

ЭПИГНОЗНЫЙ АНАЛИЗ ОПЫТА ЭКСПЛУАТАЦИИ ПРИРЕЧНОГО ВОДОЗАБОРА

РЕЛЬЕФ, КЛИМАТ, ГИДРОГРАФИЯ

ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ

РЕЗУЛЬТАТЫ РАЗВЕДКИ МЕСТОРОЖДЕНИЯ

ДЕЙСТВУЮЩЕЕ ВОДОЗАБОРНОЕ СООРУЖЕНИЕ

АНАЛИЗ ОПЫТА ЭКСПЛУАТАЦИИ ВОДОЗАБОРА

- Режим уровней и понижений
- Абсолютные значения понижений
- Гидрогеодинамическое несовершенство колодцев
- Влияние гидрологического режима
- Зимняя трансформация контура р.Бира
- Влияние температуры подземных вод
- Возрастание сопротивления ложа реки
- Возможность отрыва депрессионной воронки от ложа реки
- Обратные задачи по опыту эксплуатации
- Выводы и рекомендации по организации объектного мониторинга и доразведке месторождения

ЭПИГНОЗНЫЙ АНАЛИЗ ОПЫТА ЭКСПЛУАТАЦИИ ПРИРЕЧНОГО ВОДОЗАБОРА

(по данным эксплуатационной разведки Августовского месторождения подземных вод для водоснабжения г. Биробиджана, Кулаков В.В., 2006 г.)

Водозабор на Августовском месторождении подземных вод обеспечивает централизованное хозяйственно-питьевое и технического водоснабжение г. Биробиджана – областного центра Еврейской автономной области. Разведка Августовского месторождения проводилась в 1967-68 г.г.; по её результатам утверждены эксплуатационные запасы подземных вод в количестве 66.5 тыс. м³/сутки. Водозабор начал работать в 1979 г. и был введён в постоянную эксплуатацию в 1981 г. В 2006 г. проведена эксплуатационная разведка месторождения в связи с истечением расчётного срока (25 лет), на который были утверждены эксплуатационные запасы подземных вод.

Рельеф. Район месторождения расположен в северо-западной части Среднеамурской впадины и представляет собой обширную заболоченную равнину с абсолютными отметками 70-90 м, с широкой долиной р. Биры в центральной части.

Климат. Территория находится в области муссонного климата умеренных широт. Зимой преобладает перенос западных сухих воздушных масс с континента в сторону Тихого океана; летом преобладающие направления переноса воздушных масс меняются на обратные – с океана на континент. Зима морозная, малоснежная; весна сухая, затяжная; лето умеренно жаркое, влажное; осень тёплая, обычно сухая. Годовая амплитуда температуры воздуха высокая: от +40°С до -49°С. Среднемесячные температуры от -25°С в январе до +20°С в июле (рис. 7.25). Первые заморозки начинаются во второй половине сентября, последние отмечаются в середине мая.

Среднегодовое количество осадков 830 мм. В тёплый период (с апреля по октябрь) выпадает около 90% годового количества. Максимум осадков приходится на июль и август, минимум – на январь и февраль (рис. 7.25).

Гидрография. Долина реки Биры в районе г. Биробиджана имеет ширину 3-7 км. Русло обычно разбивается на протоки, нередко перекаты с бурным течением. Ширина русла реки 70-120 м, глубина на мелководных участках 0.5-1.5 м, скорости течения 2-2.6 м/с, на плёсах соответственно 2-3.5 м и 1-1.5 м/с. Состав донных отложений на перекатах каменистый и каменисто-галечный, на плёсах – галечный и песчано-галечный.



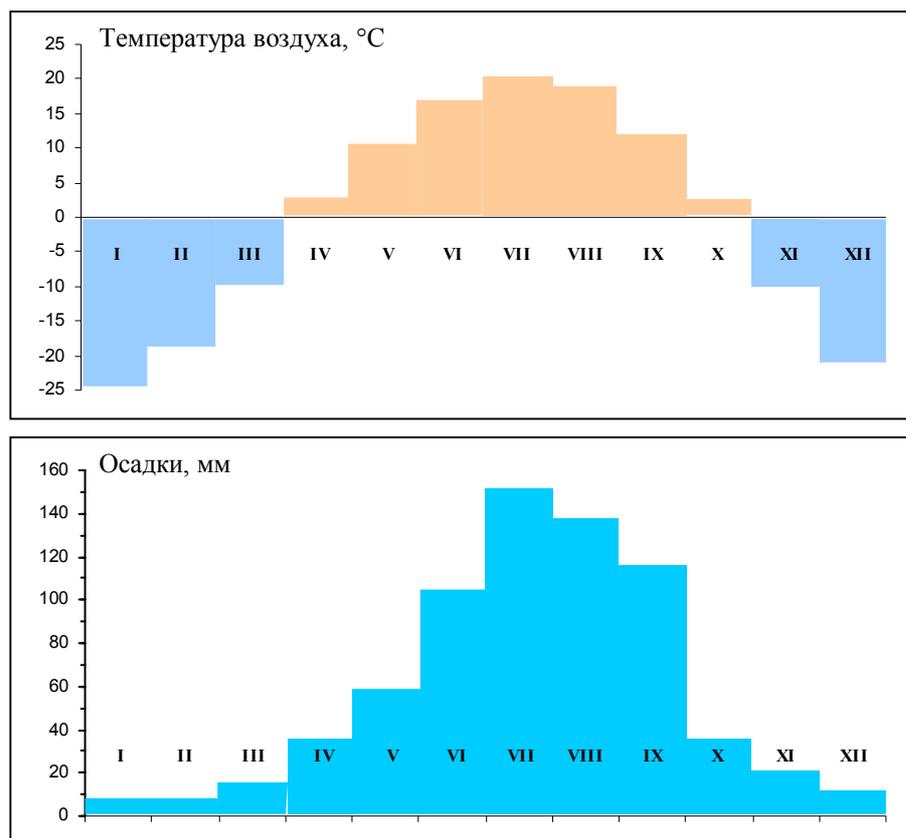


Рис. 7.25. Среднемесячные значения температуры воздуха и атмосферных осадков в районе Августовского месторождения подземных вод

Преобладающее питание реки – дождевое. Годовой ход уровня характеризуется резкими кратковременными паводочными подъёмами в тёплое время года (до 7-и паводков) и устойчивой продолжительной зимней меженью. Наивысшие уровни чаще всего наблюдаются в период муссонных дождей в июле или августе. Годовая амплитуда колебаний уровня составляет 1-2 м.

Ледовые образования в виде заберегов и ледохода (шугохода) появляются обычно в третьей декаде октября. Ледостав устанавливается в середине ноября и длится в среднем около 160 дней. Толщина льда достигает 1.2 м. Ширина русла р.Бира в критический зимний период сокращается до 40-50 м. Река вскрывается обычно в третьей декаде апреля. Весенний ледоход наблюдается ежегодно и длится 5-7 дней.

Внутригодовое распределение стока реки крайне неравномерно. В тёплый период (апрель-октябрь) проходит 90-95% годового объёма; зимний сток незначителен (5-10%). Среднемноголетние стоковые характеристики для района г. Биробиджана:

- среднегодовой расход $98 \text{ м}^3/\text{с}$,
- минимальный летний расход $69 \text{ м}^3/\text{с}$,
- минимальный зимний расход $3.9 \text{ м}^3/\text{с}$.

Минимальный 30-суточный расход зимнего периода за время работы водозабора (1979-2006 г.г.) составил 0.72-1.20 м³/с с обеспеченностью 95% и 90% соответственно.

Зимой 2005-06 г.г. фактические измеренные расходы р.Бира составили: 13 января – 4.67, 1 февраля – 1.96, 9 марта – 1.65 м³/с.

Гидрогеологические условия. Основным (продуктивным) на Августовском месторождении является грунтовый водоносный горизонт в верхнечетвертичных и современных аллювиальных отложениях (Q_{III-IV}), широко развитый в днище долины р.Бира (рис. 7.26).

Водовмещающие породы представлены русловым аллювием (галька, гравий, гравелистые пески). Иногда в верхней части присутствуют отложения пойменной фации (глинистые пески, опесчаненные глины) мощностью до 3-х метров.

В основании продуктивного аллювиального горизонта в прибортовой части долины залегают коренные вулканогенные породы мелового возраста (рис. 7.27), представленные трещиноватыми андезитами, дацитами, кварцевыми порфирами, их туфами и туфобрекчиями. Водоносная зона экзогенной трещиноватости прослеживается до глубины 30-50 м, реже до 100 м. Подземные воды хорошего качества, ультрапресные (сухой остаток 22-244 мг/дм³), слабокислые или нейтральные (рН 5.6-7.2), с общей жёсткостью 0.85-3.05 мг-экв/дм³. Однако, фильтрационные свойства трещиноватых пород невысоки: коэффициент фильтрации изменяется в диапазоне 0.16-1.6 м/сутки, удельные дебиты скважин при откачках составляют 0.1-0.7 л/с. Подземные воды зоны экзогенной трещиноватости эффузивов в ограниченных количествах эксплуатируются одиночными скважинами в черте города.

В прирусловой части долины и практически повсеместно восточнее аллювиальный водоносный горизонт подстилается отложениями миоцена (ушумунская свита N_{1uš}), выполняющими грабенообразные понижения на древнем фундаменте и представленными алевролитами, аргиллитами, глинами, часто с дресвой и щебнем, песками, галечниками, бурыми углями суммарной мощностью до 150 м. Миоценовая толща обводнена спорадически и крайне неравномерно; в пределах месторождения она может рассматриваться как слабопроницаемая.

Результаты разведки месторождения. Поисково-разведочные работы проводились С.И. Батюковым в 1967-68 г.г.; эксплуатационная разведка в связи с истечением расчётного срока эксплуатации – В.В.Кулаковым в 2006 г.



