

МОДЕЛИ В ИНЖЕНЕРНОЙ ГЕОЛОГИИ И ГИДРОГЕОЛОГИИ

УДК 624.131.3, 624.131.6

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ И МОДЕЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ФИЛЬТРАЦИОННЫХ ПОТОКОВ В РАЙОНЕ СТРОИТЕЛЬСТВА АЭС ПАКШ-2 (ВЕНГРИЯ)

© 2023 г. А. М. Никуленков^{1,2,*}, О. И. Новицкая³, В. Г. Румынин^{1,2}, М. В. Вилькина^{1,2},
А. А. Шварц^{1,2}, Л. Н. Синдаловский^{1,2}

¹Санкт-Петербургское отделение Института геоэкологии им. Е.М. Сергеева РАН,
Средний пр. 41, оф. 519, В.О, Санкт-Петербург, 199004 Россия

²Санкт-Петербургский государственный университет,
Университетская наб. 13, В.О., Санкт-Петербург, 199034 Россия

³Санкт-Петербургский отдел изысканий АО «Атомэнергoproject»,
ул. Савушкина 82, Санкт-Петербург, 197183 Россия

*E-mail: annik@hgepro.ru

Поступила в редакцию 17.10.2023 г.

После доработки 23.10.2023 г.

Принята к публикации 26.10.2023 г.

Возведение котлована глубокого заложения на участке строительства АЭС Пакш-2 в сильнообводненных аллювиальных грунтах потребовало строительства замкнутой противofильтрационной завесы (ПФЗ). Однако литологическая неоднородность и наличие зон дислокаций не позволяли однозначно идентифицировать оптимальную глубину заложения ПФЗ. Для схематизации гидрогеологических условий привлечены результаты мониторинга уровней подземных вод в скважинах различной глубины и проведены масштабные кустовые откачки. Интерпретация данных геологического строения с выделением границ водоносных горизонтов проводилась итерационным путем с использованием численной гидрогеологической модели. На модели воспроизводились распределение уровней воды, реакция неоднородной толщи на колебания в р. Дунай и откачки из скважин различной глубины. По результатам гидрогеологического моделирования было показано, что первый водоупорный слой является выдержанным, но глубина его залегания варьирует от 30 до 90 м в пределах строительной площадки. Сложная морфология водоупорного слоя контролируется пликативной зоной дислокации (борт глубокого грабена), секущей площадку строительства пополам. Корректная гидрогеологическая стратификация позволила обосновать на модели водозащитные мероприятия (ПФЗ) для строительства глубокого котлована АЭС Пакш-2, а также не допустить значимого гидродинамического воздействия на расположенную по соседству действующую АЭС Пакш-1.

Ключевые слова: гидрогеологическое исследования, гидродинамическая томография, моделирование, строительство АЭС

DOI: 10.31857/S0869780923060061, EDN: CTVEDE

ВВЕДЕНИЕ

Объектом настоящего исследования является площадка строительства атомной электростанции (АЭС) Пакш-2, расположенная в центральной части Венгрии, в 100 км к югу от г. Будапешт на правом берегу р. Дунай. На ее территории планируется возведение 5 и 6 энергоблоков.

Территория площадки строительства располагается в пойме р. Дунай. Основанием для фундаментов АЭС служат высоко водопроводящие аллювиальные отложения мощностью до 30 м, представленные песками разной крупности и гравием, причем доля крупной фракции в разрезе увеличивается с глубиной. Суммарная проводи-

мость толщи аллювиальных отложений достигает 2000 м²/сут. Аллювиальные отложения подстилает терригенная толща, представленная чередованием паннонских песков и глин суммарной мощностью до нескольких километров. В отличие от аллювиальных отложений, паннонские отложения характеризуются значительно большей литологической неоднородностью, как в плане, так и в разрезе. Прослеживание литологических границ внутри паннонской толщи между двумя соседними скважинами является не тривиальной задачей.

Южная часть площадки строительства располагается в зоне развития региональной линейной дислокации Дунаентдьёрдь-Харта, которая ока-

зала непосредственное влияние на геометрию слоев паннонской осадочной толщи [7].

Дополнительные трудности при строительстве АЭС создает режим р. Дунай. Так, согласно данным наблюдений на гидростоях, за 1–2 дня уровень воды в реке может подниматься на 3–5 м, а годовая амплитуда может достигать 10 м. Резко нестационарный режим реки неминуемо находит свое отражение в флуктуациях уровней подземных вод (УПВ) на прибрежной территории, где расположена площадка строительства АЭС. Годовые амплитуды УПВ в некоторых мониторинговых скважинах могут достигать 5–8 м.

Современные требования безопасности АЭС предписывают заглублять опасные здания и сооружения АЭС в грунтовый массив. Поэтому, в отличие от “советских” АЭС, строительство новых АЭС с реакторами поколения III+ сопровождается разработкой котлована глубиной до 20–25 м. Высокая водопроницаемость аллювиальных отложений, сильная фильтрационная и литологическая неоднородность, резко нестационарный режим подземных вод, неопределенность границ распространения водоупорных и проницаемых слоев, близость р. Дунай — все эти факторы значительно усложняют задачу строительства заглубленных котлованов под АЭС Пакш-2.

В первую очередь это связано с тем, что открытый водоотлив из строительного котлована будет формировать обширную депрессионную воронку подземных вод. Это может привести к интенсификации просадок земной поверхности за счет консолидации глинистых прослоев при увеличении эффективных напряжений в грунтовом массиве [3, 6]. Неравномерная просадка грунтов вблизи пло-

щадки строительства неприемлема, поскольку в непосредственной близости от котлована располагаются действующие энергоблоки АЭС Пакш-1, имеющие строгие допуски по кренам. Кроме того, значительный водоприток в строительный котлован, помимо эксплуатационных затрат по водопонижению, будет приводить к постоянному оплыванию бортов котлована, и также остро поднимает вопрос очистки и утилизации большого количества дренажных вод.

С учетом сложных природных условий на площадке АЭС Пакш-2 был проведен дополнительный комплекс полевых работ и выполнено гидрогеологическое моделирование. Это дало возможность идентифицировать структуру фильтрационного потока подземных вод, провести схематизацию гидрогеологических условий, а затем обосновать оптимальную конструкцию (размер и глубину заложения) противифльтрационной завесы. Предложенный по результатам работ замкнутый контур ПФЗ позволит значительно сократить притоки в котлован и сведет до минимума гидродинамическое воздействие от строительного водоотлива на действующую АЭС Пакш-1.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

При проведении исследований на площадке строительства АЭС Пакш-2 были выполнены стандартные и специальные методы инженерно-геологических исследований (табл. 1). В частности, выполнено бурение инженерно-геологических скважин; статическое зондирование; площадная и скважинная геофизика; лабораторные испытания грунтов; организована сеть монито-

Таблица 1. Перечень методов опробования гидрогеологической среды на участке строительства АЭС Пакш-2

Методы опробования	Количество определений	Определяемые характеристики	Примечание
Инженерно-геологические скважины	Свыше 1000 скважин	Литологический состав	Отбор образцов керна в скважинах глубиной до 150 м
Одиночные откачки	81 откачка	k_x, k_z	Откачки с тремя ступенями расхода
Кустовые откачки	12 откачек	k_x, k_z, S_s, S_y	Откачки из кластеров скважин, оборудованных на разную глубину
Откачка вблизи р. Дунай	2 откачки	ΔL	Откачка с линейным рядом из 15 скважин
Гидродинамическая томография	4 серии	k_x, k_z, S_s , сплошность водоупора	Поинтервальное прослеживание гидродинамического импульса
Гидрогеологический мониторинг	Свыше 80 скважин	Режим УПВ	Непрерывный ряд наблюдений на протяжении 8 лет

k_x, k_z — горизонтальный и вертикальный коэффициент фильтрации соответственно; S_s — удельная водоотдача; S_y — гравитационная водоотдача; ΔL — сопротивление русла реки.

