно было прогнозировать осушение верхнего водоносного горизонта, поскольку за время ОЭО его реакция практически не проявилась.

Очевидно, что наличие значительных понижений уровней и даже осушения в грунтовом водоносном горизонте недопустимо с гидрогеодинамических и экологических позиций и требует корректировки прогнозной величины водоотбора. Поэтому в окончательных вариантах прогнозного моделирования дебит водозаборного узла подбирался таким образом, чтобы понижения уровней в верхнем горизонте не превышали допустимой величины – порядка половины его мощности, то есть около 5 м.



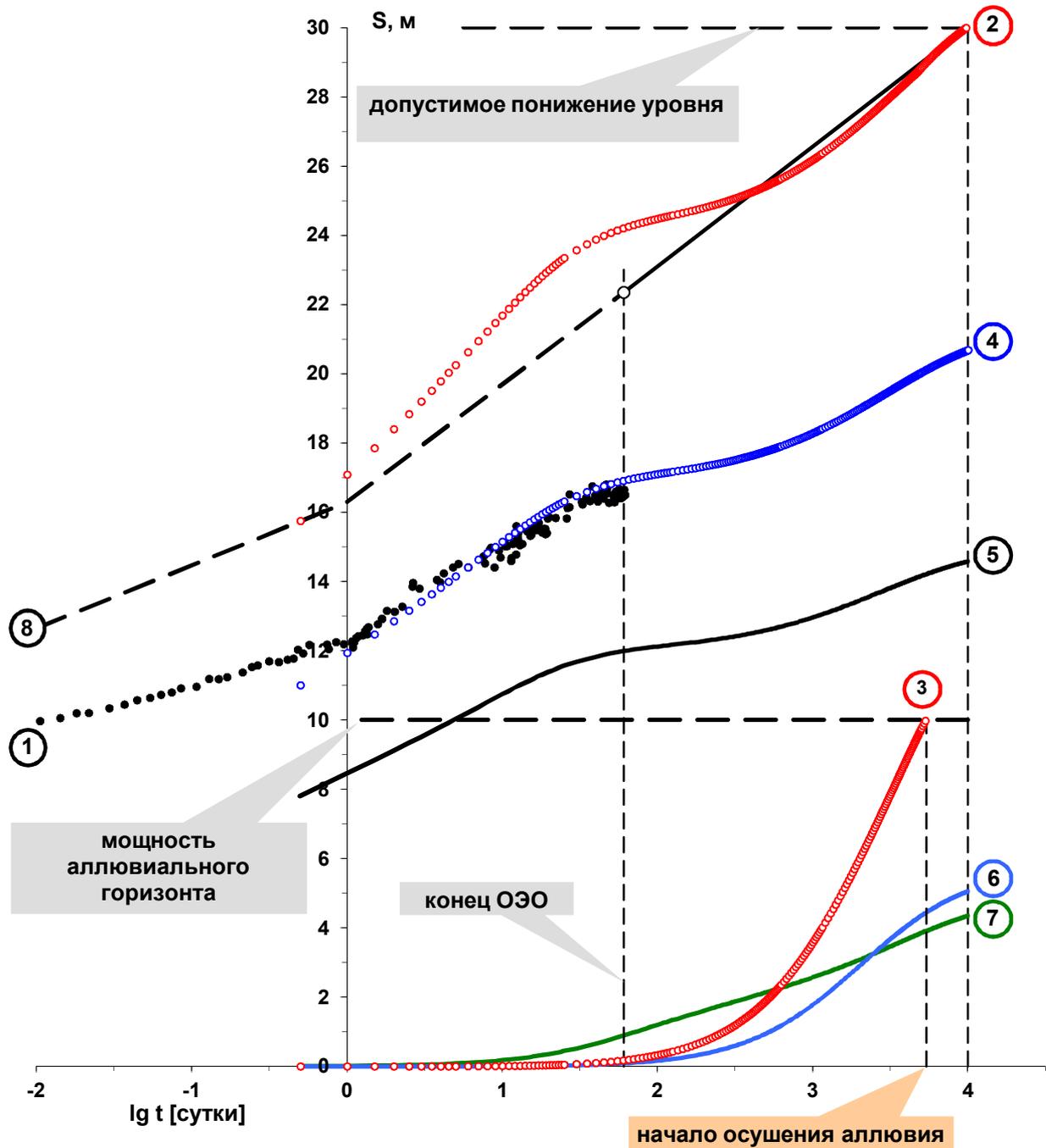


Рис. 8.34. Временное прослеживание понижений уровня
 (для основного и нижнего горизонтов – в точке водозаборного узла,
 для верхнего – в точке максимальной депрессии)