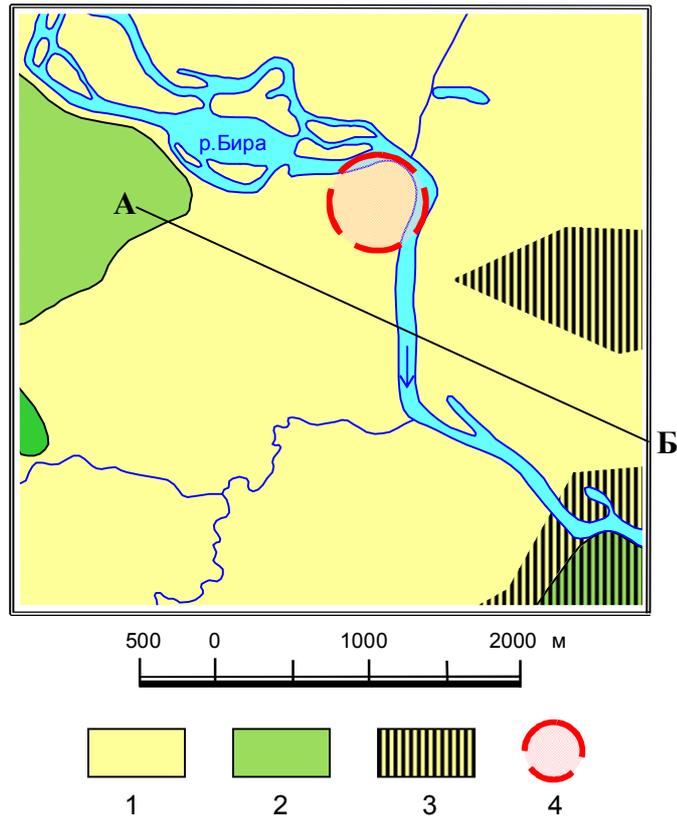


Рис. 7.26. Гидрогеологическая схема района Августовского месторождения
 1 – грунтовые воды аллювиального водоносного горизонта, 2 – грунтовые воды зоны экзогенной трещиноватости меловых эффузивов, 3 – площади городской застройки г.Биробиджана, 4 – район размещения Августовского водозабора

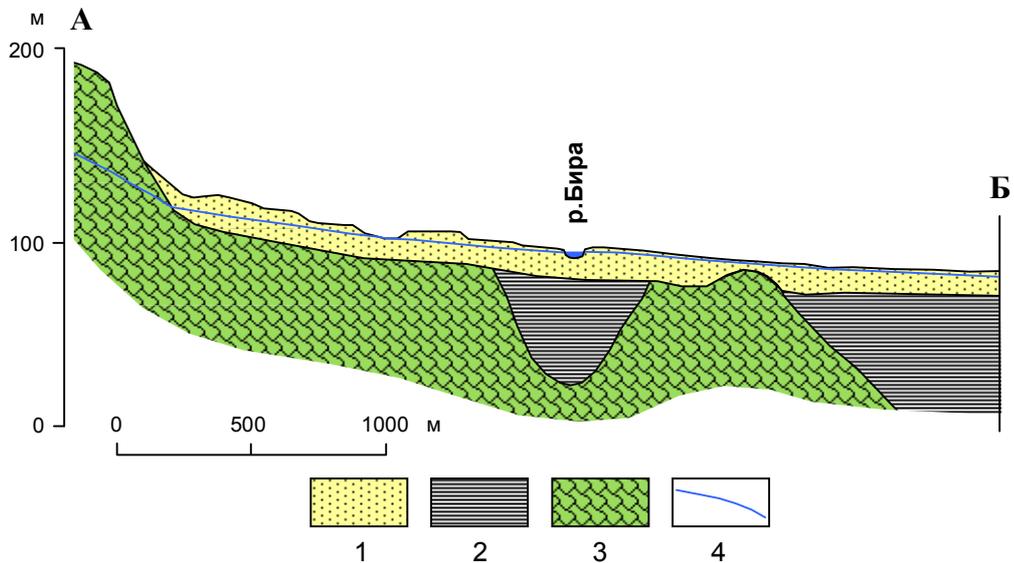


Рис. 7.27. Гидрогеологический разрез (по линии А-Б на рис. 7.26)
 1 – водоносные верхнечетвертичные и современные аллювиальные гравийно-галечниковые и песчаные отложения, 2 – слабопроницаемые миоценовые глины, аргиллиты, угли, 3 – слабоводоносные трещиноватые меловые эффузивы, 4 – уровень грунтовых вод

В составе работ пройдено более 50 гидрогеологических скважин глубиной от 10-15 м (на продуктивный аллювиальный горизонт) до 50-95 м (на отложения миоцена и меловые эффузивы). Скважины опробованы одиночными откачками продолжительностью 3-12 суток при 2-3-х ступенях дебита; проведены 6 кустовых откачек продолжительностью 9-11 суток. Режимные наблюдения за уровнями подземных и поверхностных вод проведены в течение годового цикла на скважинах и свайном гидропосту. Выполнен комплекс химического и бактериального опробования подземных и поверхностных вод.

Августовское месторождение располагается в излучине р.Бира на относительно небольшой площади порядка 1×1.5 км (рис. 7.28). Поток подземных вод формируется в северной части месторождения за счёт поглощения речных вод на верхнем, субширотном участке излучины и направлен на юго-запад, где происходит его разгрузка в русло реки на нижнем, субмеридианальном участке излучины (рис. 7.29). Перепад абсолютных отметок уреза воды в реке в пределах месторождения – около 2.5-3 м. Погонный расход потока q (по единичной ленте тока) при средней проводимости $T = 3500$ м²/сутки и градиенте напора $I \approx 0.0015$ составляет около 5 м²/сутки. Роль инфильтрационного питания, поступающего на поток в пределах месторождения, относительно невелика. При годовом слое питания 15-20% от суммы жидких атмосферных осадков (800 мм) среднегодовая интенсивность инфильтрации составит примерно $4 \cdot 10^{-4}$ м/сутки. Соответственно суммарный расход инфильтрации на ленту тока длиной 1000-1200 м не превышает 0.4-0.5 м²/сутки, то есть не более 10% от расхода потока подземных вод.

Глубина залегания уровня грунтовых вод от 0.3 до 4.0 м от поверхности земли (в среднем 1.8-2.0 м). Обводнённая мощность водоносного горизонта изменяется на площади месторождения в диапазоне 4.8-12.9 м, в среднем 7.3 м (рис. 7.30, 7.31). Уровенный режим в естественных условиях имеет отчётливо выраженный гидрологический тип. Годовая амплитуда колебания уровней грунтовых вод 1.0-1.5 м. Наиболее высокое стояние уровней приходится на муссонные паводки в августе-сентябре. Плавный спад уровней начинается с октября, а наиболее низкое стояние уровней наблюдается 15-25 марта.

Качество подземных вод аллювиального водоносного горизонта в целом высокое. Воды прозрачные, бесцветные, без вкуса и запаха, с температурой по сезонам года от +3° до +11°С. По составу воды гидрокарбонатные с переменным катионным составом (кальциевые, натриевые, железистые), весьма пресные (сухой остаток от 44 до 86.6 мг/дм³), слабокислые (рН 5.6-7.0). Общая жёсткость (карбонатная) от 0.49 до 0.95 мг-



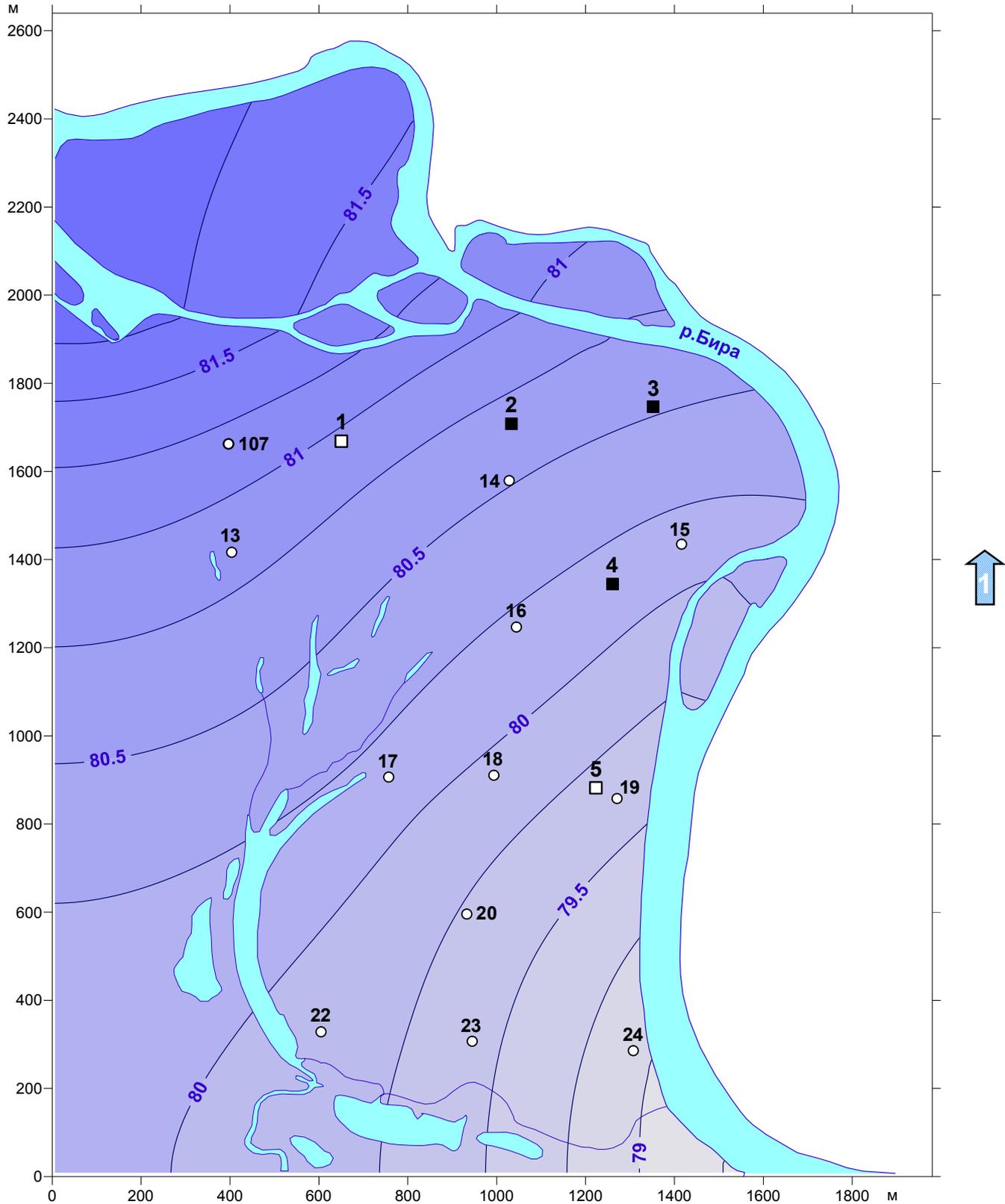


Рис. 7.29. Гидроизоги́псы потока в аллювиальном водоносном горизонте в ненарушенном состоянии (модельная реконструкция)