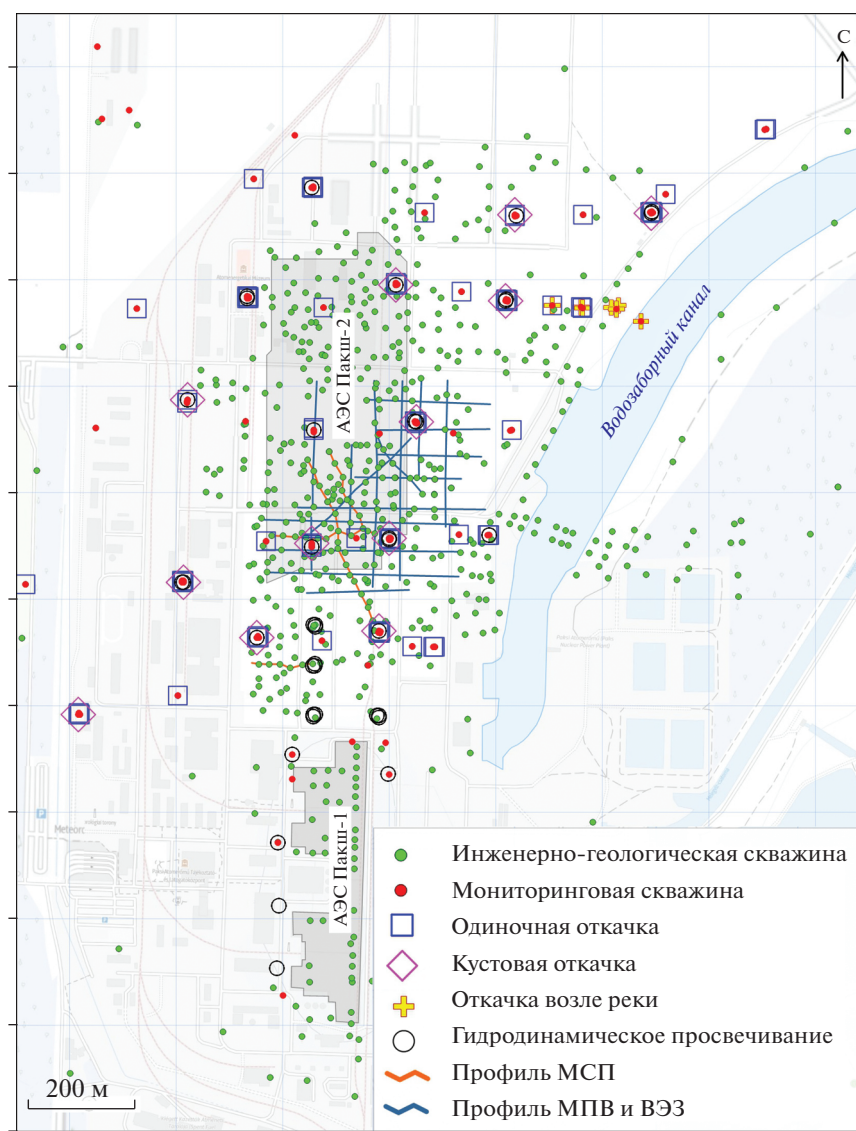


Рис. 1. Методы исследования на площадке строительства АЭС Пакш-2.

ринговых гидрогеологических скважин различной глубины; выполнены опытно-фильтрационные работы и гидродинамическая томография; создана гидрогеологическая модель.

Бурение инженерно-геологических скважин

Для изучения инженерно-геологических условий площадки АЭС Пакш-2 было выполнено бурение более 1000 скважин с отбором керна (рис. 1) и полной документацией.

Скважины расположены на расстоянии 20–50 м, их глубина варьирует от 15 до 150 м. В процессе бурения было установлено, что толща аллювиальных отложений залегает субгоризонтально и имеет довольно выдержанные границы.

Напротив, нижележащая толща паннонских отложений обладает значительной литологической неоднородностью (рис. 2). Порой даже в соседних скважинах, расположенных на расстоянии 20 м друг от друга, наблюдается различный набор глинистых и песчаных слоев. Поэтому для интерпретации полученных данных был проведен комплекс геофизических исследований в скважинах, а также выполнено статическое зондирование в более чем 500 точках. Кроме того, была разработана система индикаторных признаков и маркирующих горизонтов, которые позволяли объективно выделять в разрезе обособленные интервалы. К таким признакам относились: цвет грунтов, наличие прослоя лигнита, диаграммы гамма-каротажа, соотношение лобового и бокового сопротивлений и др.

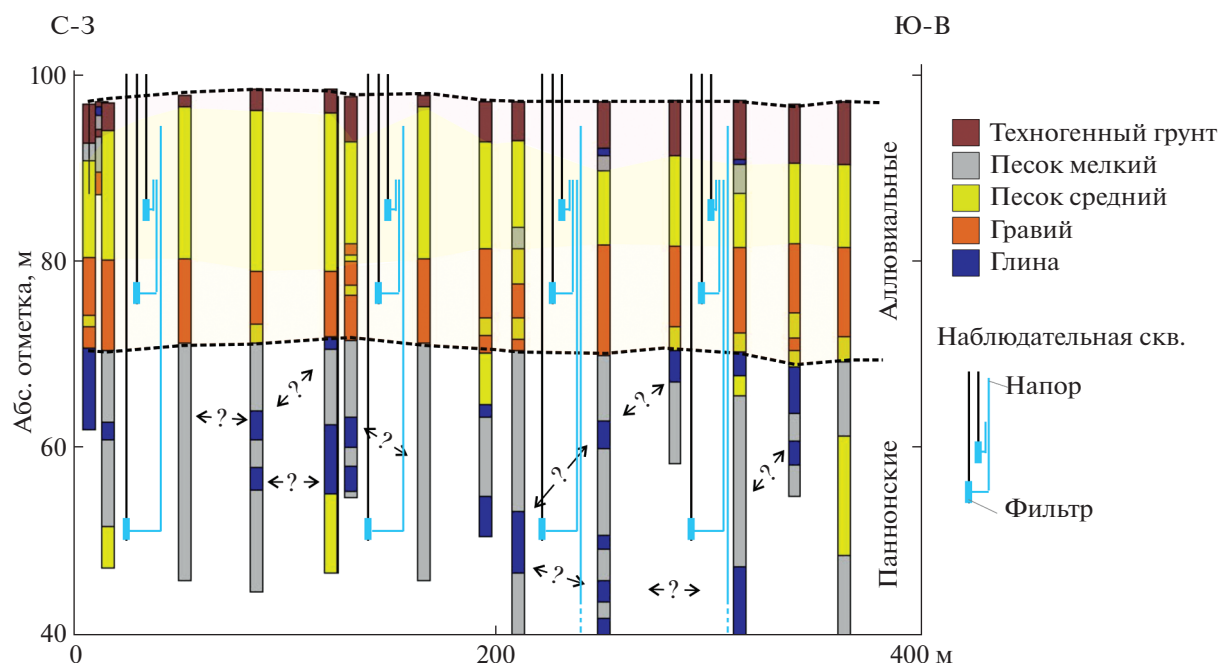


Рис. 2. Сопоставление геологических колонок скважин на территории АЭС Пакш-2.

Геофизические методы

На участке исследования был проведен комплекс геофизических исследований (см. рис. 1). По профилям выполнены сейсморазведочные работы методом преломленных волн (МПВ), а также электроразведочные работы методом вертикальных электрических зондирований (ВЭЗ). В месте проектируемого 5-го энергоблока выполнено межскважинное сейсмическое просвечивание (МСП) на продольных и поперечных волнах по четырем сечениям. К сожалению, помехи от работы АЭС и коммуникаций на техногенно-освоенной территории площадки строительства не позволили раскрыть весь потенциал площадных и точечных сейсморазведочных методов.

Мониторинг за УПВ

Положение УПВ на площадке строительства АЭС Пакш-2 и ее ближайших окрестностей является одним из критериев безопасности действующей АЭС Пакш-1. Поэтому для осуществления непрерывного контроля за УПВ на территории строительства была организована сеть из более чем 80 ярусных наблюдательных (мониторинговых) скважин несовершенными по степени вскрытия. Длина фильтра, как правило, не превышала 5 м. Фильтры оборудованы на 4 яруса. Типовые глубины установки фильтров: 9–14, 10–24, 44–49 и 94–99 м. Первые два уровня глубин отвечали интервалам залегания аллювиальных отложений, а нижние два интервала приурочены к паннонским отложениям. Регистрация УПВ в

скважинах проводилась автоматическими датчиками с частотой 1 раз в час и дополнялась ручными контрольными замерами 1 раз в 2 нед.

Опытно-фильтрационные работы

Для изучения фильтрационной неоднородности в плане и по глубине на исследуемом участке был выполнен обширный набор опытно-фильтрационных работ, опробующих как верхние, так и нижние интервалы методами одиночной и кустовой откачки. В частности, была выполнена 81 одиночная и 12 кустовых откачек. Длительность опробований варьировала от 4 ч до нескольких недель. Для большинства скважин во время откачки создавались 3–4 степени расхода.

