

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВОДНЫХ РЕСУРСОВ, ЭКОНОМИЧЕСКИЕ И ПРАВОВЫЕ АСПЕКТЫ

УДК 556.3:628.112

### ПОВЫШЕНИЕ ВОДОБЕСПЕЧЕННОСТИ г. ВЛАДИВОСТОКА ЗА СЧЕТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПОДЗЕМНЫХ ВОД В МАЛОВОДНЫЕ ПЕРИОДЫ ПРИ ФОРСИРОВАННОМ ВОДООТБОРЕ

© 2012 г. Б. В. Боровский, Н. С. Козак, А. Г. Черняк

Гидрогеологическая и геоэкологическая компания ЗАО «ГИДЭК»

105203 Москва, ул. 15-я Парковая, 10 А

E-mail: info@hydec.ru

Поступила в редакцию 27.04.2010 г.

Форсированный режим эксплуатации подземных вод — один из эффективных способов повышения надежности водообеспечения крупных городов, использующих для водоснабжения совместно поверхностные и подземные воды и страдающих от их дефицита в периодически повторяющиеся маловодные годы. Для решения проблемы водоснабжения г. Владивостока проектируется использовать подземные воды Раздольненского участка Пушкинского месторождения подземных вод. Обоснована возможность покрытия дефицита воды за счет изменения режима работы водозабора. Общая величина балансовых запасов, разведанных в 1983 г., составляет 124.5 тыс. м<sup>3</sup>/сут. Методом математического моделирования обоснована возможность периодического форсированного режима работы водозабора с производительностью 250 тыс. м<sup>3</sup>/сут и последующим ее снижением до 60 тыс. м<sup>3</sup>/сут.

*Ключевые слова:* подземные воды, водоснабжение, водоотбор, форсированный режим работы водозабора.

Водоснабжение большинства городов России основывается на совместном использовании подземных и поверхностных вод. В критические маловодные периоды низкой обеспеченности эксплуатация поверхностных вод зачастую становится невозможной. Между тем подземные воды, как правило, обладают большей регулирующей способностью и менее подвержены влиянию изменчивости климата, что позволяет активнее использовать их для покрытия дефицита водообеспечения.

Вопросы комбинированного использования поверхностных и подземных вод рассматривались на протяжении многих лет. Они крайне актуальны в настоящее время [2, 6]. Доля подземных источников в водоснабжении крупных и средних городов различна: в одних случаях — это практически постоянная величина, в других (когда в маловодные годы поверхностные источники не могут покрыть полную потребность в воде) она увеличивается [3, 9]. Достигается это, преимущественно, вовлечением в эксплуатацию дополнительных водозаборных скважин на резервных участках, хотя более эффективны интенсификация и оптимизация водоотбора на действующих водозаборах.

Увеличение отбора подземных вод возможно в двух случаях: когда расчетный водоотбор значительно меньше величины обеспеченности и есть возможность повысить коэффициент использо-

вания ресурсов подземных вод; когда имеются большая регулирующая емкость и возможность ее сработки с последующим восполнением в многоводные периоды.

Планируемая схема водоснабжения г. Владивостока отвечает всем вышеперечисленным условиям.

В настоящее время водоснабжение г. Владивостока осуществляется из поверхностных источников — водохранилищ на реках Артемовке и Богатой, Пионерского и подруслового водозаборов р. Шкотовки. Суммарная современная потребность в воде городов Владивостока и Артема, а также прилегающих к ним населенных пунктов составляет 450 тыс. м<sup>3</sup>/сут, из них 370 тыс. идет на нужды хозяйственно-питьевого водоснабжения. В ближайшие годы она возрастет до 570 тыс. м<sup>3</sup>/сут, из них ~400 тыс. придется на г. Владивосток. Современная потребность в воде г. Владивостока обеспечивается в основном Артемовским водохранилищем. Подземные воды в балансе водопотребления в настоящее время отсутствуют.

Емкость водохранилищ невелика, поэтому регулярное восполнение их сработанных запасов возможно только в периоды выпадения обильных атмосферных осадков (как правило, во время тайфунов). В маловодные годы, при отсутствии тайфунов и соответственном уменьшении стока рек запасы воды в водохранилищах не восполняются в необходимом объеме. Тогда Владивосток и при-

Таблица 1. Потребность в воде в населенных пунктах и источники ее покрытия

Населенный пункт		Источник покрытия		
название	потребность в воде, тыс. м <sup>3</sup> /сут	источник	производительность, тыс. м <sup>3</sup> /сут	
			год нормальной водности	маловодный период
пгт Раздольненское	20.00	Водозабор из подземных вод Раздольненского участка	125.00	250.00
с. Вольнонадеждинское	31.00	Штыковский водозабор	35.00	10.00
г. Артем	35.00	Артемовское водохранилище	300.00	252.00
г. Владивосток	396.09	Водозабор на р. Шкотовке	56.25	10.00
		Водоохранилище на р. Богатой	50.00	28.00
Безвозвратные потери из водопровода	84.47	Водоохранилище на р. Пионерской	30.00	12000.00
Итого	566.56		596.25	562.00
Итого без подземных источников			471.25	312.00

легающие к нему населенные пункты испытывают острый дефицит в воде, что влечет за собой проведение чрезвычайных мероприятий с введением ограничений подачи воды потребителю.

Такие критические ситуации прослеживаются в течение последних 40 лет с периодичностью раз в 4–10 лет (1967–1968, 1977–1978, 1982–1983, 1987–1988, 1998–1999 и 2003–2004 гг.). Потребность в воде и источники ее покрытия, рассчитанные на 2012 г. проектной организацией РОСЭКОСТРОЙ, представлены в табл. 1, из которой видно, что дефицит воды без включения в баланс подземных вод в год нормальной водности составляет 95 тыс. м<sup>3</sup>/сут, а в маловодный год – превышает 250 тыс. м<sup>3</sup>/сут и требует введения в баланс водопотребления новых источников покрытия потребности в воде.

Нормализация водоснабжения населения в маловодные годы может быть эффективно обеспечена за счет использования в балансе водоподдачи подземных вод, не зависящих от климата Приморья. Решение этого вопроса предусмотрено за счет Пушкинского месторождения подземных вод (МПВ).

Поисковые работы были сосредоточены на площади Пушкинской кайнозойской депрессии, за пределами г. Владивостока, поскольку сама территория полуострова, где расположен город, крайне бедна подземными водами. Пушкинское МПВ было открыто и разведано в 1978–1983 гг., его запасы утверждены в ГКЗ в 1983 г. [1,11].

Месторождение состоит из двух автономных участков – Раздольненского и Борисовского (рис. 1). Раздольненский участок первоочередного освоения площадью ~240 км<sup>2</sup> расположен в 60 км к северу от г. Владивостока в Надеждинском районе Приморского края, в долине р. Раздольной, между с. Тереховкой (на севере) и пос. Тихим (на юге).

Борисовский участок расположен дальше, в 90–100 км от основного водопотребителя – г. Владивостока, поэтому основные усилия были направлены на освоение и строительство водозабора на Раздольненском участке.

Для района типично резкое различие зимних и летних температур. Среднемесячные величины атмосферных осадков – 630 мм. Основная их часть связана с выходом на Приморье тайфунов, 90% которых имеет место с июля по сентябрь. При этом дожди приобретают характер ливней продолжительностью от 5 до 24 ч и могут приносить до 50% годовой суммы осадков. В среднем за год проходит 2–3 тайфуна, однако раз в 5–8 лет отмечается их отсутствие либо небольшая мощность. В маловодные годы (95%-ной обеспеченности) сумма осадков за год составляет 427 мм. Такой характер распределения осадков в годовом и многолетнем разрезе существенно влияет на условия и величину питания подземных вод.