- 1 – факт при опытно-эксплуатационной откачке (основной горизонт);
- 2, 3 – прогноз с дебитом 21 400 м³/сутки (2 – основной горизонт, 3 – верхний горизонт);
- 4 – прогноз с дебитом 14 950 м³/сутки (основной горизонт);
- 5, 6, 7 – прогноз с дебитом 10 600 м³/сутки (5 – основной горизонт, 6 – верхний горизонт, 7 – нижний горизонт);
- 8 – прогноз гидравлическим методом при дебите 19 880 м³/сутки

Во **II варианте** принят дебит 14 950 м³/сутки, отвечающий среднему на основной части опытно-эксплуатационной откачки. Видно, что модельная кривая (4 на рис. 8.34) понижения в основном горизонте удовлетворительно совпадает с фактически наблюденной при ОЭО (кривая 1). При этом дебите понижение в водозаборном блоке модели $S_M = 14.02$ м, поправка $\overline{\Delta S} \cdot Q_3 = 6.66$ м; прогнозное понижение в водозаборном узле 20.68 м. Однако, прогнозные понижения уровня в аллювии при таком дебите всё же слишком высоки (более 7 м).

В **III варианте** дебит водоотбора снижен до величины 10 600 м³/сутки, при которой максимальное понижение в аллювии составляет 5 м. В основном горизонте понижение в водозаборном блоке модели $S_M = 9.86$ м, поправка $\overline{\Delta S} \cdot Q_3 = 4.72$ м; прогнозное понижение в водозаборном узле 14.58 м. Графики временного прослеживания понижений приведены на рис. 8.34 (кривые 5, 6, 7), схемы изолиний конечных понижений – на рис. 8.35. Интересно, что в периферийной области модели понижения уровней в нижнем (меловом) водоносном горизонте больше, чем в основном, что кажется нелогичным с гидрогеодинамической точки зрения. Объяснение этого факта заключается в различии пьезопроводности обоих горизонтов – на периферии основного горизонта, где проводимость меньше 100 м²/сутки, его пьезопроводность оказывается ниже, чем в меловом горизонте. Кроме того, распространение депрессионной воронки в основном горизонте существенно сдерживается интенсивным перетеканием из верхнего горизонта.

Анализ **балансовой структуры** эксплуатационного водоотбора свидетельствует о её значительной динамичности (рис. 8.36): на начальном этапе преобладает сработка упругой ёмкости основного горизонта, однако уже через месяц активно развивается перетекание, обеспечиваемое сработкой гравитационной ёмкости верхнего горизонта. Одновременно постепенно возрастает приток из реки в верхний горизонт, который к концу расчётного срока эксплуатации обеспечивает около 90% дебита водоотбора. Участие упругой ёмкости нижнего горизонта ничтожно мало.

Этот пример отчётливо подтверждает тезис об условности типизации месторождений подземных вод, поскольку при явно выраженном «пластовом» типе строения основную роль в балансовом обеспечении водоотбора играют параметры верхнего водоносного горизонта и его взаимосвязь с рекой.