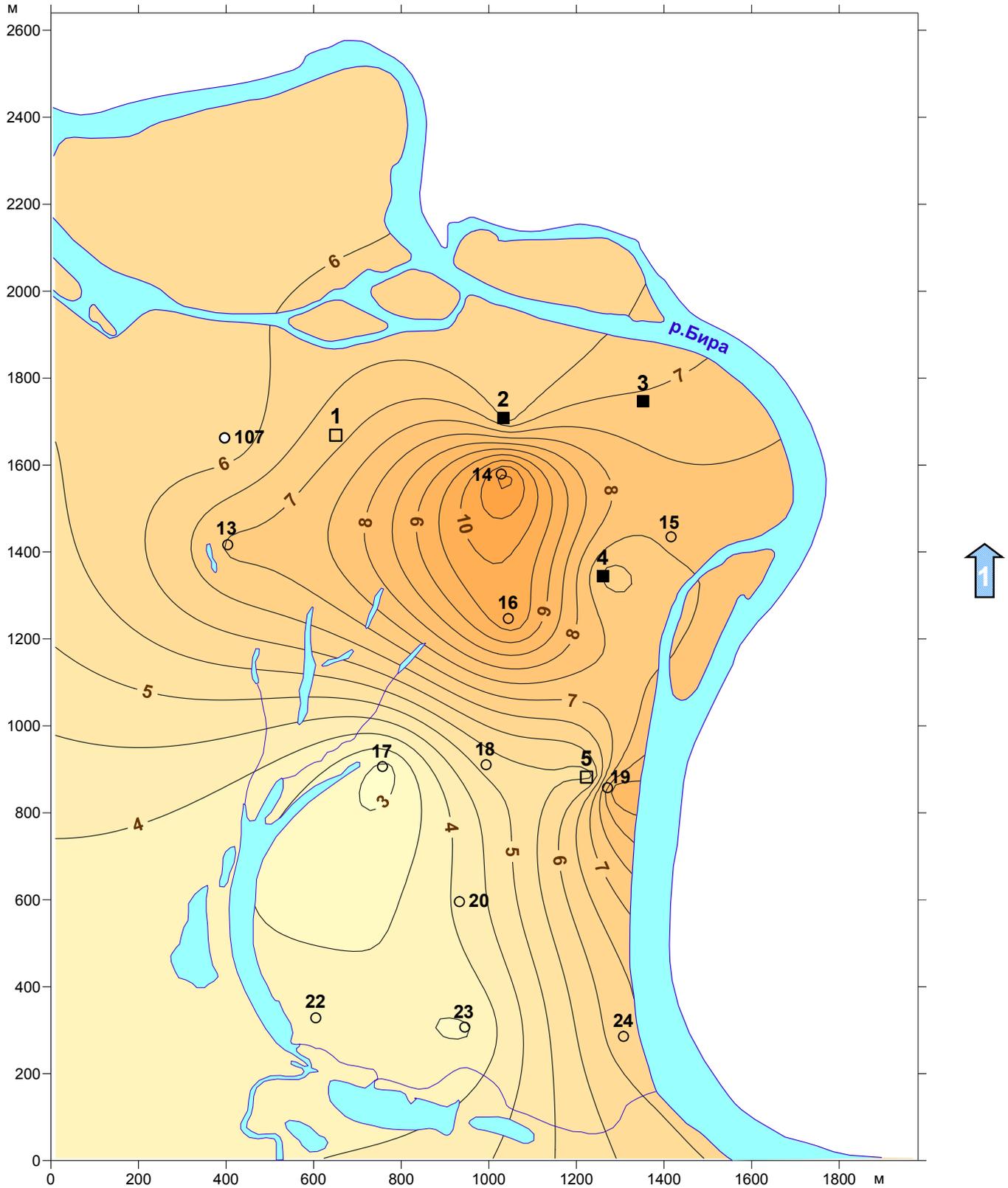


Рис. 7.30. Карта начальной мощности аллювиального водоносного горизонта

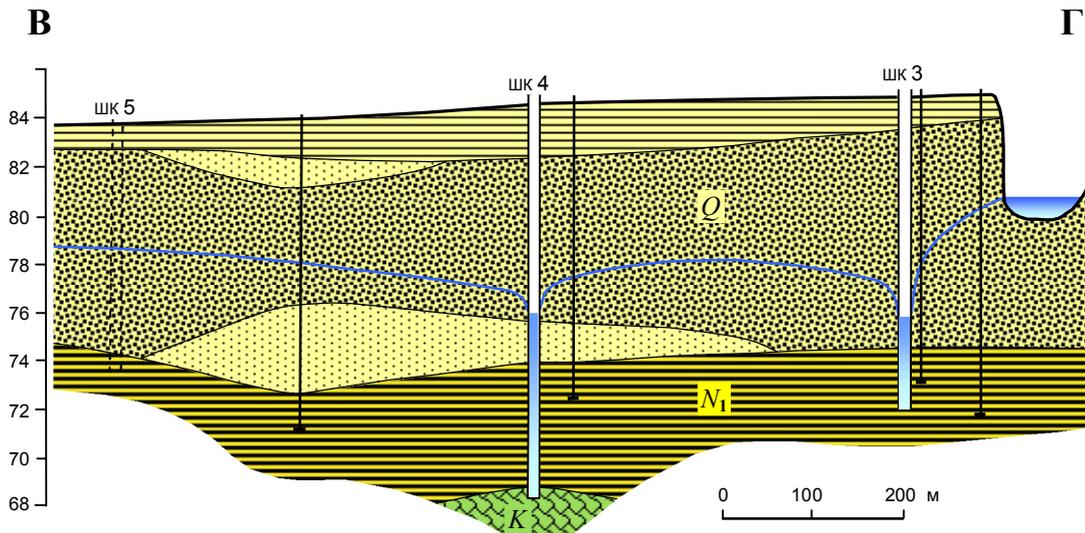


Рис. 7.31. Гидрогеологический разрез по линии В – Г (линия разреза на рис. 7.28)

Неблагоприятным показателем качества подземных вод аллювиального горизонта является повышенное содержание железа. В окрестностях г.Биробиджана содержание железа в подземных водах местами достигает $10-30 \text{ мг/дм}^3$, однако непосредственно на площади месторождения оно нигде не превышает 1 мг/дм^3 , что объясняется постоянным поступлением в пласт обогащённой кислородом речной воды, значительными скоростями фильтрации и высокой проницаемостью водовмещающих пород.

Водоносный горизонт сложен относительно однородным гравийно-галечным материалом и отличается высокими фильтрационными свойствами. По данным одиночных опытных откачек коэффициент фильтрации изменяется от 21 до 285 м/сутки, удельные дебиты составляют $1.87 - 28.57 \text{ л/с}\cdot\text{м}$. Кустовые откачки проведены на расстоянии 100-120 м от уреза реки; они показали высокие значения коэффициента фильтрации и низкие величины сопротивления ложа реки (табл. 7.9).

Таблица 7.9. Гидрогеодинамические параметры аллювиального водоносного горизонта

№ куста (рис. 7.28)	Начальная мощность, h_0 , м	Удельный дебит, q , л/с·м	Коэффициент фильтрации, K , м/сутки	Уровнепроводность, a , м ² /сутки	Водоотдача μ	Эквивалентная длина, ΔL , м
1	7.2	36.1	280	–	–	40
2	7.0	64.0	542	$6.2 \cdot 10^4$	0.051	29
3	8.0	64.4	462	$5.2 \cdot 10^4$	0.074	0
4	7.46	89.0	736	–	–	5
5	6.1	46.5	539	$9.1 \cdot 10^4$	0.036	40
107	7.31	25.6	345	$6.8 \cdot 10^4$	0.037	53



Площадное распределение начальной мощности потока, коэффициента фильтрации и интегральной величины проводимости аллювиального водоносного горизонта, полученное методом кригинга, приведено на рис. 7.30, 7.32, 7.33 соответственно. Эти карты используются для моделирования потока в естественном и нарушенном состоянии. Для вспомогательных аналитических расчётов для потока в целом принимаются осреднённые значения (без учёта экстремальных величин) коэффициента фильтрации $K = 485$ м/сутки, начальной мощности $h_0 = 7.3$ м, проводимости $T \approx 3500$ м²/сутки, сопротивления ложа р.Бира $\Delta L = 30$ м. Для аналитических расчётов по конкретным колодцам используются индивидуальные значения параметров, полученные по данным кустовых откачек в этих точках.

Обращают на себя внимание невысокие значения гравитационной водоотдачи (0.036-0.074), полученные по оценкам уровнепроводности при кустовых откачках на начальном этапе снижения уровней (до начала деформации графиков прослеживания под влиянием реки). Известно, что такие оценки обычно дают завышенные значения уровнепроводности в связи с замедленной динамикой формирования гравитационной водоотдачи. Очевидно, что гравитационная водоотдача для хорошо промытых гравийно-галечных отложений должна быть существенно выше. Расчёты по формуле П.А.Бецинского показывают, что при коэффициенте фильтрации порядка 450-500 м/сутки гравитационная водоотдача отложений должна составлять:

$$\mu = 0.117 \sqrt[3]{K} \approx 0.28,$$

а уровнепроводность не более $(1-1.5) \cdot 10^4$ м²/сутки.