Раздольненский участок включает в себя часть долины р. Раздольной и долины ее правых притоков – рек Кедровки, Клепачной, Грязнушки и Первой Речки, формирующихся на базальтовом плато и стекающих с него (рис. 2). Абсолютные

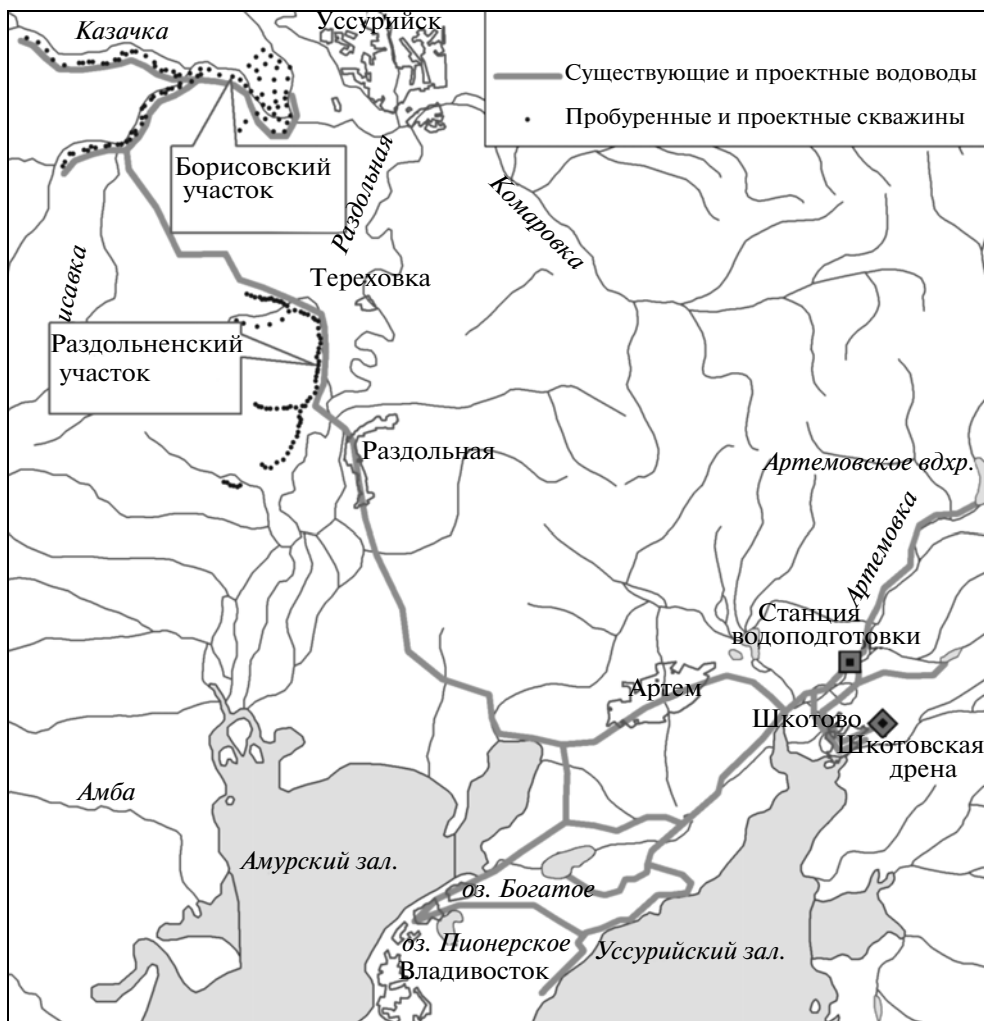


Рис. 1. Карта-схема расположения участков Пушкинского МПВ и водоснабжения г. Владивостока.

отметки поверхности плато в пределах участка составляют 150–200 м, пойменной части долины р. Раздольной – 5–8 м. В хозяйственном отношении территория освоена слабо, лишь местами она используется под естественные сенокосные угодья.

Главная водная артерия района – р. Раздольная. В питании Раздольной, как и всех ее притоков, преобладают атмосферные осадки (рис. 2). Все малые реки на территории Раздольненского участка – правые притоки р. Раздольной, они берут начало в пределах базальтового плато и текут в восточном направлении, впадая в Раздольную. Длина рек – первые десятки километров, ширина в верхнем течении – 5–15 м, в нижнем – до 25 м. Русла рек сложены галечно-валунными отложениями, в нижнем течении они песчано-галечные или песчано-илистые, что определяет благоприятные условия взаимосвязи поверхностных и

подземных вод и восполнения последних, особенно в период ливневых осадков.

Поскольку перечисленные притоки р. Раздольной – основные источники восполнения подземных вод, их режим имеет существенное значение при обосновании величины водоотбора и регламента эксплуатации.

Это реки преимущественно дождевого питания, по внутригодовому водному режиму – дальневосточного типа с половодьем за счет обильных дождей в теплую часть года. Особенность такого режима – его крайняя неравномерность, поскольку в теплый период (IV–XI) иногда проходит до 98% объема годового стока. Максимальный расход воды летних дождевых паводков может в 20 раз превышать средний годовой расход. За теплый период года по рекам, как правило, проходит 6–7 паводков со средней продолжительностью наибольших от 11 до 23 сут. Между паводками наблюдаются периоды низких уров-

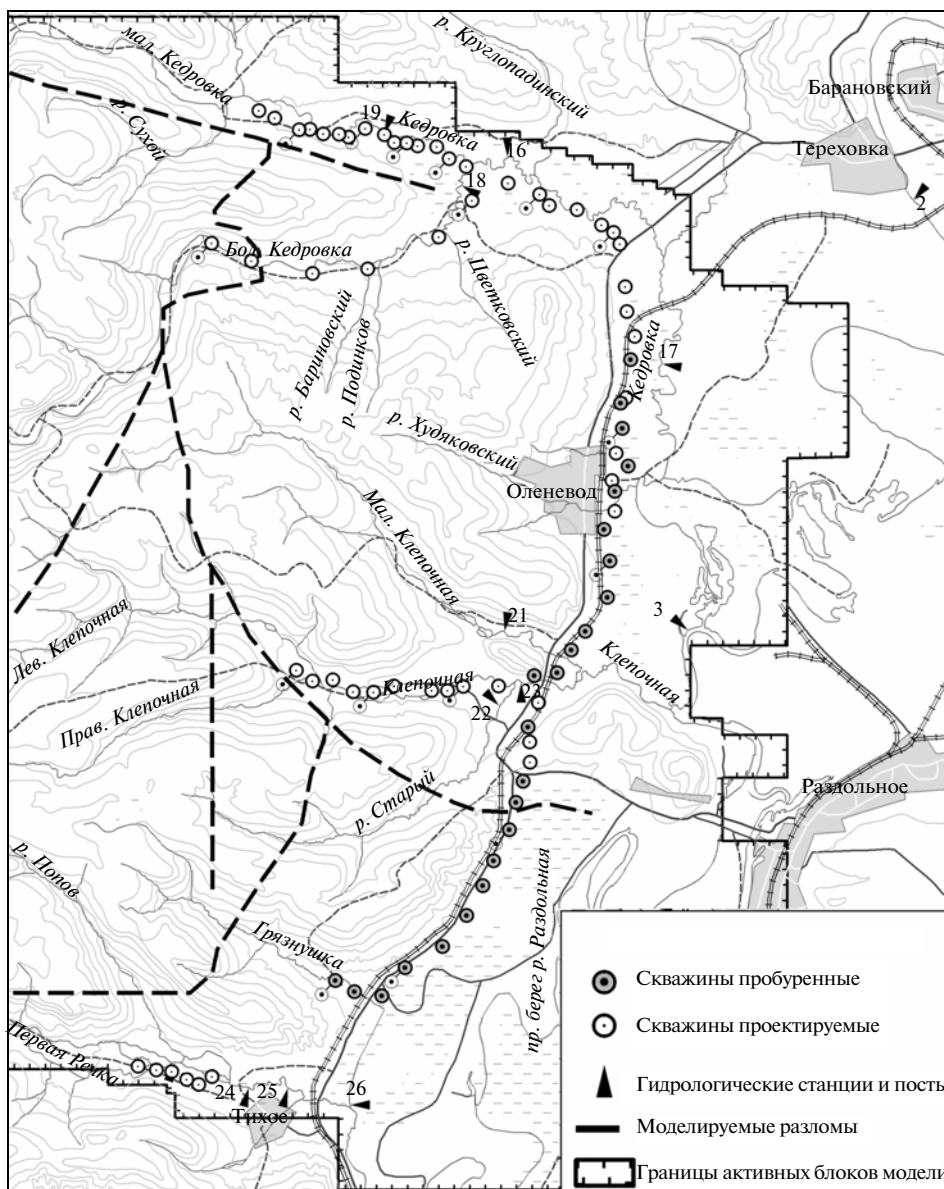


Рис. 2. Карта-схема Раздольненского участка Пушкинского МПВ.

ней продолжительностью 5–15 дней (летняя межень). В засушливые годы периоды низких уровней длятся ~1.5 мес. Весеннее половодье выражено слабо.