Для изучения гидравлической связи р. Дунай и отводящего канала с подземными водами, в прибрежной зоне проведено 2 кустовых откачки. Каждая откачка включала линейный ряд из 15 наблюдательных скважин, оборудованных на различные горизонты. На протяжении месяца в каждом кусте проводилась откачка с тремя степенями расхода: 1000, 2000 и 3000 л/мин. Интерпретация результатов опробований проводилась графоаналитическим методом и подбором параметров в программе АНСДИМАТ [2]. Обработка длительных откачек вдоль реки велась с учетом изменения уровня в ней.

Гидродинамическая томография

Плотная сеть наблюдательных скважин, как в плане, так и по глубине дает возможность проследить реакцию в различных интервалах разреза и на

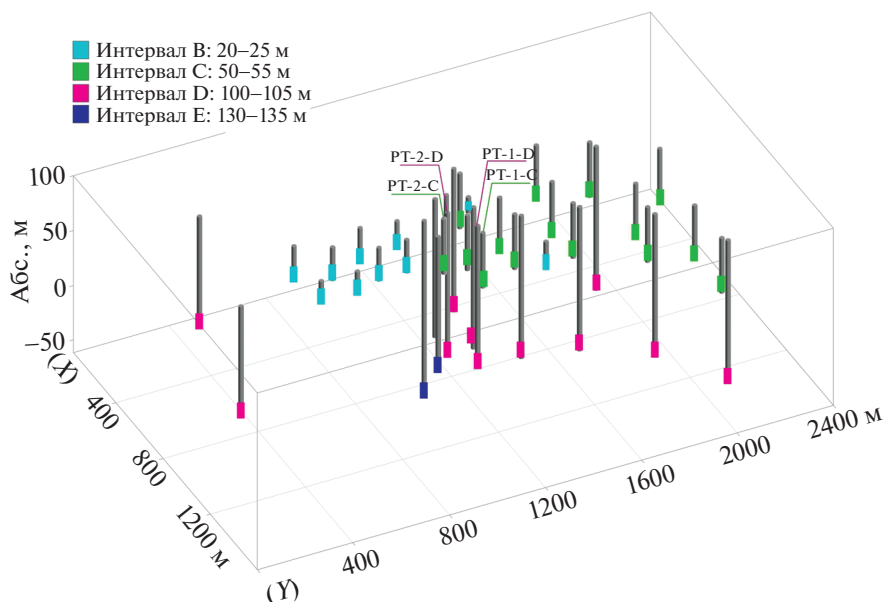


Рис. 3. Трехмерная диаграмма со скважинами, задействованными во время проведения гидродинамической томографии.

разном удалении от откачивающих скважин. Анализ такого рода информации позволяет сделать выводы не только о фильтрационной неоднородности массива, но и о структуре потока подземных вод. Метод пространственного поинтервального прослеживания гидродинамического возмущения получил название гидродинамической томографии.

Значительный вклад в развитие гидродинамической томографии внесли исследования на участке North Campus Research Site, Канада [5, 12–14]. Обширное практическое применение метод получил для интерпретации данных, полученных при эксплуатации муниципального водозабора Mannheim East [9]. Возможности гидродинамического просвечивания в трещиновато-пористой среде были исследованы подземной исследовательской лабораторией Мицunami, Япония [8].

Для гидродинамической томографии на площадке строительства АЭС Пакш-2 было задействовано 45 наблюдательных скважин, оборудованных на интервалы разреза от 14 до 129 м (рис. 3). Гидродинамическое возмущение длительностью 7 сут поочередно создавалось в четырех скважинах, оборудованных на разные интервалы пannonской терригенной толщи (глубины 45, 99, 129 м).

Интерпретация результатов гидродинамического прослеживания проводилась на численной гидрогеологической модели.

Гидрогеологическая модель

Весь объем геологической и гидрогеологической информации, полученный полевыми методами,

был учтен при создании трехмерной гидродинамической модели. Для создания модели использовался открытый программный код MODFLOW [10].

Поскольку выделение в пannonских отложениях границ проницаемых и непроницаемых слоев допускает многовариантность, на гидродинамической модели проигрывались различные концепции геологического строения. Они увязывались с данными по геологии в отдельных точках (в скважинах), с распределением УПВ, а также с реакцией наблюдательных скважин на откачки. В процессе моделирования подбирались такая реализация геологических условий, которая могла одновременно хорошо описать все привлеченные фактические данные.

Каркас модели состоял из 22 расчетных слоев, размер – 7840×4800 м с нерегулярным размером блоков: от 250×100 м на периферии до 5×5 м непосредственно на площадке строительства.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ РАБОТ

Оценка гидравлической связи подземных и поверхностных вод по данным режимных наблюдений

Анализ реакции УПВ в гидрогеологических скважинах на изменение уровней в р. Дунай позволил оценить гидравлическую связь подземных и поверхностных вод, а также рассчитать емкостные параметры водоносного пласта. Для этого было использовано уравнение подпора с учетом сопротивления русла реки и перетекания в смеж-

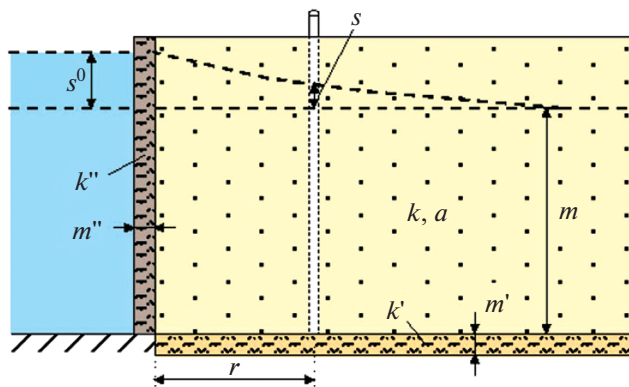


Рис. 4. Схема для обработки данных режимных наблюдений за уровнями подземных вод вблизи реки.

ные горизонты (1) [2, 11]. Схематизация гидрогеологических условий приведена на рис. 4. Ин-

терпретация данных мониторинга проводилась с помощью программы АНСДИМАТ [2].

$$s = s^0 \left\{ \frac{1}{2} \left[\frac{\exp(-r/B) \operatorname{erfc} \frac{r-2at/B}{2\sqrt{at}} + \frac{\exp(r/B) \operatorname{erfc} \frac{r+2at/B}{2\sqrt{at}}}{1 - \Delta L^2/B^2} \right] - \frac{\exp[r/\Delta L + (1 - \Delta L^2/B^2)at/\Delta L^2] \operatorname{erfc} \frac{r+2at/\Delta L}{2\sqrt{at}}}{1 - \Delta L^2/B^2} \right\}, \quad (1)$$

где s — изменение уровня воды в наблюдательной скважине, м; s^0 — мгновенное изменение уровня воды в реке, м; r — расстояние от наблюдательной скважины до реки, м; t — время от начала возмущения в реке, сут; $\Delta L = m''k/k'$ — сопротивление русла реки, м; a — уровнепроводность водоносного горизонта, м²/сут; $B = \sqrt{(kmm'/k')}$ — параметр перетекания, м; k, m, k', m', k'', m'' — коэффициент фильтрации (м/сут) и мощность (м) водоносного горизонта, слабопроницаемого слоя и подрусловых отложений соответственно.

Колебания уровней воды в р. Дунай были учтены путем разбиения гидрографа реки на ступени и последующим применением к уравнению (1) принципа суперпозиции:

$$s = \sum_{j=1}^{n_j} \{(s_j^0 - s_{j-1}^0) f[r, (t - t_j)]\}, \quad (2)$$

где $f(r, t)$ — функция, описывающая изменение УПВ в наблюдательной скважине; n_j — количество ступеней изменения уровня в реке на момент времени t_j ; s_j^0 — величина j -й ступени изменения уровня в реке ($s_0^0 = 0$), м; t_j — время начала j -й ступени ($t_j = 0$), сут.