Действующее водозаборное сооружение. В состав водозабора входят:

– Три шахтных колодца глубиной 14 м с внутренним диаметром 5.8 м (рис. 7.34), с расчётной производительностью 6200 м³/сутки, оборудованы насосами ЭЦВ 12-255-30. Водопрпускные окна шахтных колодцев (по 13 в каждом колодце) сооружены на глубине 10 м и имеют размер 2.2×0.8 м.

– Две водозаборные скважины (одна рабочая и одна резервная), глубиной 17 и 18 м, оборудованные насосами ЭЦВ 12-120-65; расчётная производительность каждой 2300 м³/сутки. Скважины работают периодически, в холодное время года.

Вода из шахтных колодцев и скважин подается в резервуар чистой воды, ёмкостью 3000 м³. На участке расположена насосная станция II подъёма, где установлены 4 насоса марки 1 Д 1250-63.



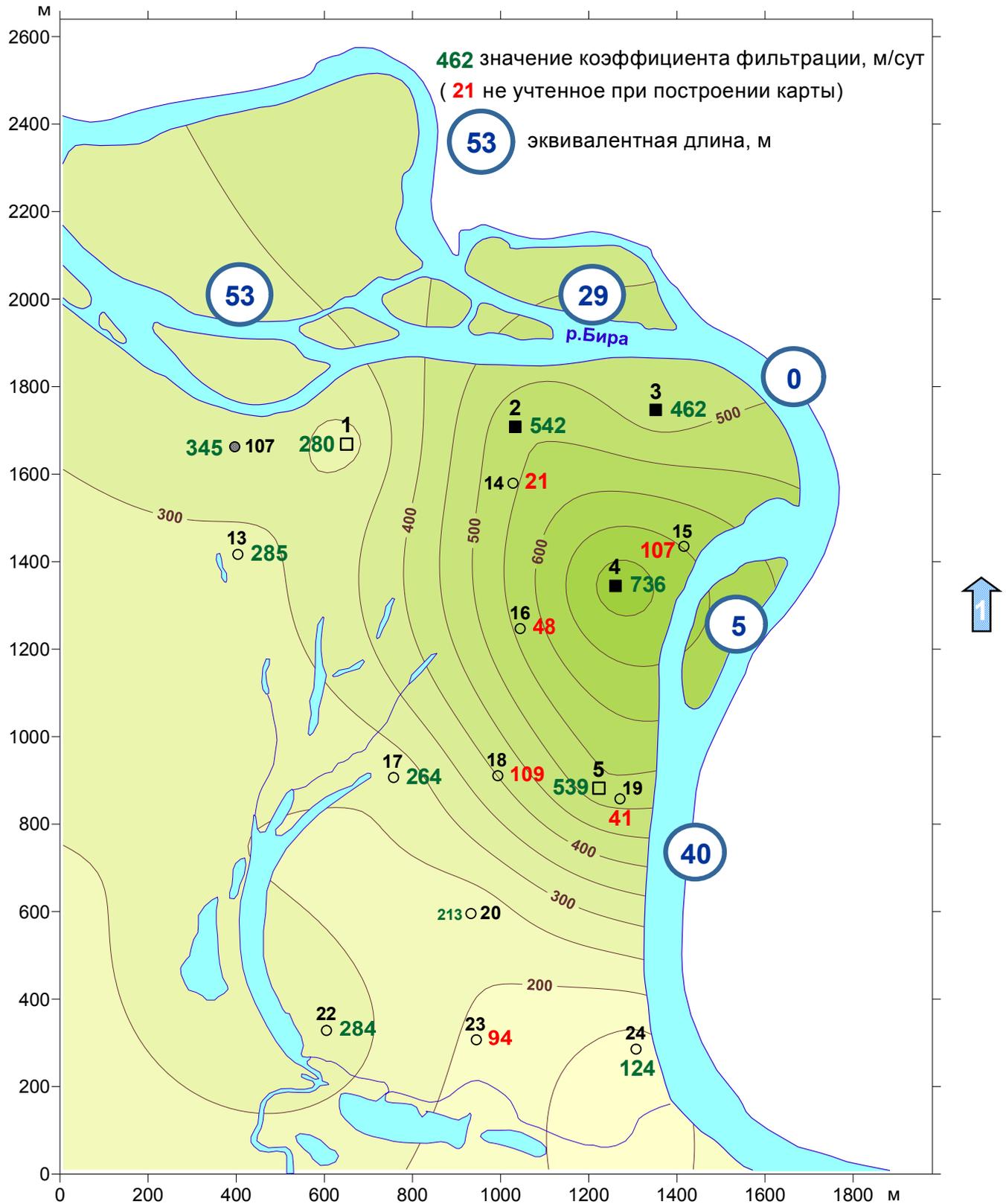


Рис. 7.32. Карта коэффициента фильтрации аллювиального водоносного горизонта и сопротивления ложа р.Бира