Сток талых вод – 10%, зимний сток ~2%. Внутригодовое распределение стока рек Кедровки, Клепачной, Грязнушки характеризуется тем, что в маловодные годы они перемерзают на 2–3 мес., а талые воды в марте обычно идут поверх льда. В то же время для этих рек характерен сравнительно малый сток в период осенних месяцев, что объясняется быстрым стеканием дождевых вод с их водосборных площадей.

Пушкинское МПВ приурочено к кайнозойской депрессии, выполненной мощной толщей

песчано-гравийно-галечных пород кайнозоя, переслаивающихся прослоями и линзами суглинков и глин. Продуктивной на подземные воды является ее верхняя часть мощностью 100–250 м в отложениях усть-давыдовской ( $N_1^{1-2ud}$ ) и усть-суйфунской ( $N_2s-N_1^{3us}$ ) свит миоцена (рис. 3).

Продуктивный водоносный горизонт распространен от Кедровки на севере до Первой Речки на юге и занимает центральную и западную части участка. Водовмещающие породы представлены гравийно-галечными отложениями, мощность которых изменяется от 10 м на востоке участка в долине р. Раздольной до 200 м на западе в долинах Большой Кедровки и Малой Кедровки.

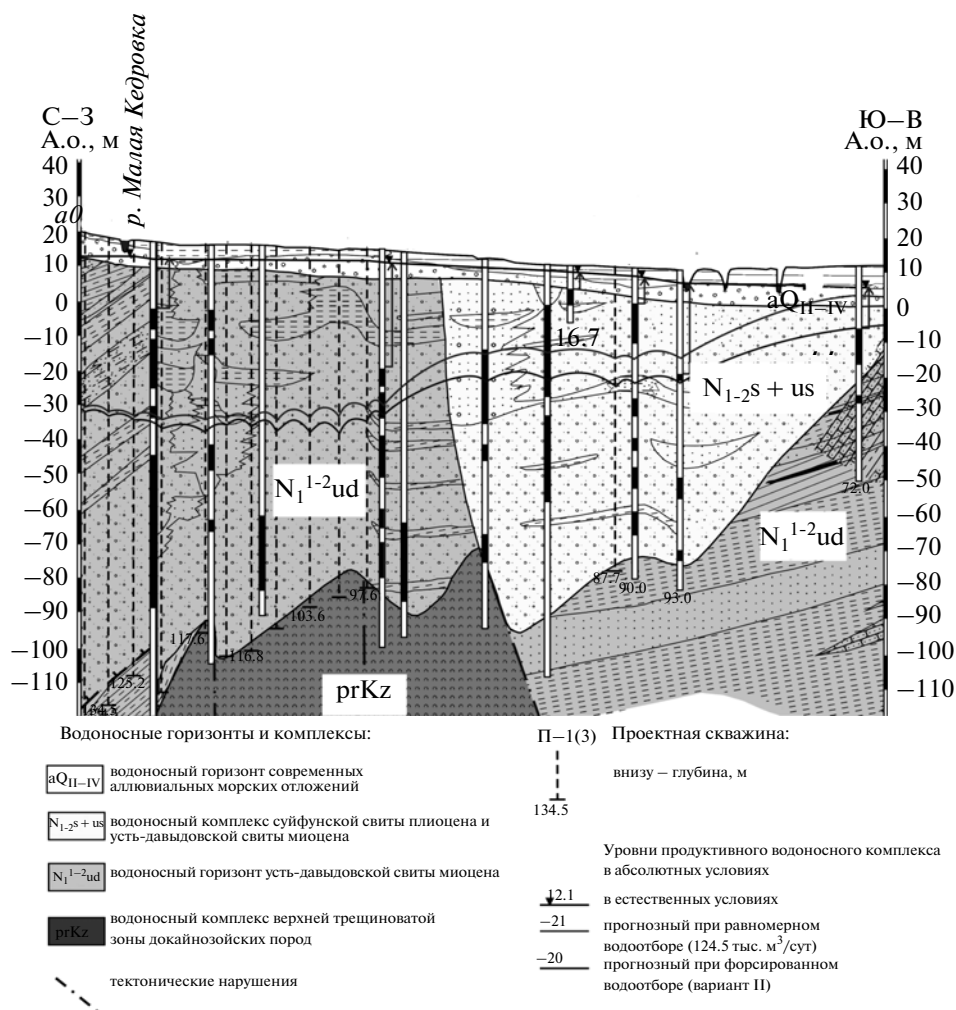


Рис. 3. Гидрогеологический разрез Раздольненского участка МПВ (р. Малая Кедровка).

В пределах усть-суйфунского горизонта выделяются хорошо промытые зоны — в долинах рек Кедровки, Клепочной, правобережной части долины р. Раздольной, между этими реками, где водопроводимость достигает 600–800 м<sup>2</sup>/сут и возможно заложение высокодебитных водозаборных скважин. В долинах Первой Речки, Грязнушки и вдоль восточной границы распространения горизонта водопроводимость — 300–400, местами до 100 м<sup>2</sup>/сут.

По химическому составу воды миоценовых отложений усть-суйфунской свиты, как и остальных водоносных горизонтов, развитых на площади, — гидрокарбонатные, смешанные по катионам, с минерализацией до 0.3 г/дм<sup>3</sup>. Качество подземных вод продуктивного водоносного горизонта по всем показателям в целом соответствует нормативным требованиям. Выше предельно-допустимых значений отмечаются только концентрации железа, марганца и кремния. Территория Раздольненского участка находится в пределах регионально выраженной гидрогеохимической

провинции железо-, марганец-, кремнийсодержащих подземных вод, и формирование повышенных концентраций этих элементов в подземных водах происходит в результате природных геохимических процессов [7].

Питание горизонт получает в основном за счет атмосферных осадков, поверхностных вод и перетекания из четвертичного горизонта; разгрузка происходит в поймы и русла рек, многочисленные старичные озера и вдоль тылового шва пойменных и надпойменных террас, создавая заболоченные участки.

На большей части площади горизонт залегает вторым от поверхности: в долинах рек он перекрыт аллювиальными и аллювиально-морскими отложениями мощностью 5–25 м, на водораздельном плато — покровными базальтами. Плато состоит из серии потоков, между которыми развиты коры выветривания и прослой алевролитов. Водообильность базальтов незначительна, а в местах, где они разбиты вертикальными трещинами до подошвы, а также в останцах на северо-восто-

ке и юго-востоке участка они полностью сдrenированы, являясь лишь проводниками атмосферных осадков. В долинах рек, где покровные базальты полностью прорезаны реками, продуктивный усть-суйфунский водоносный горизонт выходит на поверхность.

Водоносный горизонт современных аллювиально-морских отложений ( $amQ_{IV}$ ) распространен в пределах долины р. Раздольной. Горизонт, как правило, имеет трехслойное строение, где верхняя часть представлена песками и супесями, средняя – илами и илистыми песками, нижняя – гравийно-галечными отложениями. Там, где нижняя пачка горизонта залегает на усть-суйфунских отложениях, оба подразделения образуют единую гидравлическую систему и рассматриваются как единый водоносный горизонт.

Водоносный горизонт четвертичных аллювиальных отложений представлен современными и средне-верхнечетвертичными аллювиальными отложениями. Горизонт распространен в северной части долины р. Раздольной и в долинах малых рек. Водовмещающие породы представлены гравийно-галечными отложениями с отдельными валунами, прослоями песков и глин. Водообильность горизонта невысокая, а характер его взаимосвязи с нижележащим усть-суйфунским горизонтом зависит от состава кровли последнего. В средних и нижних течениях рек кровля усть-суйфунского горизонта представлена галечниками, разделяющий слой отсутствует и оба горизонта представляют собой единую гидравлическую систему. Выше по течению кровля усть-суйфунского горизонта представлена глинами и алевролитами мощностью от 3 до 20 м и более. Здесь взаимосвязь горизонтов затруднена. В верховьях рек условия взаимосвязи горизонтов зависят в большей степени от их гипсометрического положения. В долинах рек Клепачной, Кедровки, Первой Речки уровни усть-суйфунского горизонта залегают ниже подошвы аллювия, т.е. существует гидравлический разрыв между горизонтами и их взаимосвязь осуществляется в режиме дождевания.