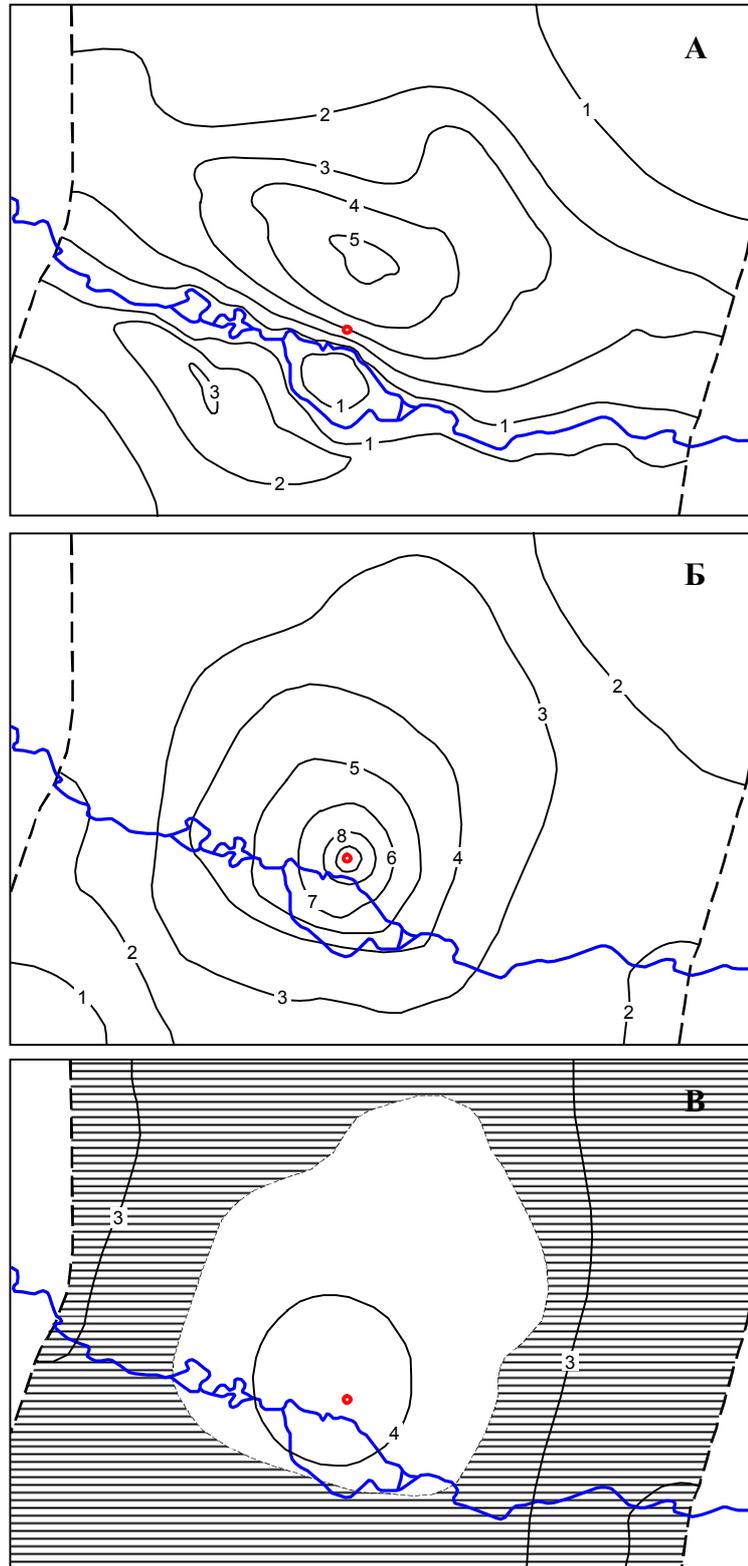


Рис. 8.35. Изолинии понижений уровня в верхнем (А), основном (Б) и нижнем (В) водоносных горизонтах при дебите водоотбора $10\ 600\ \text{м}^3/\text{сутки}$ (заштрихована область, где понижения в нижнем горизонте больше, чем в основном)