Для интерпретации были выбраны ряды данных мониторинга продолжительностью 4 года (с 2009 по 2012 г). Уровень воды в р. Дунай измерялся ежесуточно, а уровни воды в скважинах, оборудованных фильтрами на слой гравия, изме-

рялись с частотой 1 раз в 2 нед. Используя уравнение (1) и (2), при заданной функции колебаний уровней воды в реке рассчитывались флуктуации уровня (реакция) воды в гидрогеологических скважинах, расположенных на разном удалении от нее. В аналитическом решении варьировали параметрами сопротивления русла реки, перетекания и пьезопроводности до тех пор, пока расчетные уровни воды в скважинах не совпадали с фактически измеренными (рис. 5). По результатам интерпретации было установлено, что величина сопротивления русла реки (ΔL) лежит в диапазоне от 100 до 200 м. Это свидетельствует об относительно хорошей гидравлической связи между подземными и поверхностными водами на территории строительной площадки, расположенной в долине р. Дунай.

Гидрогеологическая схематизация сильно неоднородного разреза по характеру распределения напоров с глубиной

В обустроенных на площадке ярусных гидрогеологических скважинах было проанализировано распределение напоров подземных вод с глубиной. Удалось установить, что в большинстве случаев на глубинах 14 и 24 м подземные воды имеют единую пьезометрическую поверхность, т.е. уровни воды в скважинах устанавливаются на одной и той же глубине (см. рис. 2, рис. 6). При вскрытии скважинами более глубоких ин-

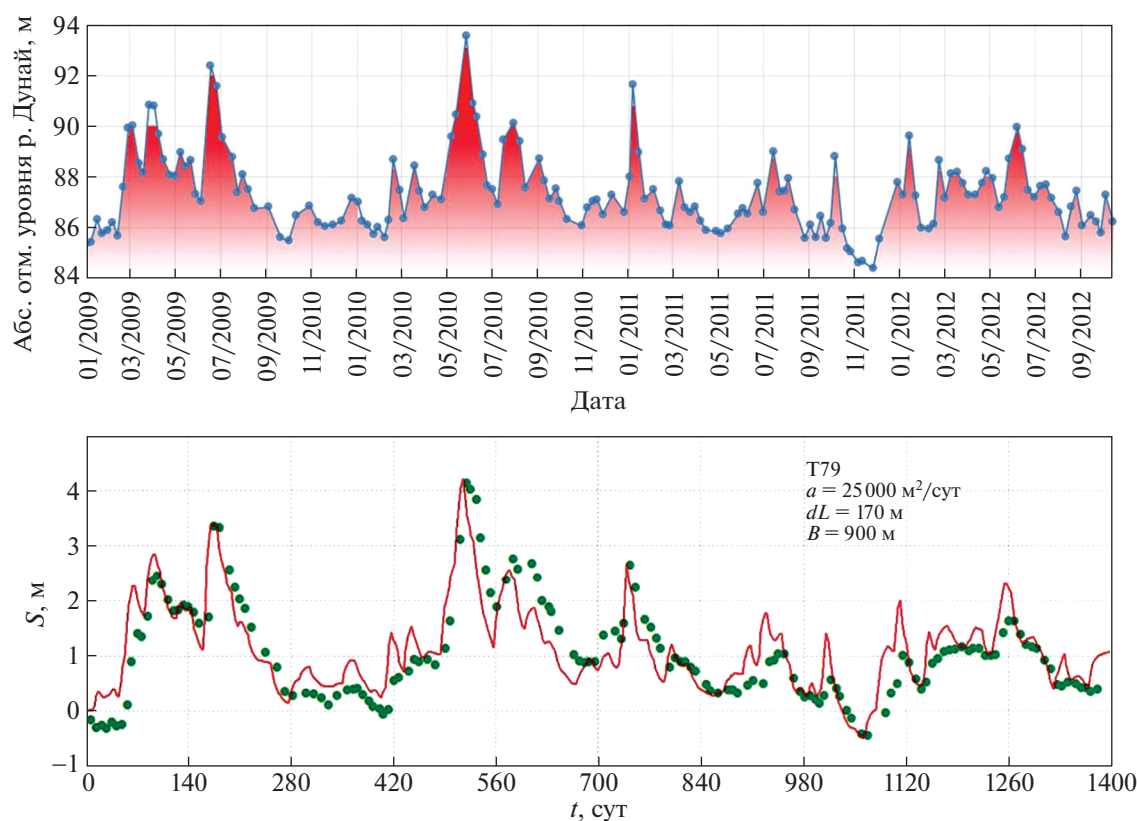


Рис. 5. Оценка гидравлической связи подземных и поверхностных вод по данным режимных наблюдений.

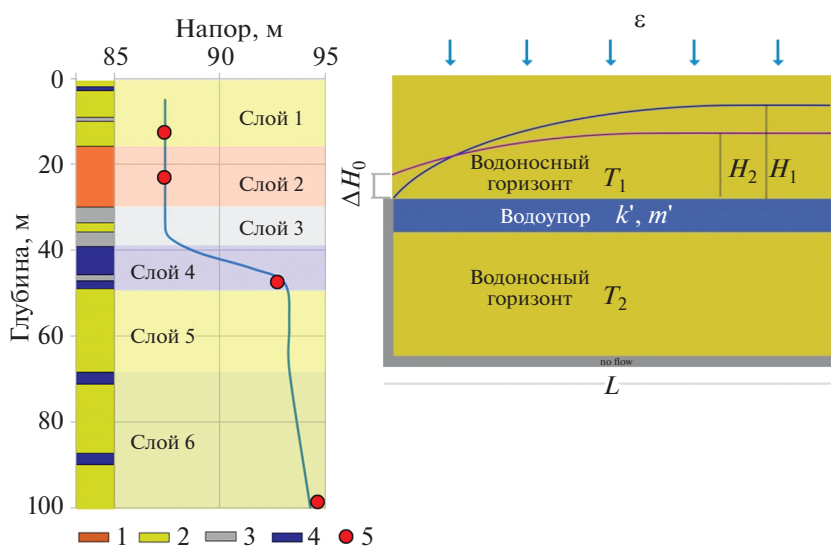


Рис. 6. Особенности распределения напоров подземных вод в слоистой толще: а – распределение фактических напоров по глубине в кусте скважин III-6; б – схема формирования разницы напоров. Условные обозначения: 1 – гравий, 2 – пески средние, 3 – пески мелкие, 4 – глина, 5 – наблюдаемый напор подземных вод.

тервалов (паннонских слоев) происходит подъем уровней воды в стволе, т.е. проявляется напорность. В среднем, пьезометрическая поверхность

воды в глубоких скважинах (49 м и глубже) устанавливается на 4–6 м выше, чем в неглубоких скважинах (см. рис. 6). Такое разное поведение

ние уровней свидетельствует о наличии водоупорного слоя в разрезе на территории площадки в интервале глубин от 24 до 49 м.

Разница напоров в слоистой толще в зоне разгрузки определяется целым комплексом параметров: величиной инфильтрационного питания, соотношением проводимостей водоносных горизонтов и коэффициентом фильтрации разделяющего слоя. Разница напоров может быть описана уравнением (3) [1].

$$\Delta H_0 \approx \varepsilon L \sqrt{\frac{m' T_2}{k' T_1 (T_1 + T_2)}}, \quad (3)$$

где ΔH_0 — разница напоров, м; ε — инфильтрационное питание, м/сут; L — длина от водораздела до зоны разгрузки, м; k' — коэффициент фильтрации и мощность (m') разделяющего слоя, м; T_1 , T_2 — проводимость верхнего и нижнего водоносных горизонтов, м²/сут.

Согласно рис. 6 и уравнению (3), при прочих равных условиях, различия в напорах между двумя водоносными горизонтами будут определяться коэффициентом фильтрации разделяющего слоя: чем он больше, тем меньше разница напоров. В соответствии с (3) был оценен эффективный вертикальный коэффициент фильтрации водоупорного слоя, который составил 1.9×10^{-4} м/сут (при $\Delta H_0 = 5$ м, $L = 30$ км, $\varepsilon = 1.0 \times 10^{-4}$ м/сут, $m' = 15$ м, $T_1 = 2000$ м²/сут, $T_2 = 150$ м²/сут).

При более детальном рассмотрении распределения уровней воды в ярусных скважинах оказалось, что часть скважин не подчиняется ранее установленной закономерности. Так, в группе скважин, приуроченных к южной части площадки, избыточные напоры появляются не с 49 м, а только с глубин 99 м и ниже (см. рис. 2). Это свидетельствует о хорошей гидравлической связи аллювиальных отложений с подстилающими частями паннонского разреза в южной части площадки.