Опытными откачками установлена тесная гидравлическая связь усть-суйфунского водоносного горизонта с четвертичным аллювиальным, а последнего – с реками, доказана возможность восполнения эксплуатационных запасов подземных вод за счет привлечения поверхностного стока.

Усть-суйфунский водоносный горизонт связан и с подстилающим его усть-давыдовским горизонтом, но рассматривать его как источник дополнительного питания нецелесообразно (их разделяет 20–40-метровый слой нижнемиоценовых глин и алевролитов). Исключение – область на севере и северо-западе территории участка, в долине р. Малая Кедровка. Там в составе отложений преобладают грубообломочные фации, мощ-

ность которых достигает 160 м. В этой зоне часть усть-давыдовского горизонта включена в продуктивный водоносный пласт, по фильтрационным параметрам идентична усть-суйфунскому горизонту и рассматривается как единый водоносный комплекс.

На северо-западе участка работ залегают погребенные покровы базальтов, которые относят по возрасту к верхнемиоценовым базальтам и сандуганской свите. К ним приурочены трещинно-жильные воды. Обводненность базальтов пестрая, что обусловлено развитой в них трещиноватостью. Там, где миоценовые и плиоценовые базальты образуют единую толщу, их водообильность относительно низкая. На участках, где погребенные базальты интенсивно трещиноваты и тесно связаны с подземными водами усть-суйфунских, аллювиальных отложений и с рекой, их водообильность чрезвычайно высока: дебит доходит до 75 л/с при понижении 1.3 м, и они наряду с усть-суйфунскими отложениями перспективны для заложения эксплуатационных скважин.

Основные источники формирования запасов подземных вод на Раздольненском участке следующие: подземный сток, формирующийся в пределах участка за счет инфильтрации атмосферных осадков и разгружающийся в русла и поймы рек; поверхностный сток малых рек, формирующийся в пределах участка; транзитный поверхностный сток р. Раздольной; емкостные запасы продуктивной водоносной толщи.

Стокосые характеристики рек оценивались по результатам анализа режимных гидрогеологических наблюдений за стоком малых рек и многолетних наблюдений на гидропостах р. Раздольной (рис. 2). Оценка подземного стока выполнялась несколькими методами, в том числе методом расчленения гидрографа. При этом использовались многолетние режимные наблюдения на стационарных гидропостах рек Пушкинского МПВ с применением метода аналогий там, где коэффициент корреляции был достаточно высоким. Помимо этого, среднегодовые значения подземного притока в реки вычислялись по минимальным 30-дневным расходам средних взвешенных величин. По данным Б.И. Куделина [10], средний многолетний модуль подземного стока для рассматриваемого района равен 1.25 л/с км<sup>2</sup>. Из расчетных величин средних многолетних модулей минимального стока изученных рек наибольший – 1 л/с км<sup>2</sup> (р. Раздольная у с. Тереховки). По результатам расчетов подземный сток в реки, формирующийся в пределах Раздольненского участка, составил 61.8 и 32.5 тыс. м<sup>3</sup>/сут для лет 50%- и 95%-ной обеспеченностей соответственно (табл. 2).

В год 95%-ной обеспеченности величина суммарного поверхностного стока была оценена в

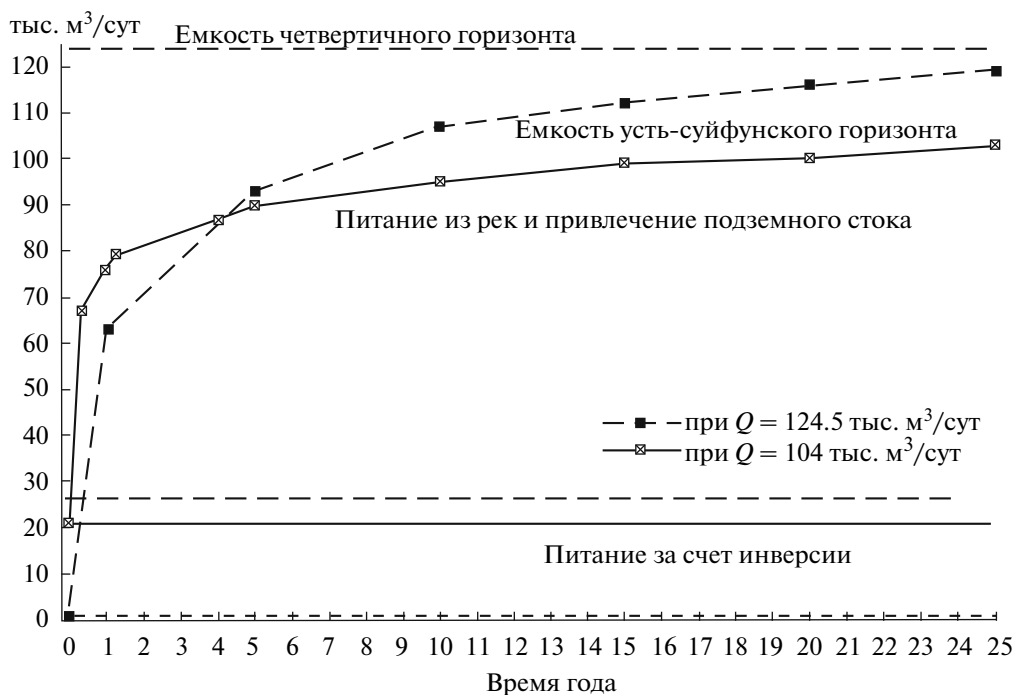
**Таблица 2.** Стоковые характеристики рек Раздольненского участка

Река	№ гидропоста	Площадь водосбора, км <sup>2</sup>	Подземный сток, тыс. м <sup>3</sup> /сут (50%/95%-ная обеспеченность)	Общий сток, тыс. м <sup>3</sup> /сут (50%/95 %-ная обеспеченность)
Раздольная, юг	3	15 500	12.0	5940.0/1996.0
Раздольная, север		15 900	15.0	5600.0
Первая Речка	25	63	14.2/10.4	50.1/21.6
Клепочная	20	47	7.8/2.6	47.4/17.5
Малая Клепочная	30	16	0.8/0.3	3.6/2.3
Большая Кедровка	18	69	15.5/7.9	48.4/15.5
Малая Кедровка	19	38	8.6/ 4.3	58.8/20.7
Грязнушка	26	7	0.8/0.3	6.8/2.3
Кедровка	17	110	13.8/6.8	168.5/61.3

110 тыс. м<sup>3</sup>/сут. С учетом изменчивости параметров сопротивления русловых отложений была принята минимальная величина привлекаемых запасов в объеме 60 тыс. м<sup>3</sup>/сут, соответствующая подземному стоку года 50%-ной обеспеченности. Суммарная величина привлекаемых запасов по данным математического моделирования составила 120 тыс. м<sup>3</sup>/сут. Доля емкостных запасов продуктивного водоносного комплекса при рав-

номерном водоотборе в начальный период эксплуатации достигала 50%, однако на конец эксплуатации в общем балансе водоотбора она снижалась до 4% (рис. 4).

По итогам проведенных исследований ГКЗ СССР были утверждены запасы подземных вод в целом по Пушкинскому МПВ в количестве 329.5 тыс. м<sup>3</sup>/сут, в том числе по Раздольненскому участку – 124.5 тыс. [11]. Запасы были утвержде-

**Рис. 4.** График баланса водоотбора при оценке запасов Раздольненского участка МПВ в 1983 г.

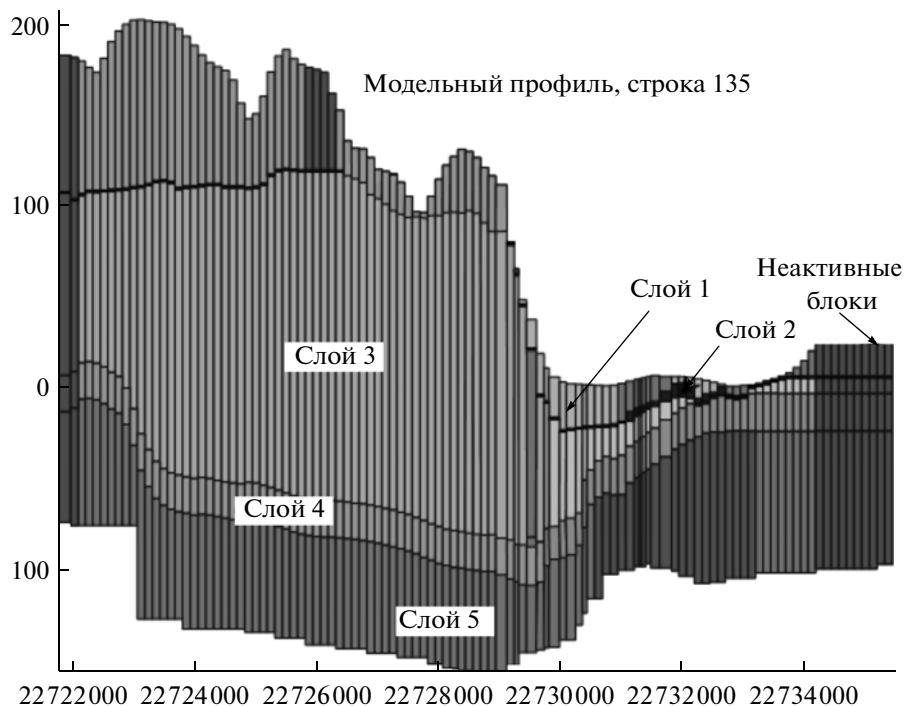


Рис. 5. Схематический разрез гидрогеологической модели Раздольненского участка МПВ.