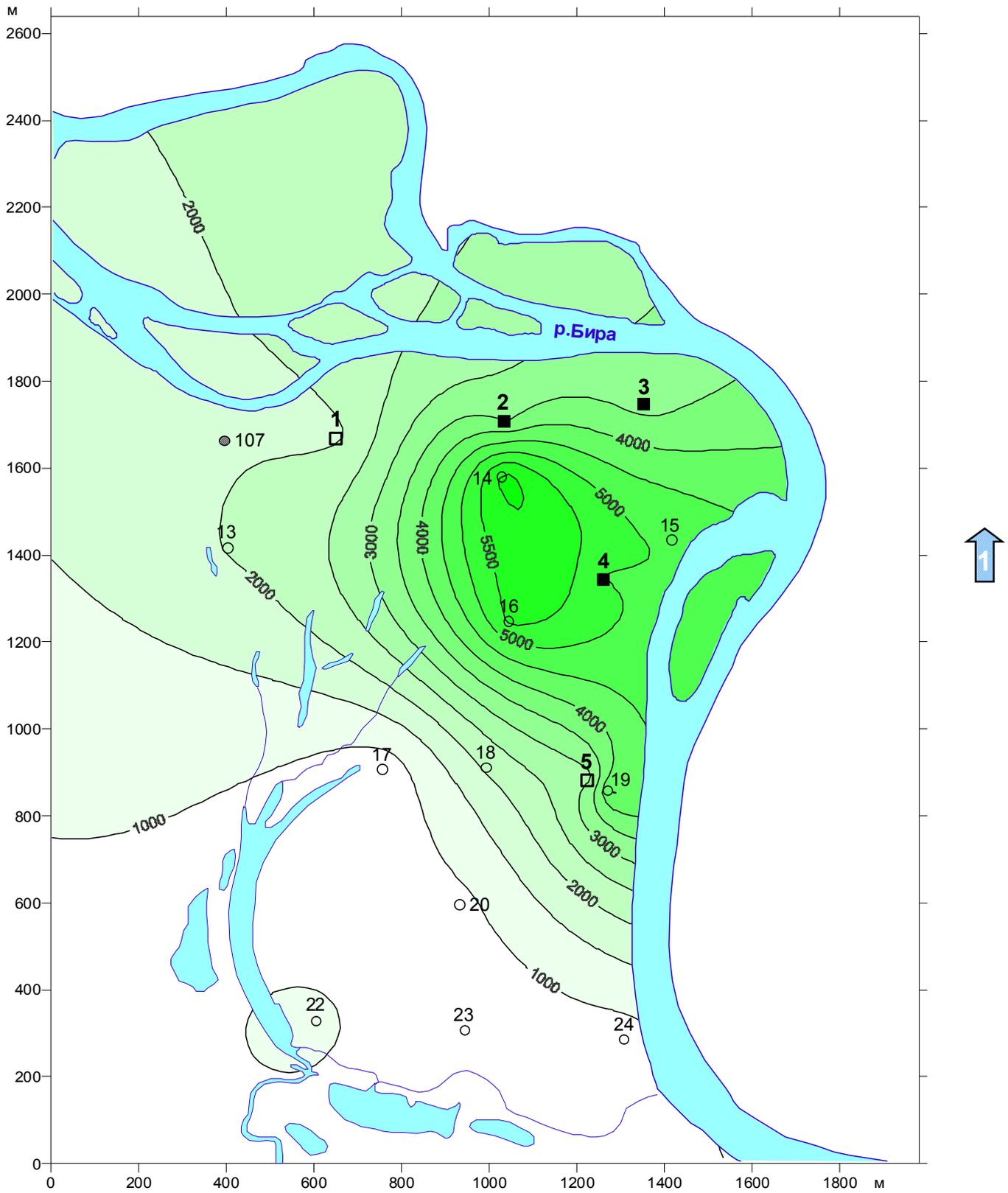


Рис. 7.33. Карта начальной проводимости аллювиального водоносного горизонта

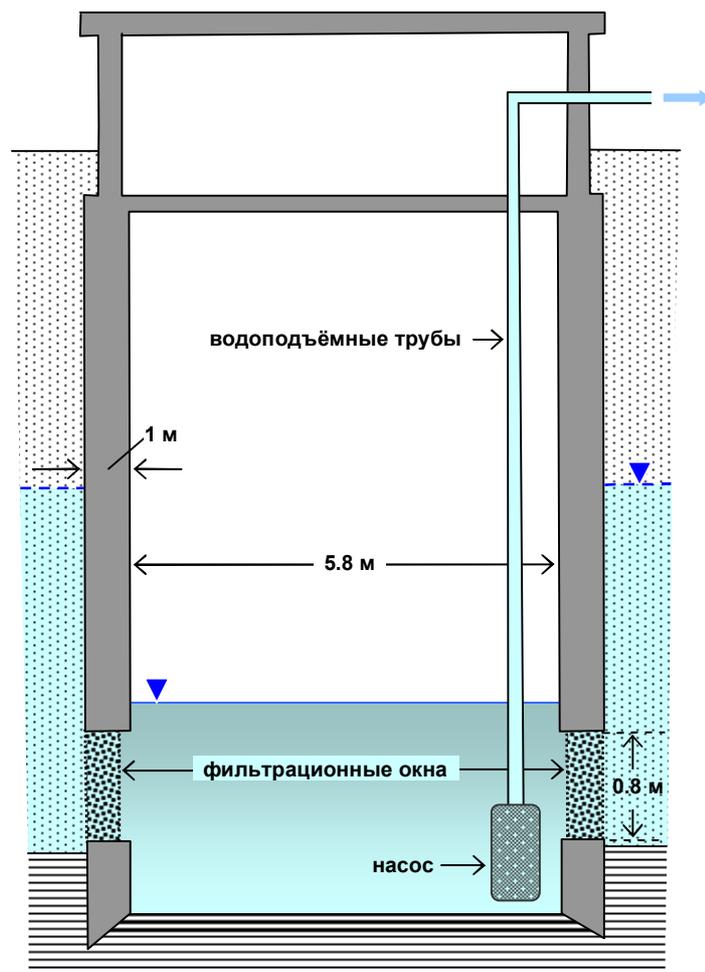
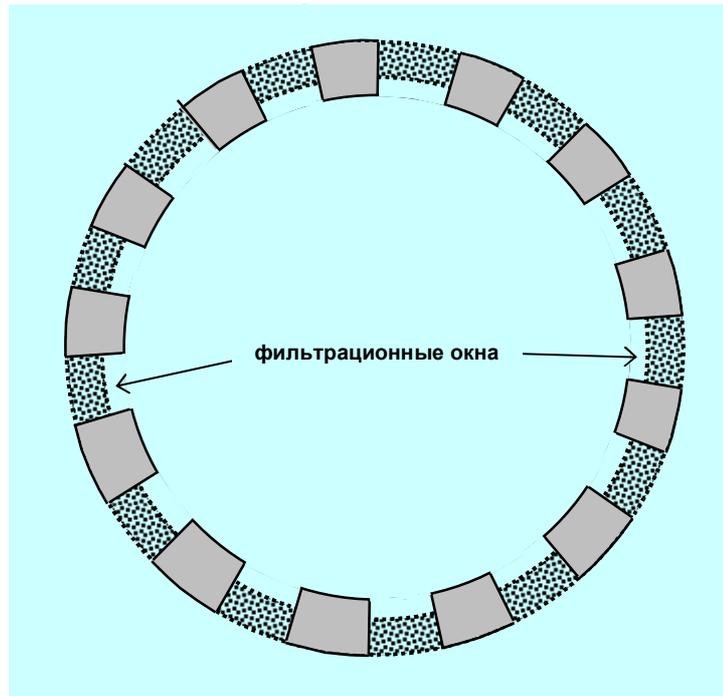


Рис. 7.34. Устройство шахтного колодца

Водозабор имеет зону санитарной охраны. Водозаборные сооружения огорожены колючей проволокой и охраняются.

Специальными ремонтно-восстановительными работами, выполненными в 2001 году с использованием водолазов, установлено неудовлетворительное гидродинамическое состояние шахтных колодцев. Многие окна практически не пропускают воду, а по отдельным окнам работает не более 5-25% их площади. Такое состояние колодцев, по-видимому, объясняется привнесом мелкозёма в пристеночную зону и в гравийно-галечниковый заполнитель фильтрационных окон в процессе строительства и длительной эксплуатации колодцев.

Анализ опыта эксплуатации Августовского водозабора. Целью эксплуатационной разведки, предпринятой после 25 лет непрерывной эксплуатации водозабора, являлась разработка рекомендаций по повышению его производительности до 40 тыс. м³/сутки. Систематические синхронные наблюдения за дебитами и уровнями шахтных колодцев проводятся на водозаборе только с 2002 г. Суммарная производительность за анализируемый период 2002-2006 г.г. составила в среднем 21 тыс. м³/сутки, в том числе колодец 2 – 5800, колодец 3 – 8300 и колодец 4 – 6900 м³/сутки.

На водозаборе осуществляется примитивная система наблюдений – ежесуточный учёт извлекаемого объёма воды и измерение положения уровней в колодцах. При этом уровенные наблюдения производятся в случайные моменты времени и не увязываются с неравномерным характером работы насосов в течение суток, что приводит к незакономерной, практически хаотической картине колебаний уровней в колодцах (рис.

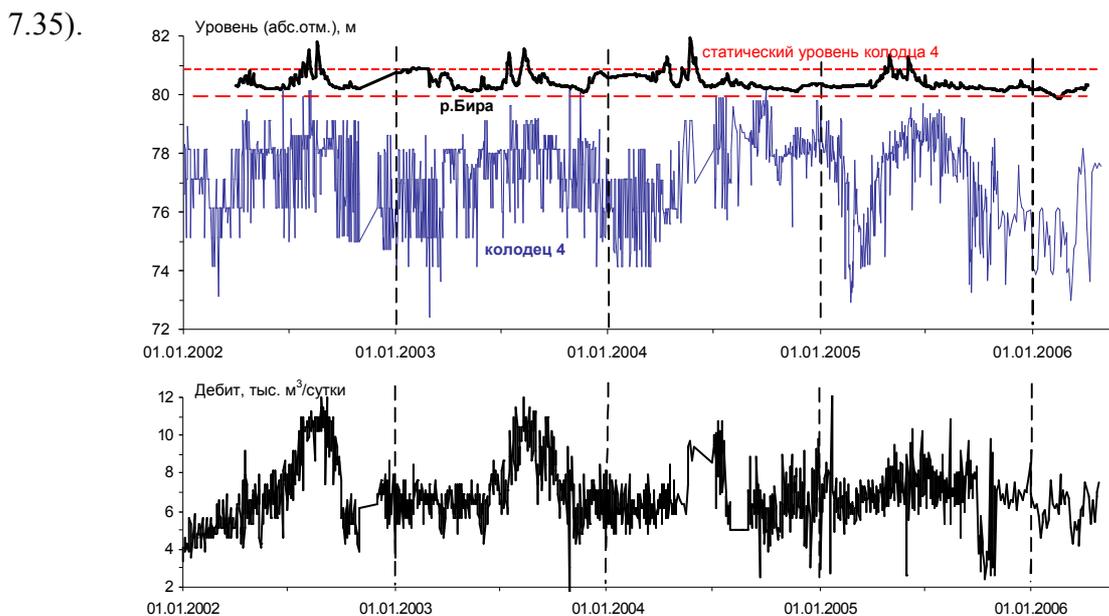


Рис. 7.35. Режим дебита и уровня в колодце 4 и уровня р.Бира (ежесуточные величины)



В такой ситуации более правильно оперировать осреднёнными среднемесячными величинами (рис. 7.36), сглаживающими случайные замеры внутри месячной выборки.

Следует подчеркнуть, что все выявленные закономерности режима уровней абсолютно идентичны для всех трёх колодцев, различаясь лишь незначительно по абсолютным величинам. Поэтому анализ опыта эксплуатации демонстрируется далее на примере одного колодца №4. Понижения уровня рассчитаны относительно среднего летнего положения уровня в точке этого колодца на период разведки месторождения (80.85 м) – другой возможности для этого нет, поскольку документация пускового периода на водозаборе отсутствует. По данным режимных наблюдений 2002-06 г.г. понижения в колодце 4 составляют от 2-2.5 м в летнее время до 4-5 м зимой, а в отдельные суровые зимы – до 6 м. При малой мощности эксплуатируемого горизонта такие понижения являются критическими и требуют тщательного анализа балансово-гидрогеодинамической обстановки для обоснования возможностей перспективного повышения водоотбора.

Генеральная тенденция поведения уровней подземных вод имеет отчётливый квазигармонический вид (рис. 7.36), который может быть вызван физически различными причинами. В первую очередь, следует исключить влияние изменчивости дебита водоотбора, который обычно повышается в летнее время. Однако, даже на уровне простой логики ясно, что эти колебания дебита не могут быть причиной наблюдаемых колебаний уровня в колодцах, так как они происходят в «противофазе» – при повышенных значениях дебита наблюдаются минимальные величины понижений.

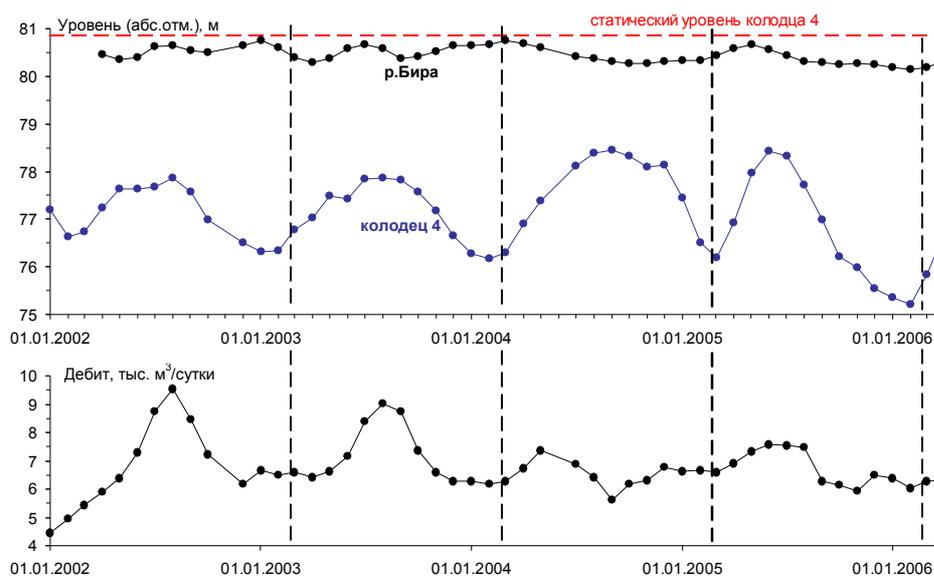


Рис. 7.36. Режим дебита и уровня в колодце 4 и уровня р.Бира (среднемесячные величины)

Тем не менее для учёта изменчивости дебита водоотбора и безнапорного характера потока данные уровенных режимных наблюдений представлены в виде удельных понижений $\varphi = S(2h_0 - S)/Q$, где S - понижение уровня, h_0 - начальная мощность потока, Q - дебит водоотбора. Как и следовало ожидать, после этого преобразования сохраняется явно выраженная гармоническая изменчивость удельных понижений в значительном диапазоне от 0.0035-0.004 до 0.008-0.009 сут/м (рис. 7.37). После отчётливого летне-осеннего минимума (15.09-01.10) наблюдается возрастание удельных понижений до максимума в январе-феврале, после чего начинается (около 15.03-15.04) весенний спад, продолжающийся в течение всего летнего периода. Гармонический анализ выявляет две преобладающих гармоники (рис. 7.37). Основная – с периодом 12 месяцев и амплитудой 0.0015 сут/м – явно свидетельствует о существовании совокупности сезонно-изменчивых режимообразующих факторов, что вполне закономерно для грунтового водоносного горизонта в условиях тесной гидрогеодинамической взаимосвязи с поверхностным водотоком. Вторая гармоника – с периодом 25 месяцев и амплитудой 0.0006 сут/м – скорее всего, связана с какой-то многолетней тенденцией, проявившейся на анализируемом 5-летнем периоде наблюдений.