Таким образом, по характеру распределения уровней воды с глубиной в ярусных скважинах удалось установить, что в разрезе исследуемой площадки до глубин 100 м можно выделить как минимум две зоны, которые гидравлически слабо связаны между собой. Верхняя зона — зона грунтовых (безнапорных) вод. Она приурочена преимущественно к аллювиальным отложениям. В северной части строительной площадки безнапорные воды распространяются до глубин 30–40 м, а в южной части до глубин 90 м и более. Напорные воды отделены от грунтового горизонта водоупорным слоем, сложенным чередованием глинистых, супесчаных и песчаных разностей с эффективным коэффициентом фильтрации 2×10^{-4} м/сут.

Гидродинамическая томография водоносных пластов

Чтобы убедиться, что обнаруженный водоупорный интервал является выдержанным в плане, и в нем отсутствуют гидрогеологические окна, была проведена серия поинтервальных откачек из паннонской части разреза. Каждая откачка выполнялась из несовершенной по степени вскрытия скважины (длина фильтра 5 м). Во время откачки во всех наблюдательных скважинах мониторинговой сети площадки фиксировались уровни воды. В ходе эксперимента прослеживалась реакция от возмущающей скважины в наблюдательных на различном удалении, а также в разных интервалах глубин. Радиус гидродинамического влияния от откачивающей скважины превышал 1 км. Пример результатов гидродинамического прослеживания в плане и в разрезе приведен на рис. 7 и 8 соответственно.

По результатам гидродинамической томографии удалось установить следующее.

1. Опробуемый напорный водоносный горизонт можно схематизировать как неограниченный в плане. Это подтверждается симметричной формой депрессионной воронки и квазистационарным режимом откачки.

2. Субгоризонтальная кровля водоупора, залегающая на глубинах 30–35 м, резко погружается в южной части площадки строительства АЭС. Область погружения коррелирует с зоной распространения региональной линейной дислокации Дунасентдёрдь-Харта. Таким образом, зона перегиба глинистого слоя ассоциируется с северо-западным бортом грабена.

3. Несмотря на сильную неоднородность водоупорного слоя (чередование линз глин, супесей, песков) и его значительную тектоническую деформацию в области перегиба, он проявляет признаки выдержанного в плане изолирующего (водоупорного) слоя. Это подтверждается отсутствием признаков перетекания на графиках временного прослеживания $s:lg(t)$ и отсутствием реакции в наблюдательных скважинах, оборудованных на верхние интервалы разреза. Таким образом, откачки подтвердили, что деформация глинистого слоя носит пликтивный (без нарушения сплошности) характер.

4. Откачки показали, что в южной части площадки над основным водоупором в паннонской толще также выделяется серия более тонких выдержанных водоупорных глинистых слоев (см. рис. 8). Из-за особенностей тектонической структуры эти глинистые слои срезаются (выклиниваются) аллювиальными отложениями в районе южной границы площадки АЭС Пакш-2. Ввиду близости к зоне выклинивания, паннонская толща над основным водоупором имеет единую пьезометрическую поверхность с безнапорным водоносным горизонтом.

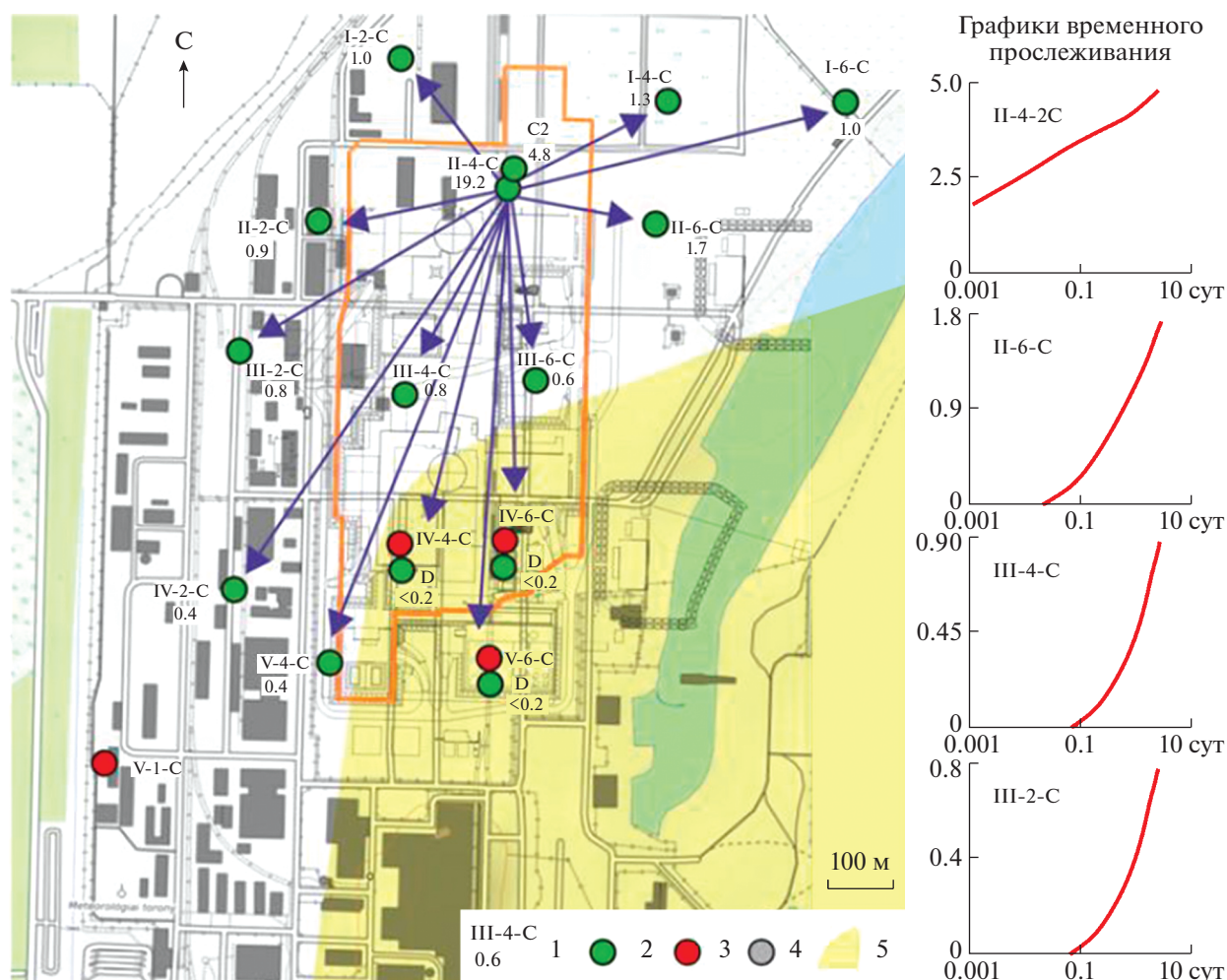


Рис. 7. Реакция мониторинговой сети скважин на гидродинамическое возмущение. Вид в плане. Условные обозначения: 1 – номер скважины и максимальное понижение (м), глубина установки фильтра для скважин с индексом: С – 49 м, D – 99 м.; реакция скважины на откачку: 2 – отреагировала, 3 – не отреагировала; 4 – нет данных; 5 – область погружения водоупора.

5. Длительные кустовые откачки позволили уточнить фильтрационные параметры основных водоносных горизонтов и водоупорных слоев.

Обобщая результаты бурения инженерно-геологических скважин, а также интерпретации данных по распределению уровней воды и гидродинамической томографии, в разрезе строительной площадки были выделены границы основных водоносных горизонтов и водоупорных слоев, построена геологическая модель (рис. 9). Полученные границы в дальнейшем заверялись на гидродинамической модели.

Гидрогеологическое моделирование

В гидродинамической модели были заданы границы основных водоносных горизонтов и во-

доупоров. Дополнительно внутри каждого из выделенных слоев имитировалась литологическая неоднородность методом последовательного гауссовского моделирования (SISIM [4]) в соответствии с фактическими данными геологического бурения скважин (рис. 10). Внутри воссозданного поля фильтрационной неоднородности воспроизводились длительные откачки. Было показано, что расчетные понижения в наблюдательных скважинах соответствовали наблюдаемым. Также на модели был воспроизведен естественный режим подземных вод с учетом влияния колебаний уровней воды в р. Дунай и особенностей распределения напоров с глубиной.