ны исходя из равномерного режима эксплуатации во внутригодовом и многолетнем разрезах.

Для обеспечения устойчивого водоснабжения населения в водохозяйственном балансе в маловодные годы предусмотрена подача подземных вод в количестве 250 тыс. м<sup>3</sup>/сут, т.е. освоение утвержденных запасов Раздольненского участка обеспечивало покрытие только половины требуемого количества подземных вод, а освоение удаленного Борисовского участка требовало больших затрат.

В связи с недостаточностью эксплуатационных запасов Раздольненского участка, рассчитанных на непрерывный постоянный расход водозабора 125 тыс. м<sup>3</sup>/сут, в очередное безводье 1998–1999 гг. авторами разведки и подсчета запасов подземных вод Пушкинского МПВ – Б.В. Боревским и А.С. Возняковским выдвинута идея форсированного режима эксплуатации участка с увеличением водоотбора в маловодные годы до 250 тыс. м<sup>3</sup>/сут и последующим его снижением в многоводные периоды.

Баланс потребности населенных пунктов в воде и наличия источников покрытия этой потребности представлен в табл. 1. В годы нормальной и высокой водности отбор подземных вод может быть снижен, так как водохранилища обеспечивают потребности в воде и водозабор может работать с минимальной производительностью, обес-

печивающей необходимый напор воды в водораспределительных трубах. В маловодные годы отбор подземных вод на Раздольненском участке увеличивается для покрытия дефицита в воде.

Доказательство и обоснование возможности реализации форсированного режима эксплуатации, а также обоснование его режима и восстановления уровней подземных вод требовало переоценки эксплуатационных запасов подземных вод. Необходимо было оценить баланс подземных вод по источникам их формирования, а также обосновать достаточность источников формирования запасов подземных вод для реализации форсированного режима эксплуатации в маловодные годы и последующего восполнения запасов.

В 2005–2007 гг. в ЗАО «ГИДЭК» проводилась переоценка запасов подземных вод применительно к форсированному режиму эксплуатации в объеме 250 тыс. м<sup>3</sup>/сут в маловодные периоды.

Большая часть работы выполнялась методом математического моделирования, для чего на основе модели 1982 г. была разработана многослойная модель Раздольненского участка Пушкинского МПВ, позволившая реализовать периодический форсированный режим эксплуатации.

Современная модель Раздольненского участка была создана в пятислойной постановке (рис. 5).



Пласт 1 представляет собой отложения современных речных долин, в том числе — все аллювиальные отложения правых притоков р. Раздольной. На водораздельных территориях пласт отсутствует. Мощности — 1–10 м.

Пласт 2 соответствует глинистым илам, подстилающим русловой аллювий, а в местах отсутствия аллювия (на водоразделах) он представляет собой базальты шуфанской свиты. Мощность — от 1 м в поймах рек Раздольной и Кедровки до 10 м на площади распространения илов и до 20 м на водоразделах, перекрытых базальтами.

Пласт 3 соответствует основному продуктивному горизонту. В него включены преимущественно отложения суйфунской и усть-суйфунской свит. В северной части Раздольненского участка в слой включены грубообломочные отложения усть-давыдовской свиты и трещиноватые, водонасыщенные миоценовые базальты. Мощность изменяется от 10 м на востоке участка до 150 м на западе.

Пласт 4 представляет собой слабопроницаемые алевроито-глинистые отложения в кровле усть-давыдовской свиты, а также нетрещиноватые базальты сандуганской свиты. Мощность задана условно равномерной — 10 м.

Пласт 5 соответствует водоносному горизонту усть-давыдовской свиты. Мощность — 70 м.

Область фильтрации была разбита на блоки ортогональной сетки шагом 125 м, а на участках наблюдательных и эксплуатационных скважин сетка детализировалась.

Основное направление потока — с запада (горная часть) на восток (долина р. Раздольной). Перепад абсолютных отметок уровней с запада на восток между базальтовым плато и долиной р. Раздольной составляет >75 м.

Инфильтрационное питание принималось равным 125 мм/год, или ~20% от среднемноголетней суммы атмосферных осадков. В дальнейшем были выделены зоны, по которым задавались различные величины инфильтрации. Со склонов базальтового плато атмосферные осадки рассредоточенным стоком поступают в долины. В связи с этим на высоких абсолютных отметках, крутых склонах инфильтрационное питание уменьшено до 50 мм/год. По долинам малых рек, где в многоводные годы происходит затопление территории, инфильтрационное питание задавалось разным по времени, в маловодные годы — 100, в многоводные — 300 мм/год. В долине р. Раздольной инфильтрационное питание принималось равным 100 мм/год, так как там большое количество атмосферных осадков разгружается поверхностным стоком через дренажные каналы в р. Раздольную. По современным данным о влагообороте в малых речных бассейнах юга Дальнего Востока, четвертая часть выпадающих осадков стекает в виде реч-

ного стока. Критические расходы, характеризующие наполнение бассейновой емкости для бассейнов малых рек долины р. Раздольной, в 1.5–2 раза выше, чем для остальной территории Западно-Приморской провинции [4, 8]. Результаты многочисленных наблюдений [5] показали, что, когда интенсивность дождя превышает водопроницаемость почв, наблюдается интенсивный поверхностный сток там, где залегают аллювиально-морские илы (юго-восточная часть поймы р. Раздольной). Для остальной части бассейна р. Раздольной характерна равномерность распределения дождевого смыва, что свидетельствует о достаточно высокой водопроницаемости почв и, соответственно, инфильтрации.

В качестве начального варианта принимались значения параметров, полученные при схематизации гидрогеологических условий на основе модели 1982 г. В то же время по данным бурения были уточнены геологические разрезы, выполнена интерпретация геолого-структурных данных, что отражено в структуре вновь созданной модели.

Естественные условия воспроизводились при решении стационарной гидродинамической задачи, при этом уточнялись граничные условия модели, фильтрационные параметры продуктивной и питающих толщ, данные инфильтрационного питания, параметры взаимосвязи водоносных горизонтов между собой и с поверхностными водами.

В табл. 3 приведен баланс модели для среднемноголетних гидрогеологических и климатических естественных условий.

При сопоставлении величин модельного и фактического подземного стока для замыкающих створов рек отмечается, что модельные характеристики подземного стока в реки в основном соответствуют среднемноголетним величинам, отличаясь от них на 10–20% в сторону занижения. Это соответствует условиям 1979 г. с несколько сниженной относительно среднемноголетних значений водностью (~60%).

Практически вся пойма р. Раздольной заболочена, и площадная разгрузка на этой территории и в устьевых частях речных долин составляет 43% расходного баланса.

Модель калибровалась по результатам решения, помимо стационарной, двух нестационарных задач, воспроизводивших результаты масштабных групповых откачек, проведенных в 1981 и 1982 гг.