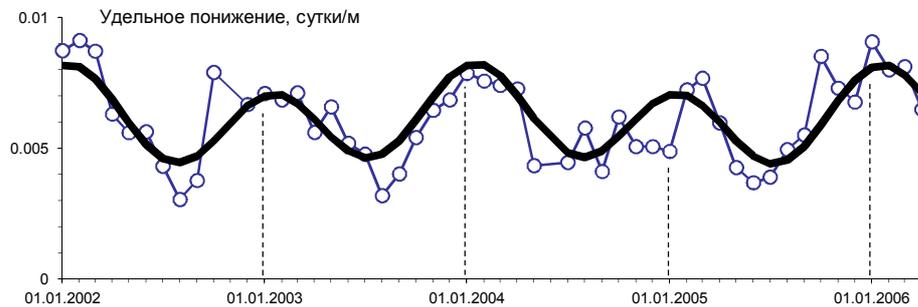


Рис. 7.37. Режим удельных понижений уровня в колодце 4 (среднемесячные значения) и гармоническая схема

Следующий шаг анализа – оценка наблюдаемых абсолютных значений понижений. Для этого используем аналитическую зависимость для понижения уровня в скважине в безнапорном водоносном горизонте у несовершенной реки:

$$S(2h_0 - S) = \frac{Q}{\pi K} \ln \frac{2(L_0 + \Delta L)}{r_c} . \quad (7.20)$$



Для колодца 4 $h_0 = 7.46$ м, $K = 736$ м/сутки, $Q = 6900$ м³/сутки, $L_0 = 140$ м (в летнее время), $\Delta L = 30$ м, $r_c = 2.9$ м. Соответственно правая часть в формуле (7.20) равна 14.216; величина S далее определяется как корень квадратного уравнения:

$$S^2 - 2h_0S + 14.216 = 0,$$
$$S = h_0 - \sqrt{h_0^2 - 14.216} = 1.02 \text{ м.}$$

Полученная величина значительно (в 2-3 раза) меньше фактически наблюдаемых понижений в летнее время. Весьма вероятной причиной этого может быть высокое гидрогеодинамическое несовершенство колодцев. Как отмечалось выше, реально работает не более 5-25% площади фильтрационных окон, а некоторые из них полностью закольматированы. Для учёта этого обстоятельства в расчётах следует использовать расчётный радиус r_c^0 вместо фактического r_c . Для колодцев оценка расчётных радиусов возможна при известном водоотборе Q по соотношению уровней в колодце H_k и в рядом расположенной ($r_H \geq h$) наблюдательной скважине H_H :

$$H_H - H_k = \frac{Q}{2\pi K} \frac{h_H + h_k}{2} \ln \frac{r_H}{r_c^0},$$

откуда (при условии горизонтальной подошвы водоносного горизонта):

$$\ln r_c^0 = \ln r_H - \frac{\pi K}{Q} (h_H^2 - h_k^2),$$

где h_H, h_k – соответственно мощность потока в сечении наблюдательной скважины и на стенке колодца.

Расчёты для колодца 4 (наблюдательная скважина № 3 на расстоянии 6.7 м от стенки колодца, 1170 замеров за 2002-06 г.г.) дают расчётный радиус 0.04 м, что почти на два порядка меньше реального физического радиуса 2.9 м. Два других колодца также имеют значительное несовершенство, хотя и в меньшей степени: колодец 2 – $r_c^0 = 0.19$ м, колодец 3 – $r_c^0 = 0.4$ м.

Пересчёт по формуле (7.20) с использованием расчётного радиуса даёт величину понижения в летнее время 2.11 м, что уже значительно ближе к реальным величинам. Однако, по-прежнему остаётся нерешённой проблема – почему в холодное время года понижения возрастают практически вдвое, до 4-5 м? Рассмотрим возможные причины.



1) Вполне очевидным является влияние гидрологического режима – зимой уровень реки снижается примерно на 1 м (рис. 7.36), соответственно понижаются и уровни подземных вод. Однако, этого всё же недостаточно.

2) Ещё одним обстоятельством, требующим анализа, является значительная трансформация контура р.Бира в зимнее время, когда расход реки резко падает; ширина реки при этом сокращается. По данным ледемерных исследований (рис. 7.28), зимой некоторые протоки в северной части месторождения полностью перемерзают, урез воды подо льдом на правом берегу отодвигается на десятки метров – в створе колодца 4 на 40 м. Для оценки гидрогеодинамического эффекта этого явления пересчитаем понижение уровня в колодце 4 при увеличенном $L_0 = 140 + 40 = 180$ м. При этом необходимо также учесть возрастание сопротивления ложа реки при сокращении её ширины. В летнее время при ширине $G = 80$ м река является «широкой» и соответственно фактор перетекания для подрусловых отложений можно принимать равным $B = \Delta L \approx 30$ м. Зимой при сокращении ширины до $G = 40$ м река становится «узкой»; эквивалентная длина соответственно увеличивается, но незначительно:

$$\Delta L = B \operatorname{cth} \bar{G} \approx 35 \text{ м.}$$

Расчёт по формуле (7.20) с этими параметрами даёт понижение уровня 2.17 м, то есть эффект зимней трансформации гидросети незначителен и не оправдывает полностью возрастание понижений в зимний период.

3) Значительной сезонной изменчивости подвержена температура подземных вод аллювиального горизонта – от +3 до +11°C. Столь широкий диапазон обусловлен, с одной стороны, неглубоким залеганием грунтовых вод (2-4 м) и с другой – высокими фильтрационными свойствами пласта, малым временем добегаания речной воды (5-10 суток) и значительными расходами привлекаемого потока речных вод, обеспечивающими интенсивный конвективный теплоперенос.

Как известно, коэффициент фильтрации является интегральным показателем, зависящим как от геометрии порового пространства пласта, так и от гидродинамических свойств фильтрующейся жидкости:

$$K = K_{\Pi} \frac{g}{\nu},$$

где K_{Π} – коэффициент проницаемости породы, ν – коэффициент кинематической вязкости жидкости.

Учитывая зависимость кинематической вязкости воды от температуры t [°C] в форме:



$$v = \frac{1.78 \cdot 10^{-6}}{(1 + 0.0337t + 0.000221t^2)},$$

получим, что в течение года v меняется в диапазоне $1.62 \cdot 10^{-6} - 1.274 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$, то есть в соотношении 1.27. Пропорционально уменьшается коэффициент фильтрации и возрастает величина понижения по формуле (7.20): $S = 2.17 \times 1.27 = 2.76 \text{ м}$, а с учётом снижения уровня реки общая величина понижения уровня (относительно летнего положения статического уровня) зимой достигает примерно 3.8 м. Это уже значительно ближе к реально наблюдаемым значениям, тем не менее приходится допускать существование ещё какого-то неучтённого сезонного фактора, приводящего к формированию понижений до 4-5 м (а в суровую зиму 2005-06 г.г. почти до 6 м – рис. 7.36).

4) Вполне жизнеспособным может быть предположение о том, что за длительный период предшествующей эксплуатации произошло возрастание сопротивления ложа реки. Ежегодно весной и в период муссонных паводков мутность речной воды резко возрастает и на участках притяжения речной воды может происходить активная кольматация донных песчано-гравийных отложений. Такие факты известны для крупных приречных водозаборов. Рассчитаем (пока без учёта температурных изменений), насколько должно возрасти сопротивление ложа реки, чтобы зимой понижение уровня составило бы 3 м, а не 2.17 м (см. выше, пункт 2). Из формулы (7.20):

$$\Delta L = 0.5 r_c^0 \exp(A) - L_0,$$

где $A = \frac{\pi K S (2h_0 - S)}{Q} = \frac{\pi \cdot 736 \cdot 3 \cdot (2 \cdot 7.46 - 3)}{6900} = 11.983$.

Получается, что сопротивление ложа должно возрасти до, казалось бы, огромной величины $\Delta L \approx 3000 \text{ м}$, то есть в 100 раз! Оценим, каким должен быть фактор перетекания B при таком значении ΔL :

$$\Delta L = B \operatorname{cth} \bar{G} \approx 3000 \text{ м}.$$

При зимней ширине реки $G = 40 \text{ м}$ получим $B = 345.6 \text{ м}$ и приведенную ширину реки $\bar{G} = 0.116$. Теперь можно рассчитать удельное фильтрационное сопротивление кольматированного слоя при таком факторе перетекания:

$$B = \sqrt{Kh \cdot f_0} \rightarrow f_0 = \frac{B^2}{Kh} \approx 22 \text{ суток}.$$

Глубина проникновения глинистых частиц m_0 при кольматации песчано-гравийно-галечных отложений составляет 0.1-0.5 м. Соответственно коэффициент фильтрации



кольматированного слоя должен находиться в диапазоне $K_0 = \frac{m_0}{f_0} = 0.005-0.02$ м/сутки.

Такие значения являются «табличными» для песчанистых глин или тяжёлых суглинков. Тем самым подтверждается, что гипотеза значительного возрастания сопротивления ложа реки за счёт кольматации в зоне формирования привлекаемого потока из реки вовсе не является фантастической и должна быть принята как рабочая.