Таким образом, результаты интерпретации данных по УПВ и гидродинамической томографии позволили “расшифровать” гидрогеологиче-

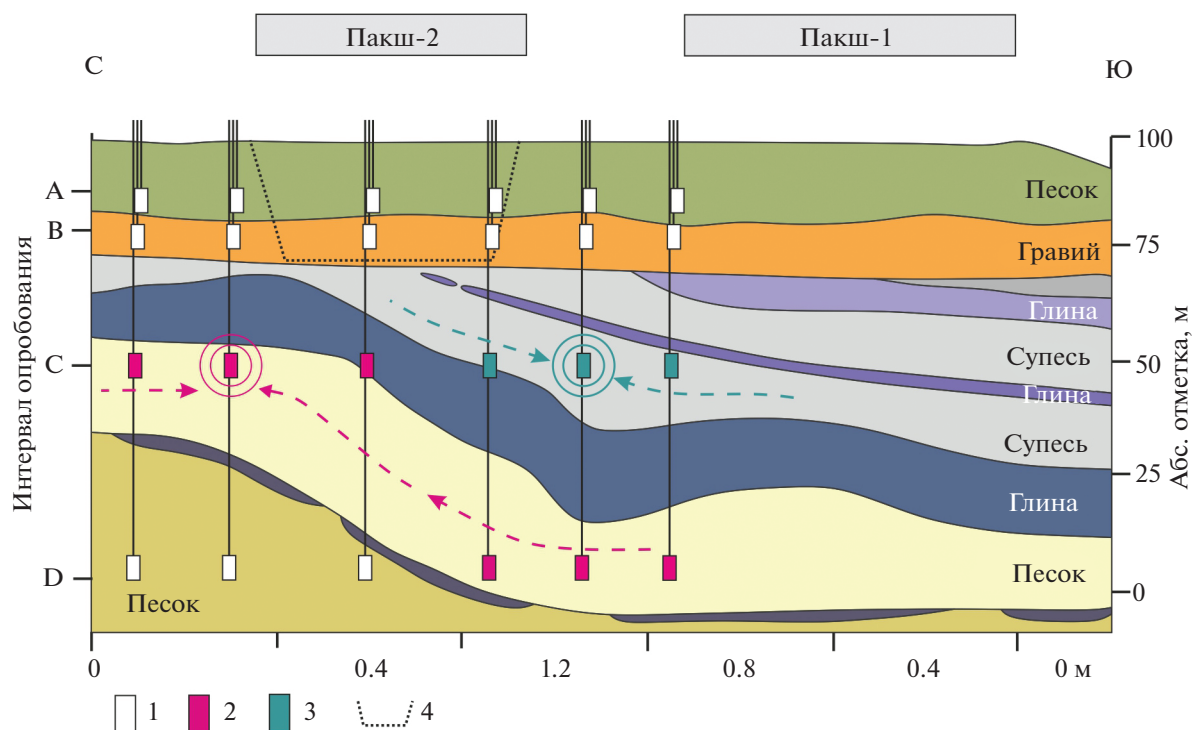


Рис. 8. Схематический разрез, характеризующий реакцию отдельных интервалов на откачку на территории АЭС Пакш-1 и АЭС Пакш-2. Условные обозначения. Интервал: 1 — не отреагировавший на откачку; 2–3 — отреагировавшие на откачку из: 2 — верхнего горизонта, 3 — нижнего горизонта; 4 — контур котлована.

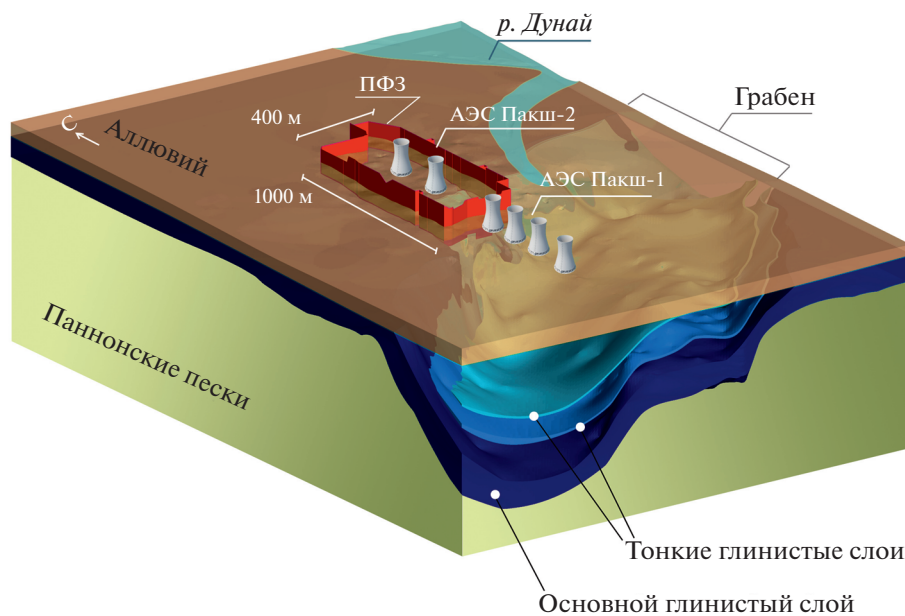


Рис. 9. Трехмерная геологическая модель с выделением основных водоносных горизонтов и водоупорных слоев.

скую структуру на площадке строительства АЭС Пакш-2. А воспроизведение наблюдаемых эффектов на модели дало возможность верифици-

ровать структуру первоначально выделенных водоносных слоев и водоупоров в условиях сильной литологической неоднородности разреза.

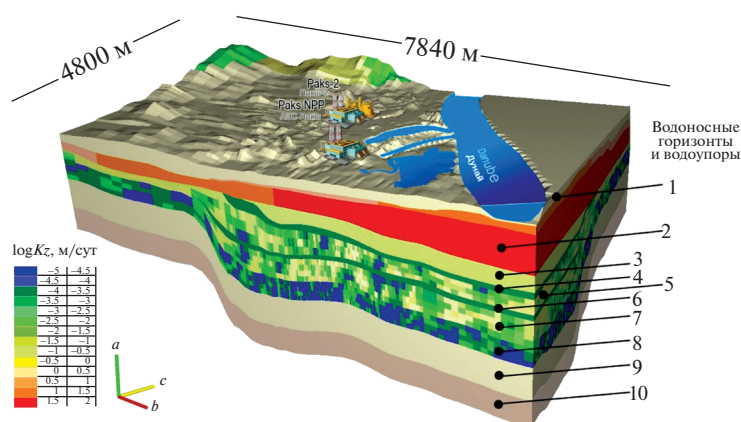


Рис. 10. Распределение фильтрационной неоднородности в гидрогеологической модели. 1–10 – порядковый номер водоносного горизонта либо водоупорного слоя.

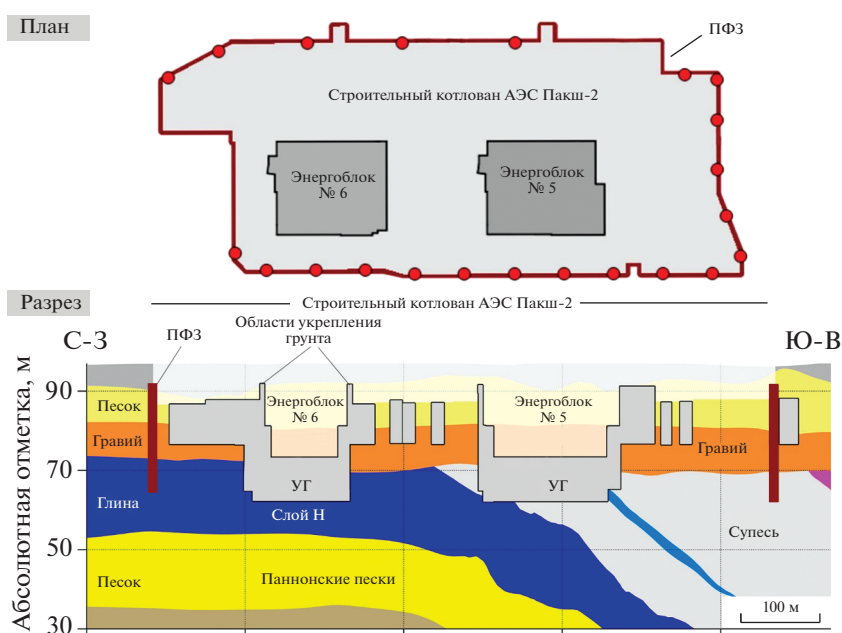


Рис. 11. Конфигурация ПФЗ на площадке АЭС Пакш-2 в плане и разрезе.