После того как разработанная численная модель была признана не противоречащей имеющимся данным по всем контролируемым показателям (положению и уклонам уровней подземных вод, величине разгрузки в водотоки и водоемы, а также динамике и величине понижений, полу-

Таблица 3. Балансовые характеристики геофильтрационной модели Раздольненского участка в естественных условиях

Статьи баланса, приходные—расходные, тыс. м <sup>3</sup> /сут	Пласт 1							Суммарно	Пласт 5	Пласт 3	Пласт 1
	Зона 2 Кедровка	Зона 4 Первая Речка	Зона 5 Клепечная	Зона 6 Малая Клепечная	Зона 7 Большая Кедровка	Зона 8 Малая Кедровка	Зона 10 долина Раздольной				
Суммарное инфильтрационное питание	4.2	1.9	1.4	0.1	1.7	1.8	10.3	60.5	1.9	27.4	31.3
Переток из рек, разгрузка	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
подземных вод в реки	0.9	2.2	4.5	0.0	0.7	2.9	0.0	11.3	0.0	0.0	11.3
Площадная разгрузка	-7.1	-8.7	-6.5	-0.2	-2.3	-5.2	-8.0	-48.1	0.0	0.0	-48.1
подземных вод	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Приток и отток с границ	-6.5	-0.8	0.0	0.0	-1.1	-1.1	-14.0	-44.4	0.0	0.0	-44.4
I-го рода	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	31.8	28.1	3.7	0.0
Приток—отток	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	-11.1	-9.9	-1.3	0.0
(горизонтальный)	1.3	0.0	0.2	0.0	0.0	0.1	1.4	0.0	3.6	3.0	4.0
Приток—отток	-0.1	-0.1	-0.1	-0.6	-0.5	-0.5	-0.7	0.0	3.6	3.0	0.0
(вертикальный, вниз)	7.4	7.5	3.1	0.7	1.4	2.1	10.9	0.0	0.0	26.9	54.8
Приток—отток	-0.1	-2.0	-2.6	0.0	0.0	-0.1	0.0	0.0	0.0	-6.8	0.0
(вертикальный, вверх)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	6.8	4.9	0.0
Сумма приходных и расходных статей	14.0	12.0	9.0	1.0	4.0	7.0	23.0	103.6	36.8	62.9	97.4
	-14.0	-12.0	-9.0	-1.0	-4.0	-7.0	-23.0	-103.6	-36.8	-62.9	-97.4

ченных при групповых опытных опробованиях), она была принята за основу для прогнозов.

Прогнозные задачи учитывали наихудшую климатическую ситуацию, когда маловодные периоды повторяются два года подряд. В соответствии с климатическими особенностями территории годы, когда наполнение водохранилищ не происходит, случаются раз в 4–7 лет. В маловодный период задается форсированный водоотбор из подземных вод Раздольненского участка.

Было решено две основные задачи.

1) Задача с равномерным водоотбором в объеме 124.5 тыс. м<sup>3</sup>/сут утвержденных ранее запасов. Она предусматривала возможность перехода водозабора в форсированный режим эксплуатации, и для этого была выполнена оптимизация водоотбора по сравнению с предыдущей водозаборной схемой.

2) Задача с форсировано-восстановительным режимом работы водозабора. Начиная с осени маловодного периода осуществляется перевод Раздольненского водозабора в режим форсированной эксплуатации с суммарным водоотбором порядка 250 тыс. м<sup>3</sup>/сут. После этого в течение 3–4 лет необходим сниженный (реабилитирующий) водоотбор для приведения величины его средне-годовалого значения к запасам подземных вод месторождения. Для этой задачи было выполнено два основных варианта: с шестилетним повторяющимся циклом (подряд два года форсированного режима с отбором 250 тыс. м<sup>3</sup>/сут и четыре последующих года – восстановительный период с суммарным отбором 61.75 тыс. м<sup>3</sup>/сут, средне-годовое значение – 124.5 тыс. м<sup>3</sup>/сут, что равно сумме утвержденных запасов); с трехлетним повторяющимся циклом форсированного водоотбора (один год – форсированный режим с отбором 250 тыс. м<sup>3</sup>/сут и два последующих года – восстановительный период с суммарным отбором 61.75 тыс. м<sup>3</sup>/сут).

Следует отметить, что двухлетний маловодный период возможен лишь теоретически, фактически он никогда не происходил.

В табл. 4 приведены балансы подземных вод для года нормальной водности, с равномерным водоотбором (вариант 3), для маловодного года (форсированный режим, вариант 1) и для многоводного года (восстановительный режим), вариант 2.

Инфильтрационное питание в год нормальной водности по всей моделируемой территории составляет 60.5 тыс. м<sup>3</sup>/сут, уменьшаясь до 54.5 тыс. в маловодный год и увеличиваясь до 66.4 тыс. в многоводный.

При эксплуатации водозабора происходит сокращение стока малых рек и осушение болот в долине р. Раздольной.

При подсчете запасов принималось, что привлечение поверхностного стока будет не меньше величины подземного стока, фиксируемого в руслах рек, за исключением тех участков, где в естественных условиях уровень продуктивного водоносного комплекса оторван от рек. Часть подземного стока, формирующегося в верховьях рек в пределах четвертичных отложений, не будет участвовать в формировании запасов.

Результаты прогнозного моделирования приведены в табл. 4, на рис. 6 и 7 и свидетельствуют о следующем: общая сумма уменьшения разгрузки и привлечения поверхностного стока при работе водозабора в форсировано-восстановительном и равномерном режимах в расчетный срок эксплуатации 25 лет практически не меняется; сокращение стока в реки на конец расчетного срока эксплуатации нигде не превышает их расхода 95%-ной обеспеченности, т.е. полностью обеспечено величиной среднегодового поверхностного стока.

Таким образом, в данных природных условиях при расчете водозабора вследствие большой регулирующей емкости можно рассматривать средне-многолетнее питание подземных вод.

На рис. 7 видно, как изменяется величина привлекаемых ресурсов при равномерном водоотборе. Величины сокращения стока – это разницы между увеличением приходных и уменьшением расходных статей баланса по сравнению с балансовыми характеристиками в естественных условиях. Привлекаемая величина поверхностного стока после первого года работы водозабора практически постоянна.

В течение всего периода эксплуатации водозабора привлечение подземного стока увеличивается, но когда в результате понижения уровня продуктивного водоносного горизонта происходит отрыв уровня подземных вод от дна мелких рек, величина привлекаемых из рек ресурсов перестает изменяться. Протяженность участков русел рек, где происходит отрыв уровня, постепенно увеличивается.

На рис. 7 видно, что для Большой Кедровки, Малой Кедровки и Грязнушки отрыв уровней происходит в первые два года работы водозабора, для Клепачной и Первой Речки – в первые пять лет и только на части территории.

В настоящее время сток в малых реках в январе–феврале практически отсутствует из-за замерзания русла, а в остальные зимние месяцы, к которым можно отнести также и март, он составляет <2% среднегодового стока. Таким образом, поверхностный сток в малых реках отмечается в течение 8 мес. Водоотбор повлияет на увеличение периода отсутствия стока в реках в маловодные годы до 6 мес. – с сентября по март.

В годы средней водности сентябрьский поверхностный сток по всем рекам в несколько раз