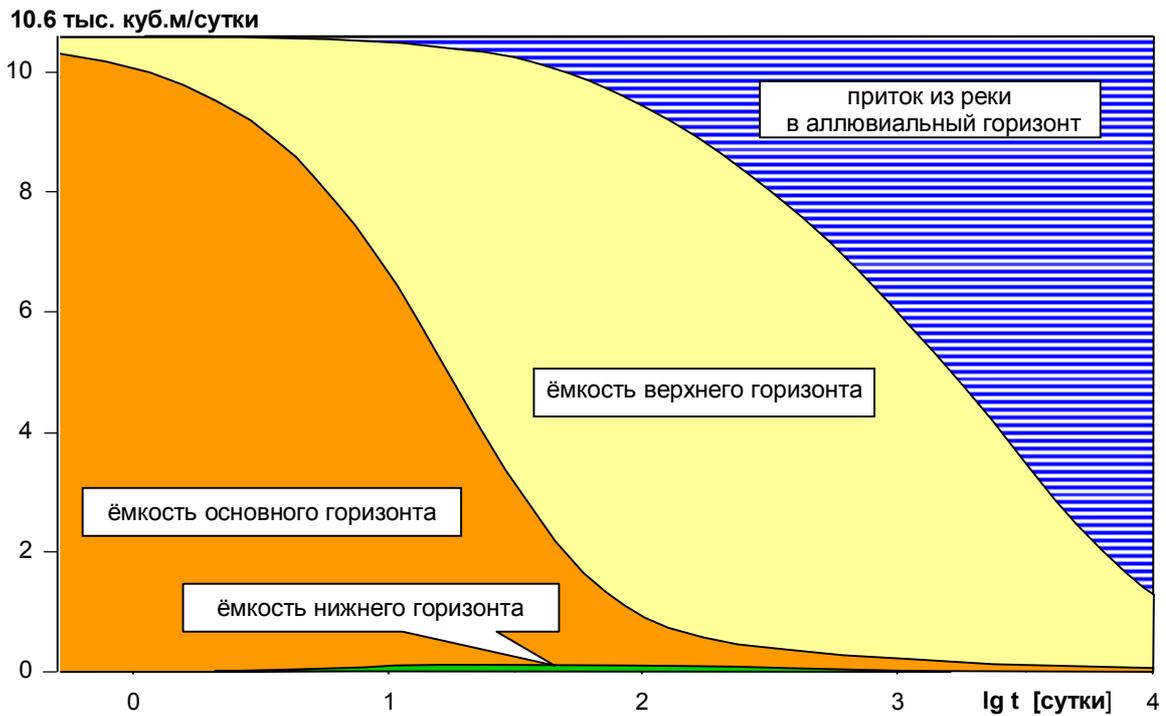


Рис. 8.36. Балансовая структура эксплуатационного водоотбора

Прогноз качества воды при эксплуатации. Возможность использования подземных вод основного (опокового) горизонта для хозяйственно-питьевого водоснабжения была согласована с органами санэпиднадзора только при условии, что качество добываемой воды будет не хуже, чем в естественных условиях – в частности, общая минерализация не должна превышать 1.3 г/л. Исходя из рассмотренных выше общих формул смешения (8.1, 8.2) при эксплуатации водозаборов в пластовых водоносных толщах, условие неизменности качества воды при эксплуатации ($C_э = C_e$) может быть достигнуто при:

$$\Delta\bar{Q}_0(C_0 - C_e) + \Delta\bar{Q}_{00}(C_{00} - C_e) = 0.$$

При $C_e = 1.3$ г/л, $C_0 = 0.6$ г/л, $C_{00} = 9.8$ г/л это означает, что качество воды при эксплуатации не ухудшится, если доля дополнительного перетекания из мелового горизонта не будет превышать 8% от величины дополнительного перетекания из аллювия:

$$\Delta\bar{Q}_{00} \leq \frac{-(C_0 - C_e)}{(C_{00} - C_e)} \Delta\bar{Q}_0 \leq 0.08\Delta\bar{Q}_0.$$

Очевидно, что для таких тонких оценок должны быть так же «тонко» разведаны параметры перетекания и сверху, и снизу. Такая задача методически чрезвычайно сложна и практически неразрешима при современном уровне постановки и интерпретации опытно-фильтрационных опробований. В частности, в рассмотренном прогнозе с дебитом 10 600 м³/сутки доля перетекания из нижнего горизонта в основной ничтожно мала и не



превышает 0.5%. Однако, нужно понимать, что эта модельная оценка базируется на весьма приближённой (практически по всем параметрам среды) фильтрационной схеме.

Для гарантированного сохранения качества при эксплуатации эффективным решением может быть классическая гидродинамическая защита: одновременно с работой питьевого водозабора обеспечить технический водоотбор из мелового горизонта – такой, чтобы его уровни были понижены под эксплуатационные уровни опокового горизонта и тем самым исключена возможность перетекания минерализованных вод снизу.

Оценить тенденции формирования качества в сложнопостроенных пластовых системах, как правило, возможно только по опыту достаточно длительной опытной эксплуатации водозабора. Впоследствии, через несколько лет, на Шадринском месторождении проводилась ещё одна, уникальная опытно-эксплуатационная откачка длительностью около 500 суток, которая заметно уточнила параметрическую картину, но не выявила какой-либо тенденции изменения качества. Это может служить косвенным подтверждением того, что доля дополнительного перетекания снизу очень мала, а опресняющий эффект перетекания из аллювиального горизонта за такое время ещё не проявился. Действительно, по формуле (8.3) при $m_0 = 30$ м, $n_0^* \approx 0.1$, $K_0 = 1.5 \cdot 10^{-3}$ м/сутки, $\Delta H_0 \approx 10-15$ м начало поступления пресной воды из аллювия в основной горизонт следует ожидать не ранее, чем через 10-15 лет от начала эксплуатации водозабора.

Завершая рассмотрение примера разведки месторождения «пластового» типа, нужно ещё раз подчеркнуть: решающими факторами формирования эксплуатационных запасов первого от поверхности межпластового водоносного горизонта являются:

- для баланса водоотбора: параметры смежного грунтового горизонта (водоотдача и проводимость аллювия, сопротивление ложа реки) и его связь с основным горизонтом (проницаемость верхнего разделяющего слоя),
- для качества добываемой воды: параметры перетекания сверху и снизу отдельно.

Очевидно, что для реального подсчёта эксплуатационных запасов необходимо проведение ещё одного, целенаправленного этапа разведки, где были бы выполнены необходимые виды и объёмы работ для достоверной характеристики всех значимых элементов фильтрационной схемы месторождения. При этом следует предпринять дополнительные разведочные работы на флангах месторождения, учитывая необходимость расширения области моделирования и целесообразность рассредоточения водоотбора на несколько водозаборных узлов.