В дальнейшем на верифицированной гидрогеологической модели проводились расчеты эффективности водозащитных мероприятий. Рассматривалась возможность организации ПФЗ по контуру строительного котлована в двух вариантах:

1) заглубление ПФЗ на 1 м в основной глинистый слой, а глубина стены ПФЗ должна была составлять 32 м в северной части площадки и более 80 м в южной части площадки АЭС Пакш-2;

2) строительство несовершенной по степени вскрытия ПФЗ глубиной 32 м по всему периметру (рис. 11).

Результаты гидродинамических расчетов показали, что строительство протяженной ПФЗ, ориентированной поперек потока подземных вод, приведет к эффекту подпора. Несмотря на строительный водоотлив, уровни воды с внешней стороны на западной границе ПФЗ поднимутся на несколько метров. Незначительный подъем уровней воды будет также наблюдаться в север-

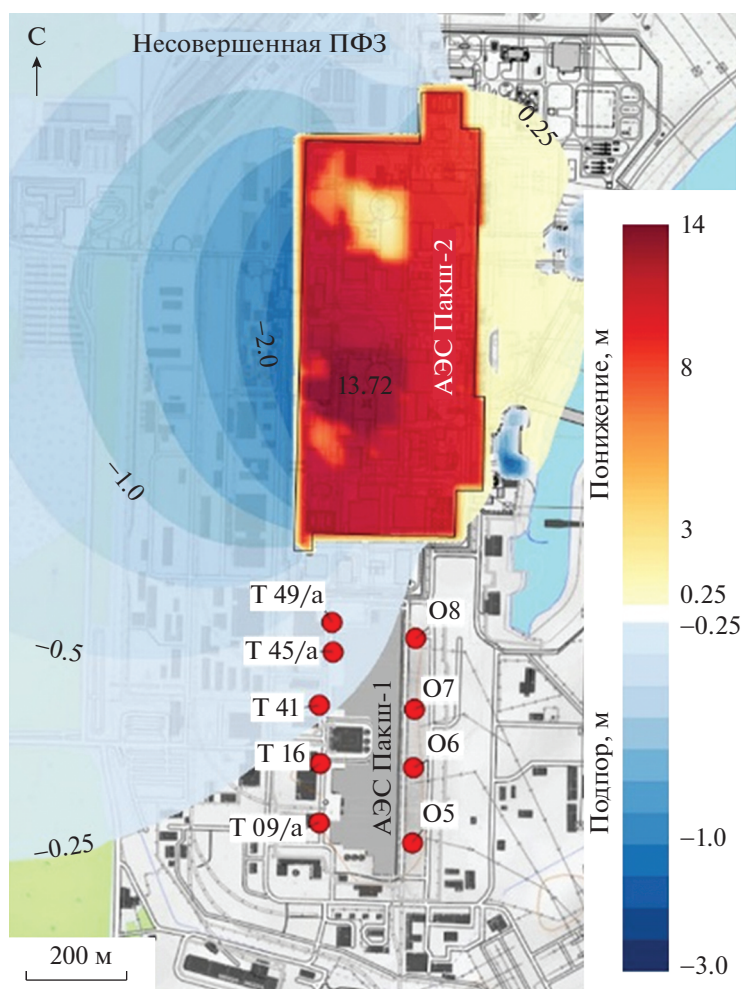


Рис. 12. Расчетные изменения УПВ при строительстве котлована АЭС Пакш-2 при различных конфигурациях ПФЗ.

ной части площадки действующей АЭС Пакш-1 (рис. 12). Из-за особенностей гидрогеологических условий гидродинамическое воздействие от строительного водопонижения на АЭС Пакш-1 будет сопоставимо как при совершенной, так и при несовершенной ПФЗ. Средние водопритоки в строительный котлован при совершенной ПФЗ составят $1500 \text{ м}^3/\text{сут}$, а при несовершенной $2300 \text{ м}^3/\text{сут}$.

Для верификации полученных модельных прогнозов на строительной площадке был организован тестовый участок ПФЗ. Он представлял собой уменьшенный аналог большого контура ПФЗ котлована. Его глубина составила 32 м, а размеры в плане $8 \times 8 \text{ м}$. Тестовый ПФЗ был расположен в самом неблагоприятном месте с точки зрения гидрогеологии — на южной границе площадки АЭС Пакш-2, т.е. там, где основной водопор опускается на глубину 90 м. Откачка из несовершенного по степени вскрытия тестового

ПФЗ подтвердила низкие водопритоки, которые были спрогнозированы на модели.

На основании выполненных расчетов было принято решение по строительству ПФЗ, несовершенной по степени вскрытия.

ВЫВОДЫ

На примере площадки строительства АЭС Пакш-2 было продемонстрировано, что в условиях сильной литологической неоднородности разреза, интерпретация исходных данных может быть крайне неоднозначной и многовариантной. На рис. 13 приведена эволюция представлений о геометрии основного водоупорного слоя на территории строительной площадки за период с 2014 по 2021 г. Лишь только применение специализированных видов работ и комплексирование всей имеющейся исходной информации позволило достоверно установить положение водоупорно-

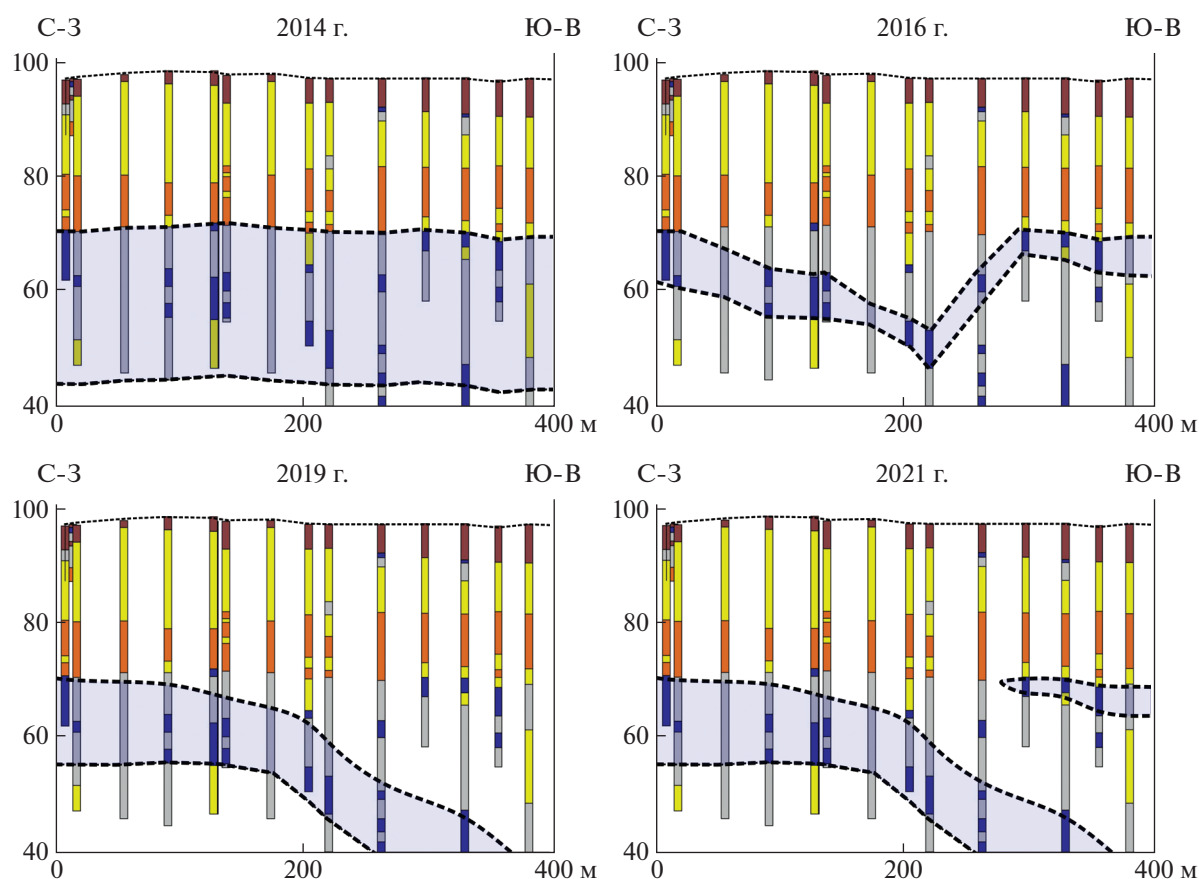


Рис. 13. Эволюция представлений о геометрии основного водоупорного слоя на территории площадки строительства АЭС Пакш-2 за период 2014–2021 гг.