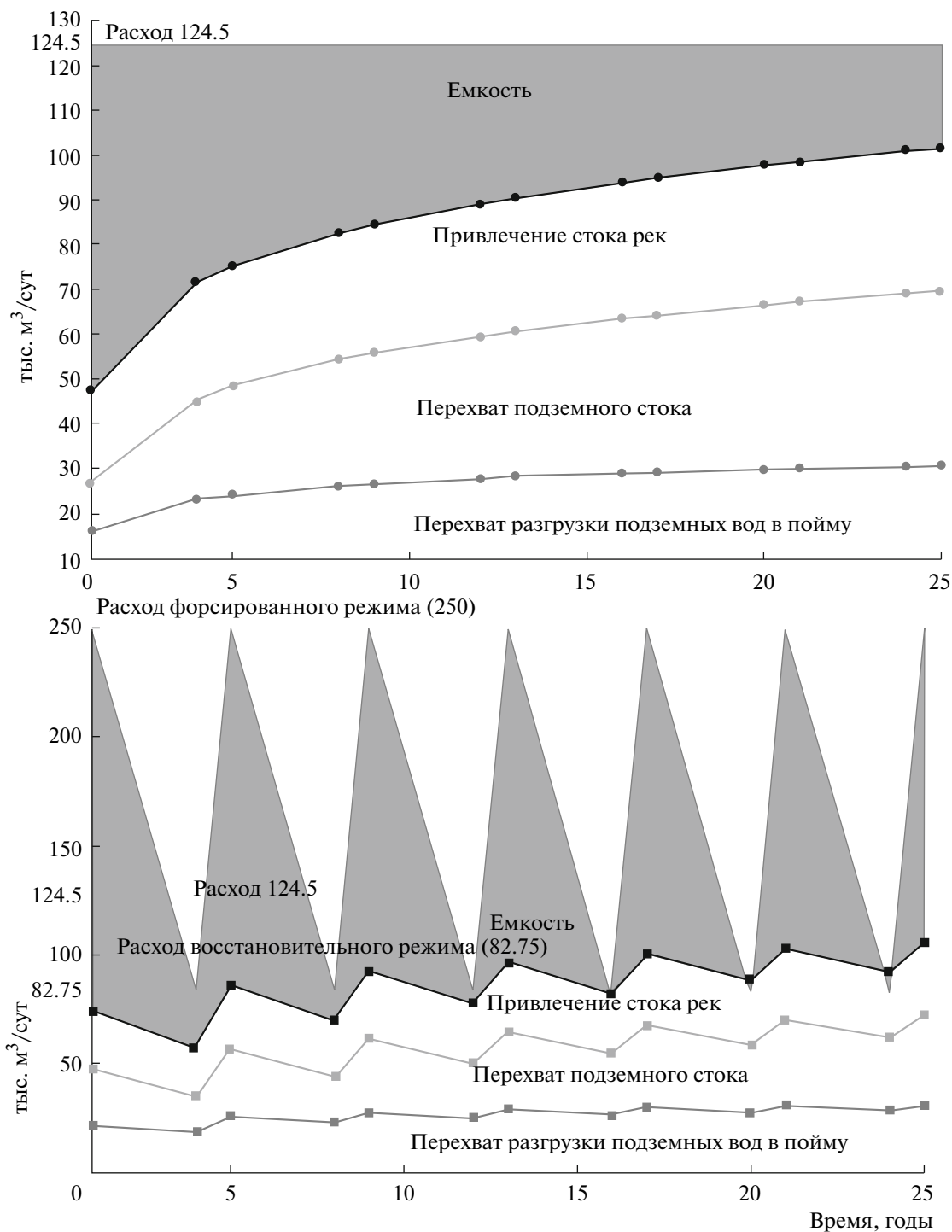


Рис. 6. Изменения балансовых составляющих водотбора во времени при равномерном и форсировано-восстановительном режимах работы водозабора.

превышает величину рассчитанного ущерба, т.е. период отсутствия стока в такие годы составляет 4.5–5 мес. При сохранении водоотбора в среднемноголетнем значении ущерба речному стоку близки при разных вариантах эксплуатации и практически не меняются по сравнению с оцен-

кой для 1983 г. Переход от равномерного режима водоотбора к форсировано-восстановительному практически не сказывается на стоке в бассейне р. Раздольной.

При работе водозабора в форсировано-восстановительном режиме меняется только амплитуда

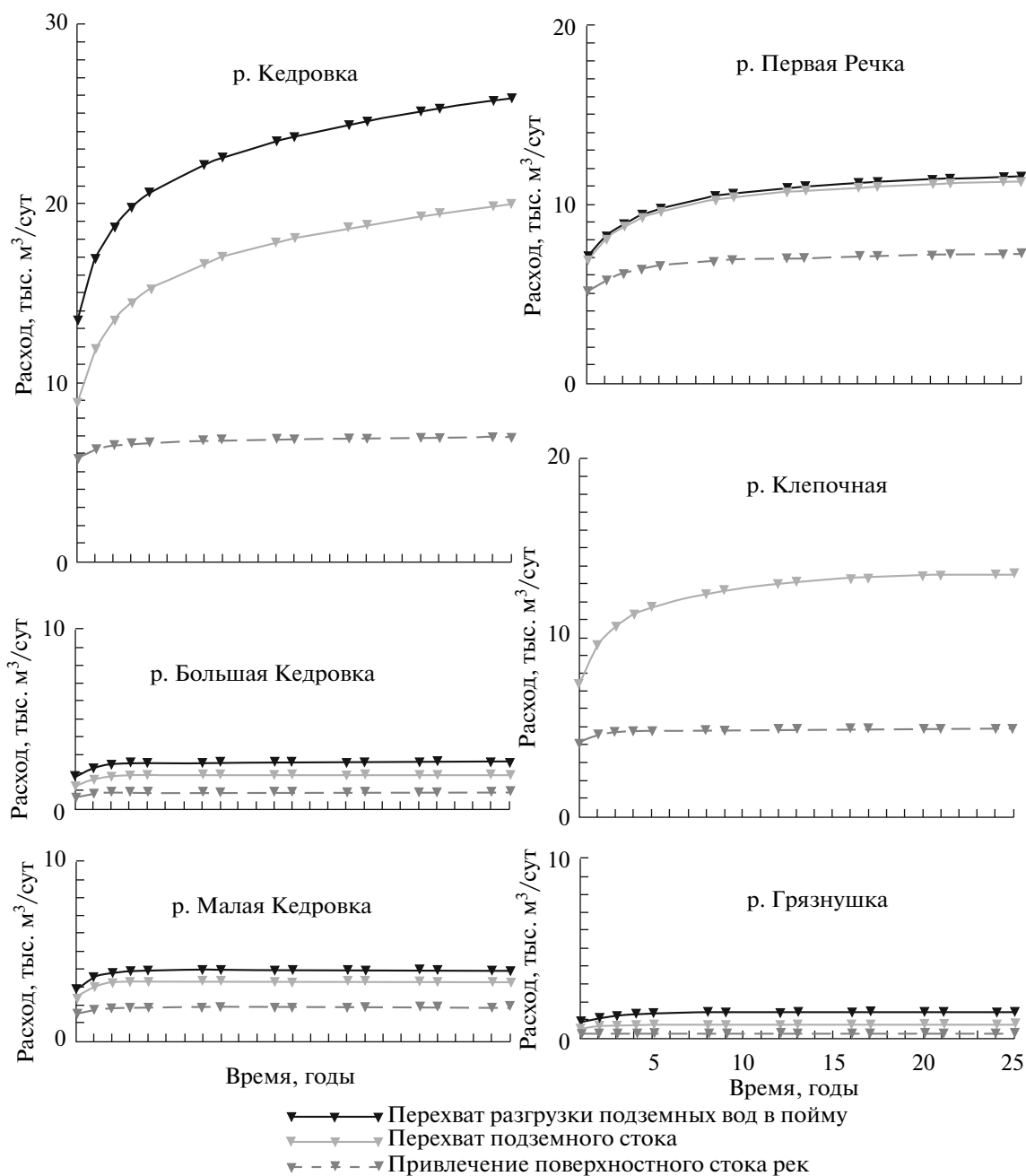
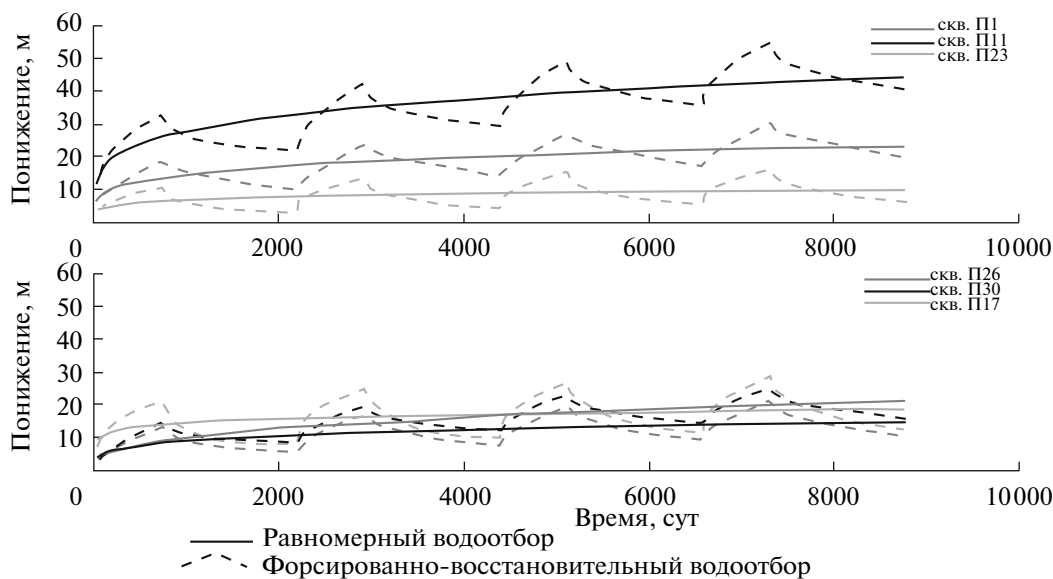


Рис. 7. Изменения привлечения поверхностного и подземного стока по бассейнам малых рек при равномерном режиме работы водозабора.