Наконец, следует вспомнить, что все эти расчёты выполнены без учёта возможности отрыва депрессионной воронки от ложа реки. Оценить вероятность этого события можно по формуле (7.9) с учётом безнапорного характера потока:

$$Q_0 = \frac{\pi K S^0 (2h_0 - S^0)}{\exp \gamma_1 W(\gamma_1) + \exp \gamma_2 W(\gamma_2)},$$

где $\gamma_1 = 0.5 \bar{L}_0 \bar{G}$; $\gamma_2 = 2 \frac{L_0}{G}$; $\bar{L}_0 = \frac{L_0}{B}$.

Значение критического понижения уровней под рекой S^0 (см. формулу 7.7) примем около 0.5-1 м – как сумму глубины реки зимой h_p и возможную мощность кольматированного слоя m_0 .

При $B = 30$ м (по данным разведки, до пуска водозабора):

- $\gamma_1 = 0.5 \frac{180 \cdot 40}{30^2} = 4$; $\exp(4) = 54.6$; $W(4) = 3.78 \cdot 10^{-3}$
- $\gamma_2 = 2 \frac{180}{40} = 9$; $\exp(9) = 8103$; $W(9) = 1.24 \cdot 10^{-5}$
- $\exp \gamma_1 W(\gamma_1) + \exp \gamma_2 W(\gamma_2) = 0.3069$
- $\pi K S^0 (2h_0 - S^0)$ при $S^0 = 0.5$ и 1 м соответственно 16 671 и 32 186
- Q_0 при $S^0 = 0.5$ и 1 м соответственно 54 321 и 104 874 м³/сутки.

Очевидно, что такие значения критического дебита значительно больше реальных величин водоотбора. Теперь повторим расчёты, допустив возможность эксплуатационной кольматации ложа реки, то есть при $B = 345.6$ м.

- $\gamma_1 = 0.0301$; $\exp(0.0301) = 1.0306$; $W(0.0301) = 2.956$
- величина γ_2 не меняется
- $\exp \gamma_1 W(\gamma_1) + \exp \gamma_2 W(\gamma_2) = 3.146$
- $\pi K S^0 (2h_0 - S^0)$ при $S^0 = 0.5$ и 1 м соответственно 16 671 и 32 186



- Q_0 при $S^0 = 0.5$ и 1 м соответственно $5\,299$ и $10\,231$ м³/сутки.

Эти значения полностью соответствуют фактически наблюдаемым дебитам колодца 4, следовательно, возможность отрыва воронки от реки реально существует и её нужно учитывать при уточнении фильтрационной схемы месторождения.

Дальнейший анализ целесообразно проводить с использованием моделирования обратной задачи по опыту эксплуатации водозабора, так как все полученные выше выводы основаны на аналитических расчётах одиночной скважины (колодца) у несовершенной реки с прямолинейным контуром русла. Поэтому в этих расчётах не учитывается (как минимум): 1) реальная сложная конфигурация русла с протоками, 2) неоднородность фильтрационного сопротивления ложа реки на разных участках, 3) взаимовлияние действующих колодцев, 4) возможность отрыва воронки от реки с конверсией основного балансообразующего граничного условия.

В область моделирования включена только правобережная часть днища долины, поскольку по разведочным данным реку можно рассматривать как практически «широкую» ($\bar{G} > 2$). Разбивка области на блоки – квадратная, с шагом $\Delta x = \Delta y = 20$ м, всего $99 \times 132 = 13\,068$ узлов. Пространственная структура однослойная, плоско-плановая. Поток безнапорный. Задана площадная неоднородность начальной мощности (рис. 7.30) и фильтрационных свойств (рис. 7.32) аллювиального горизонта. По площади русла реки задано граничное условие 3-го рода с 5-ю зонами неоднородности по сопротивлению ложа реки (рис. 7.32); при этом в средней зоне (на излучине реки), где по разведочным данным эквивалентная длина $\Delta L = 0$, установлено граничное условие 1-го рода. Решение выполняется в напорах; сезонная изменчивость напоров учитывается моделированием двух стационарных состояний: летнего и зимнего, различающихся начальными напорами. Уровни реки для граничного условия 3-го и 1-го рода рассчитаны экстраполяцией от свай №2 (рис. 7.28) по среднему уклону водной поверхности $8.6 \cdot 10^{-4}$, т.е. 0.86 м на 1 км русла.

На трёх действующих колодцах задан среднегодовой водоотбор. Для расчёта поправок к уровням в водозаборных блоках по формуле (4.11) использованы расчётные радиусы колодцев; в частности, для колодца 4 поправка в среднем (в зависимости от остаточной мощности потока) равна $\Delta S = 1.2$ м.

Рассмотрим результаты решения нескольких вариантов обратной задачи (из большой серии реально выполненных), которые позволяют детализировать выводы из предварительных аналитических оценок. Отметим, что решения отвечают зимним условиям, то есть сезонное изменение уровня реки в решении уже учтено.



1. Базовый вариант, постановка которого полностью отвечает первичной фильтрационной схеме на основе поисково-разведочных данных. Уровень конверсии H^0 принят заведомо низко, то есть возможность отрыва воронки от реки исключена.

Полученные понижения в колодцах меньше фактически наблюдаемых; в колодце 4 понижение 2.47 м (напомним – по аналитической оценке 2.17 м). Понижения на контуре реки 0.01-0.1 м.

Сетка потока в этом варианте приведена на рис. 7.38.

2. Вариант с эксплуатационной кольматацией русловых отложений до значения $B = 345.6$ м (по всей площади русла реки в контуре месторождения). Уровень конверсии по-прежнему задан заведомо низким, отрыва нет. Вариант забракован, так как происходит полное осушение горизонта в зоне колодца 3.

3. Удельное фильтрационное сопротивление кольматированного слоя уменьшено в 2 раза – $\frac{m_0}{K_0} = 11$ суток, то есть $K_0 \approx 0.01-0.04$ м/сутки. Понижения в колодцах возрастают примерно в полтора раза; в колодце 4 – до 3.68 м. Понижения уровня под рекой составляют 1.05-1.55 м, то есть вполне возможен отрыв воронки от реки.

4. Скорректирован уровень конверсии – по всей площади русла он установлен на 1 м ниже уровня реки. Понижения в колодцах несколько возрастают (порядка 10%); в колодце 4 – до 4.06 м. Понижения уровней под рекой увеличиваются до 1.3-2.15 м.

Сетка потока в этом варианте показана на рис. 7.39. Видно, что на реке образуется обширная область отрыва воронки от ложа реки (точнее – от нижней границы кольматированного слоя в подрусловых отложениях). Поскольку расход привлечения из реки на участке отрыва ограничен предельной величиной, то воронке необходимо расширяться вверх и вниз по течению, чтобы набрать необходимый расход привлечения. Соответственно значительно возрастает и общий размер зоны захвата водозабора, что хорошо видно при сравнении рис. 7.38 и 7.39.



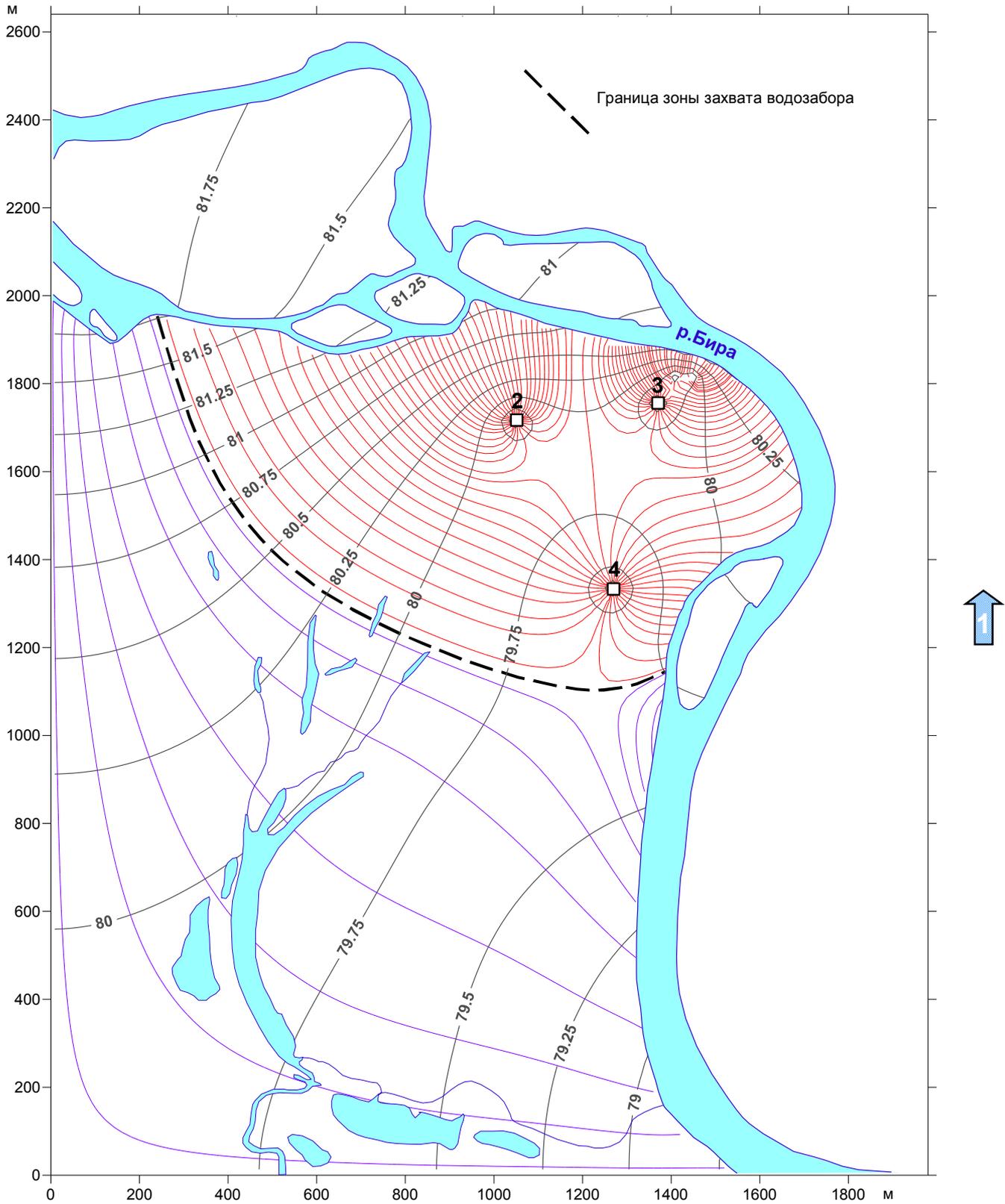


Рис. 7.38. Гидродинамическая сетка потока (вариант моделирования 1)