го слоя, а также обосновать его изолирующие свойства.

Геофильтрационная модель была использована как эффективный инструмент, который позволил подтвердить корректность интерпретации структуры фильтрационных потоков, а также обосновать наиболее подходящее проектное решение для защиты действующей АЭС от гидродинамического воздействия строительного водоотлива.

Авторы выражают благодарность сотрудникам Венгерского филиала АО «Атомстройэкспорт» (С. Кудрину и С. Пушкареву), АО «Оргэнергострой» (С. Ляскому), а также венгерским коллегам дирекции строящейся АЭС Пакш-2 (Paks II Ltd.) Т. Шидлу и М. Золтану.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бочеввер Ф.М., Гармонов И.В., Лебедев А.В., Шестаков В.М. Основы гидрогеологических расчетов. М.: Недра, 1969. 368 с.
2. Синдаловский Л.Н. Гидрогеологические расчеты с использованием программы ANSDIMAT. СПб.: Наука, 2021. 891 с.
3. Терцаги К., Пек Р. Механика грунтов в инженерной практике. М.: Госстройиздат, 1958. 607 с.
4. Alabert F. Stochastic imaging of spatial distributions using hard and soft information. Master's thesis. Stanford University. 1987. 198 p.
5. Berg S. Comparison of Hydraulic Tomography with Traditional Methods at a Highly Heterogeneous Site // Groundwater. 2011. V. 53. P. 71–89.
6. Evans D.W., Pool D.R. Aquifer Compaction and Ground-Water Levels in South-Central Arizona // U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations Report. 1999. 57 p.
7. Haas J. Geology of Hungary. Springer. 2013. 265 p.
8. Illaman W.A. Hydraulic Tomography in Fractured Granite: Mizunami Underground Research site, Japan // Water Resources Research. 2009. V. 45. 18 p.
9. Luo N., Zha Y., Park Y.J., Berg S.J. Three-dimensional hydraulic tomography analysis of long-term municipal wellfield operations: Validation with synthetic flow and solute transport data // Journal of Hydrology. 2020. V. 590(3). 15 p.

10. Niswonger R.G., Panday S., Ibaraki M. MODFLOW-NWT. A Newton formulation for MODFLOW-2005. U.S. Geological Survey. 2011. 56 p.
11. Teloglou I.S., Bansal R.K. Transient solution for stream-unconfined aquifer interaction due to time varying stream head and in the presence of leakage // Journal of Hydrology. 2012. V. 428–429. 12 p.
12. Zhao Z., Illman W.A. Improved high-resolution characterization of hydraulic conductivity through inverse modeling of HPT profiles and steady-state hydraulic tomography: Field and synthetic studies // Journal of Hydrogeology. 2022. V. 612. 14 p.
13. Zhao Z., Illman W.A., Zha Y. et al. Transient Hydraulic Tomography Analysis of Fourteen Pumping Tests at a Highly Heterogeneous Multiple Aquifer–Aquitard System // Water. 2019. V. 11 (9). 18 p.
14. Zhao Z. Geostatistical analysis of high-resolution hydraulic conductivity estimates from the hydraulic profiling tool and integration with hydraulic tomography at a highly heterogeneous field site // Journal of Hydrogeology. 2023. V. 617. P. 18.

FIELD AND MODEL RESEARCH OF THE GROUNDWATER FLOWS IN THE AREA OF THE PAKS-2 NPP CONSTRUCTION, HUNGARY

A. M. Nikulenkov^{a,b,#}, O. I. Novitskaya^c, V. G. Rumynin^{a,b}, M. V. Vil'kina^{a,b},
A. A. Shvarts^{a,b}, and L. N. Sindalovskii^{a,b}

^aSt. Petersburg Division, Sergeev Institute of Environmental Geoscience, Russian Academy of Sciences,
Srednii pr. 41, St. Petersburg, 199004 Russia

^bSt. Petersburg State University,
Universitetskaya nab. 13, St. Petersburg, 199034 Russia

^cSt. Petersburg State University,
Savushkina ul. 82, St. Petersburg, 197183 Russia

[#]E-mail: annik@hgepro.ru

The construction of the nuclear power plant (NPP) requires conducting a large number of engineering and hydrogeological surveys, as well as assessment of the design decisions' safety. A deep excavation pit at the Paks II NPP construction site requires execution of the cut-off wall due to extremely high groundwater saturation of the alluvial deposits. However, lithological anisotropy and the presence of dislocation zones did not allow identifying the appropriate depth for the cut-off wall construction. Unfortunately, engineering geological boreholes with a 20-meter distance between them and surface and borehole geophysical surveys could not identify the hydrogeological units. Thus, to conceptualize the hydrogeological settings, an analysis of the groundwater head distribution and the large-scale pumping tests were conducted. The interpretation of the geological data and the distinguishing of the hydrogeological units were carried out iteratively using the hydrogeological numerical model. The flow model could represent the hydraulic head distribution, the response of the lithologically heterogeneous layers to the water fluctuations in the Danube river, and the pumping tests carried out at the different depths. The results of the hydrogeological modeling revealed the aquitard to be continuous throughout the territory; however, its top's depth changes from 30–35 to 90 m within the construction site of the Paks II NPP. This complex geometry of the aquitard is controlled by the plicated dislocation zone, which cuts the construction site in half and is revealed as the right wall of the graben. Correct hydrogeological stratification enabled us to ensure waterproof activities such as the cut-off wall construction using the hydrogeological model when excavating a deep pit for the Paks II NPP. This also minimizes the hydrodynamic impact on the closely located NPP Paks in operation.

Keywords: hydrogeological survey, hydraulic tomography, flow modeling, NPP construction

REFERENCES

1. Bochever, F.M., Garmonov, I.V., Lebedev, A.V., Shestakov, V.M. [Fundamentals of hydrogeological calculations]. Moscow, Nedra Publ., 1969, 368 p. (in Russian)
2. Sindalovskii, L.N. [Hydrogeological calculations using ANSDIMAT software]. St. Petersburg, Nauka Publ., 2021, 891 p. (in Russian)
3. Terzaghi, K., Pek, R. [Rock mechanics in engineering practice]. Moscow, Gosstroizdat Publ., 1958, 607 p. (in Russian)
4. Alabert, F. Stochastic imaging of spatial distributions using hard and soft information. Master's thesis. Stanford University. 1987, 198 p.
5. Berg, S. Comparison of hydraulic tomography with traditional methods at a highly heterogeneous site. *Groundwater*, 2011, vol. 53, pp. 71–89.
6. Evans, D.W. Pool, D.R. Aquifer compaction and ground-water levels in South-Central Arizona. U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations Report, 1999, P. 57.
7. Haas, J. Geology of Hungary. Springer Publ., 2013, 265 p.

8. Illman, W.A. Hydraulic Tomography in Fractured Granite: Mizunami Underground Research site, Japan. *Water Resources Research*, 2009, vol. 45, p. 18.
9. Luo, N., Zha, Y. Park, Y.J., Berg, S.J. Three-dimensional hydraulic tomography analysis of long-term municipal wellfield operations: Validation with synthetic flow and solute transport data. *Journal of Hydrology*, 2020, vol. 590, 15 p.
10. Niswonger, R.G., Panday, S., Ibaraki, M. MODFLOW-NWT. A Newton formulation for MODFLOW-2005. U.S. Geological Survey, 2011, 56 p.
11. Teloglou, I.S., Bansal, R.K. Transient solution for stream-unconfined aquifer interaction due to time varying stream head and in the presence of leakage. *Journal of Hydrology*, 2012, vol. 428–429, 12 p.
12. Zhao, Z. Illman, W.A. Improved high-resolution characterization of hydraulic conductivity through inverse modeling of HPT profiles and steady-state hydraulic tomography: Field and synthetic studies. *Journal of Hydrogeology*, 2022, vol. 612, 14 p.
13. Zhao, Z., Illman, W.A. Zha, Y. Yeh, T.C.J., Mok, C.M.B., Berg, S.J., Han, D. Transient hydraulic tomography analysis of fourteen pumping tests at a highly heterogeneous multiple aquifer–aquitard system. *Water*, 2019, vol. 11 (9), 18 p.
14. Zhao, Z. Geostatistical analysis of high-resolution hydraulic conductivity estimates from the hydraulic profiling tool and integration with hydraulic tomography at a highly heterogeneous field site. *Journal of Hydrogeology*, 2023, vol. 617, 18 p.