колебания балансовых составляющих, сами величины в среднем остаются теми же. Понижения уровней при сохранении водоотбора в среднемноголетнем значении близки для разных вариантов форсировано-восстановительного водоотбора, отличаются только амплитуды колебания (рис. 8).

Расчетные понижения уровней на период их максимального снижения повсеместно меньше

величины допустимых понижений. Разница динамических уровней при форсированном и штатно-равномерном режимах составляет от 4 до 11 м. Амплитуда колебаний уровней в периоды форсированного и восстановительного режимов составляет от 3 м в верховьях Большой Кедровки до 16 м на остальной территории МПВ. Максимальные понижения отмечаются в долине Малой Кедровки, достигая здесь 60 м, что меньше их до-



**Рис. 8.** Результаты прогнозного моделирования равномерного и форсированного водоотбора на Раздольненском участке МПВ.

пустимых значений. Снижение уровней подземных вод происходит весь период эксплуатации месторождения за счет постоянной сработки емкости основного эксплуатируемого горизонта. В восстановительный период снижение уровней существенно замедляется, и происходит их частичное восстановление.

Таким образом, данные расчетов показали, что при сохранении водоотбора в среднемноголетнем значении понижения уровней и ущерб речному стоку близки для разных вариантов (рис. 7, 8).

Результаты моделирования и выполненной на их основе переоценки запасов подземных вод легли в основу проектных решений по освоению Раздольненского участка Пушкинского МПВ, и в настоящее время происходит их реализация. Всего для обеспечения форсированного режима водоотбора к ранее запроектированным эксплуатационным скважинам (42 рабочих и 6 резервных) было добавлено еще 30. Изменения производительности водозабора при равномерном, форсированном и восстановительном режимах его работы достигаются регламентированным числом рабочих скважин, их местоположением и продолжительностью эксплуатации. Во избежание резких скачков водоотбора предполагается поочередное включение скважин в работу. При использовании автоматических систем включения—отключения скважин водоотбор регулируется для приведения его к среднему значению по всему водозабору.

Таким образом, предложенный вариант комплексного совместного использования подземных

и поверхностных вод с различным соотношением водоотбора из этих источников в маловодные и многоводные периоды подтвержден данными моделирования и может быть реализован.

### ВЫВОДЫ

Комплексное использование подземных и поверхностных вод с различным соотношением водоотбора из этих источников в маловодные и многоводные периоды и с применением форсированного водоотбора может применяться там, где ситуация отвечает следующим условиям:

- поверхностных вод недостаточно для удовлетворения потребности в воде в маловодные периоды, а выявленные запасы подземных вод достаточны для реализации форсированного режима эксплуатации;
- условия формирования выявленных запасов подземных вод позволяют существенно повысить водообеспеченность населенных пунктов за счет режима их форсированной эксплуатации;
- баланс подземных вод позволяет решать задачу о форсированном режиме отбора подземных вод за счет более полного периодического использования емкости продуктивных и питающих водоносных горизонтов;
- источники формирования запасов подземных вод достаточны для восполнения сработанной их части, а использование поверхностных источников водоснабжения в многоводные годы позволяет снизить водоотбор из подземных.

Таблица 4. Балансовые характеристики модели Раздольненского участка при решении прогнозных задач

Вариант	Вариант 1 форсированный режим, маловодный год	Вариант 2 восстановитель- ный режим, многоводный год	Вариант 3 равномерный режим, год средней водности	Есте- ственные условия	Вариант 1 форсированный режим, маловодный год	Вариант 2 восстановитель- ный режим, многоводный год	Вариант 3 равномерный режим, год средней водности	Есте- ственные условия
Статьи баланса, тыс. м <sup>3</sup> /сут	Суммарное инфильтрационное питание							
Приходные	54.5	66.3	60.5	60.5	147.7	6.0	20.0	–
Расходные	–	–	–	–	–	35.9	–	–
Привлечение ресурсов	–	–	–	–	–	–	–	–
Привлечение ресурсов	–	–	–	–	–	–	–	–
Статьи баланса	Переток из рек и разгрузка подземных вод в реки							
Приходные	47.1	34.4	46.1	11.3	–	–	–	–
Расходные	13.6	19.8	14.6	48.0	12.4	16.2	12.4	44.4
Привлечение ресурсов	35.8	23.1	34.8	–	–	–	–	–
Привлечение ресурсов	34.3	28.2	33.4	–	31.9	28.1	31.9	–
Статьи баланса	Суммарный расход водоотбора							
Приходные	–	–	–	–	36.6	36.9	35.0	31.7
Расходные	250.0	61.7	124.5	–	9.9	9.9	10.0	11.1
Привлечение ресурсов	–	–	–	–	4.8	5.1	3.2	–
Привлечение ресурсов	–	–	–	–	1.1	1.1	1.1	–
Статьи баланса	Приток и отток с границ первого рода							
Приходные	–	–	–	–	–	–	–	–
Расходные	286.0	143.7	161.6	103.6	–	–	–	–
Статьи баланса	Сумма приходных и расходных статей							
Приходные	286.0	143.7	161.6	103.6	–	–	–	–
Расходные	286.0	143.7	161.6	103.6	–	–	–	–

Этим условиям отвечают такие типы месторождений подземных вод, как межгорные впадины, артезианские бассейны с большой регулирующей емкостью пластов. Также подобный подход оправдан в долинах с периодическим стоком пересыхающих или перемерзающих рек. В многоводные годы это позволяет водозабору работать в условиях фильтрационного водозабора, а в маловодные — в условиях сработки емкости.

Таким образом, успешный опыт реализации проекта форсированного режима эксплуатации водозабора для водоснабжения г. Владивостока позволяет рассмотреть возможность аналогичных подходов при ликвидации дефицита водообеспеченности для других городов.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Боревский Б.В., Гродзенский В.Д.* Особенности разведки и оценки эксплуатационных запасов крупных месторождений пресных подземных вод Сибири и Дальнего Востока // Тез. докл. Всесоюз. совещ. по подземным водам Востока СССР. Хабаровск: СО АН СССР, 1985. С. 22–24.
2. *Болгов М.В., Маслов А.А., Филимонова Е.А.* Динамико-стохастическое моделирование взаимосвязи поверхностных и подземных вод при их комбинированном использовании // Ресурсы подземных вод, современные проблемы изучения и использования. Матер. междунар. науч. конф. М.: МАКС Пресс, 2010. С.138–148.
3. Водные ресурсы России и их использование / Под ред. Шикломанова И.А. СПб.: ГГИ, 2008. 600 с.
4. *Гарцман Б.И.* Феномен контррегулирования стока в модели паводочного цикла малого речного бассейна // География и природные ресурсы. Иркутск: ГЕО, 2001. № 2. С. 50–55.
5. *Дербенцева А.М., Крупская Л.Т., Степанова А.И.* Оценка экологического состояния почв эрозионно-русловых систем юга Дальнего востока. Владивосток: Изд-во ДГУ, 2005. 50 с.
6. *Ковалевский В.С.* Комбинированное использование ресурсов поверхностных и подземных вод. М.: Науч. мир, 2001, 332 с.
7. *Крайнов С.Р., Швец В.М.* Геохимия подземных вод хозяйственно-питьевого назначения. М.: Недра, 1987. 285 с.
8. *Макагонова М.А.* Ландшафтно-климатическая обусловленность параметров водообмена малого речного бассейна // Географические и геоэкологические исследования на Дальнем востоке. Владивосток: Дальнаука, 2008. С.61–69.
9. Подземные воды мира: ресурсы, использование, прогнозы / Под ред. Зекцера И.С. М.: Наука, 2007. 438 с.
10. Подземный сток на территории СССР / Под ред. Куделина Б.И. М.: Изд-во МГУ, 1966. 302 с.
11. *Рышков В.С., Боревский Б.В., Возняковский А.С.* Возможности открытия и особенности разведки месторождений подземных вод в условиях Приморья // Тез. докл. Всесоюз. совещ. по подземным водам Востока СССР. Хабаровск: СО АН СССР, 1985. С. 42–43.