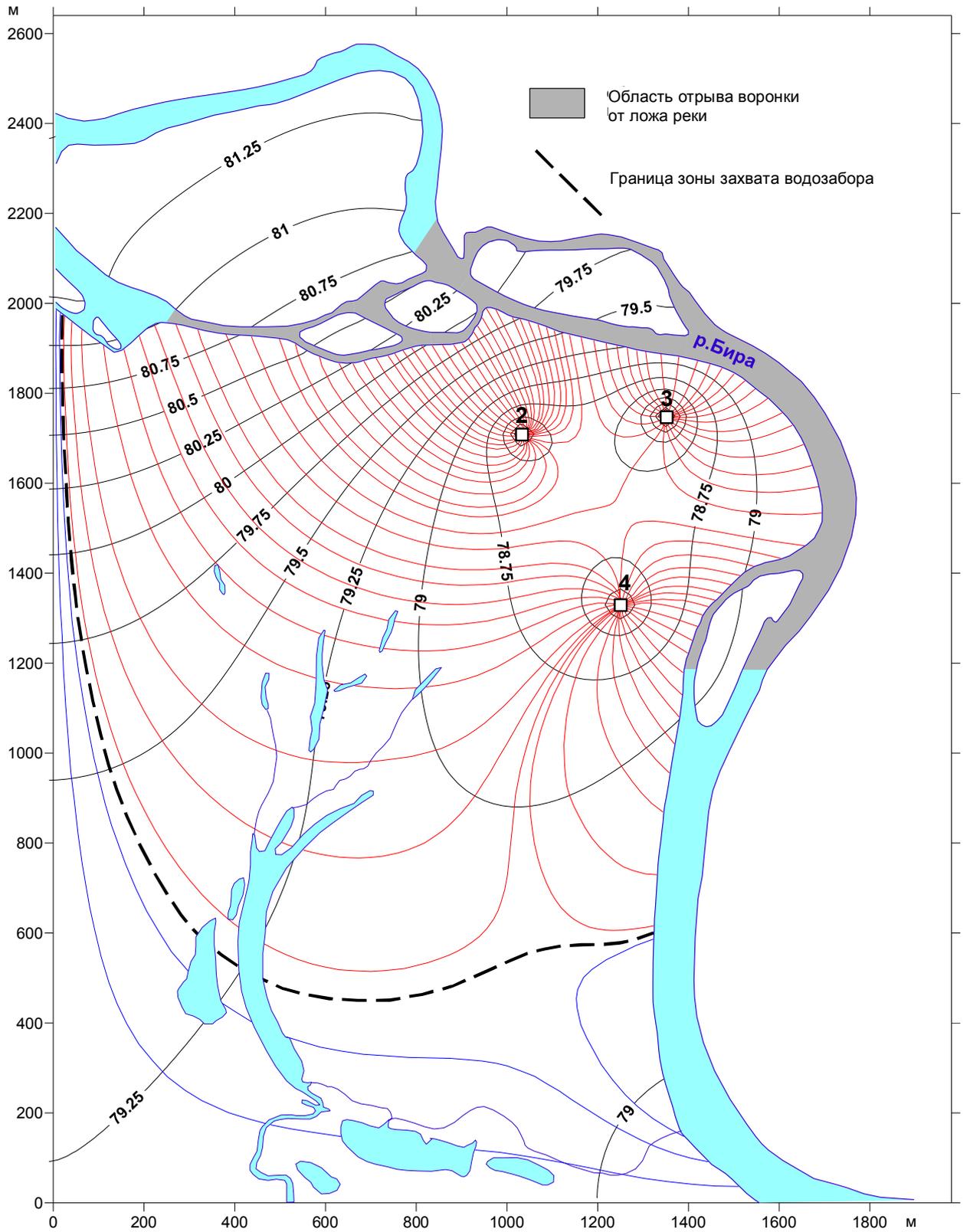


Рис. 7.39. Гидродинамическая сетка потока (вариант моделирования 4)

Таким образом, можно достаточно уверенно заключить, что гипотеза возрастания фильтрационного сопротивления подрусловых отложений р.Бира вследствие кольматации в процессе длительной эксплуатации водозабора имеет право на существование. Её подтверждение и достоверная количественная оценка требуют целенаправленных дополнительных полевых исследований. В частности, с этой гипотезой не вполне согласуется факт резкого снижения степени корреляционной связи уровней подземных и поверхностных вод при эксплуатации водозабора (рис. 7.40). При разведке месторождения в 1967-68 г.г. синхронными наблюдениями установлена тесная корреляция уровней подземных вод (по скв. 14) и реки (по гидрометрической свае №2). Однако, для периода эпигноза 2002-06 г.г. можно говорить о практически полном отсутствии такой связи как по уровням, так и по удельным понижениям. С одной стороны, это может быть следствием конверсии граничного условия на реке – известно, что при отрыве депрессионной воронки от реки связь уровней реки и подземных вод заметно осложняется: возрастают амплитуды колебания уровней подземных вод, подъём уровней подземных вод продолжается даже при спаде уровней реки и др. С другой стороны, нельзя исключать, что снижение корреляционной связи является следствием недостоверности информации по периоду эксплуатации – выше уже отмечена неопределённость системы наблюдения уровней в колодцах; кроме того, при эксплуатации не проводятся наблюдения за уровнем реки непосредственно в контуре месторождения, поэтому для корреляции использованы уровни реки, восстановленные по данным поста ГМС в 5 км ниже по течению.

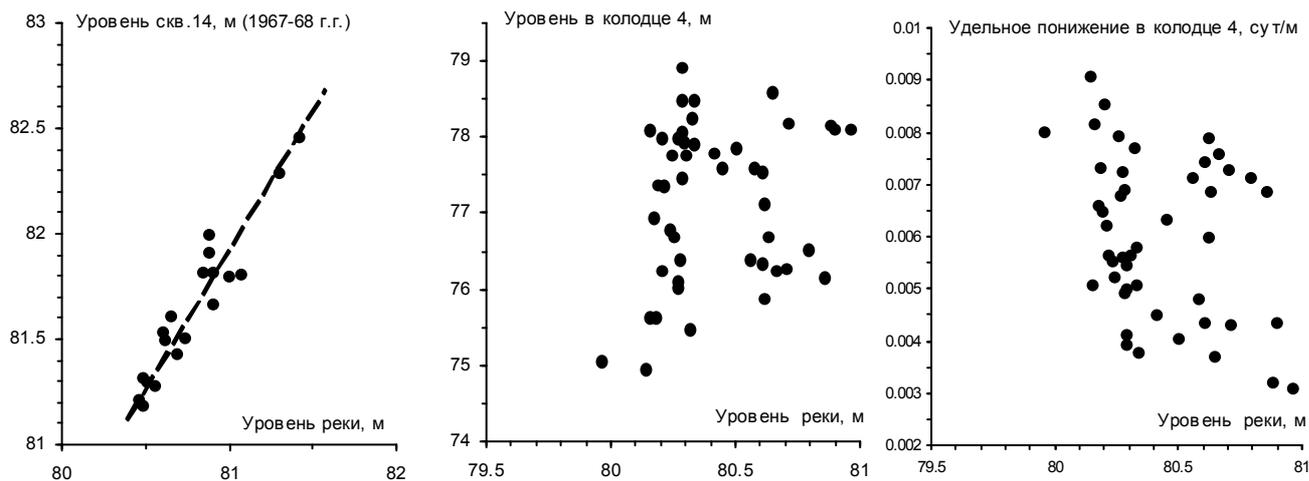


Рис. 7.40. Регрессионные зависимости уровней в скв.14, в колодце 4 и удельного понижения в колодце 4 от уровня р.Бира

Основные выводы по результатам краткого эпигнозного анализа опыта эксплуатации Августовского водозабора заключаются в следующем:

1. Сезонная изменчивость удельных понижений уровня подземных вод является следствием суммарного воздействия нескольких факторов, проявляющихся в зимние периоды: спада уровней реки, смещения уреза реки с правого берега и возрастания вязкости подземных вод. Повышенные значения удельных понижений обусловлены гидродинамическим несовершенством колодцев и возможной кольматацией донных отложений реки за период предшествующей эксплуатации водозабора.

2. Гидродинамическое состояние действующих шахтных колодцев неудовлетворительное. Для перспективного двукратного увеличения водоотбора до 40 тыс. м³/сутки в любом случае потребуются дополнительные водозахватные устройства. Необходим сравнительный технико-экономический анализ возможных вариантов:

а) капитальный ремонт действующих колодцев и дополнительное сооружение двух проектных колодцев 1 и 5 (рис. 7.28),

б) полный перевод водоотбора на скважинный вариант (возможно в комбинации с действующими колодцами).

3. Необходима организация научно обоснованного объектного мониторинга, призванного решить как минимум первоочередные задачи:

– разработка и соблюдение единообразной методики измерения производительности и уровней в шахтных колодцах,

– организация систематических профессиональных гидрологических наблюдений в контуре месторождения, учитывая, что перспективный водоотбор близко сопоставим с зимним стоком р.Бира 95%-ой обеспеченности,

– расширение по площади месторождения сети наблюдений за уровнями подземных вод, включая оборудование нескольких «заречных» скважин – в створах действующих колодцев на левом берегу реки.

4. Для решения проблемы реконструкции и расширения водозабора необходима доразведка месторождения:

– изучение примыкающей к месторождению левобережной территории,

– специальные опытно-фильтрационные работы для количественной оценки современного сопротивления ложа реки,

– изучение разреза подрусловых отложений (бурение или шурфование в русле реки на участках отсутствия поверхностного стока в зимнее время).

