



ПОЛЕВЫЕ И МОДЕЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОНИЦАЕМОСТИ ГЛИНИСТОЙ ТОЛЩИ ЗОНЫ ДИСЛОКАЦИИ В РАЙОНЕ СТРОИТЕЛЬСТВА АЭС «ПАКШ-2», ВЕНГРИЯ

М.В. ВИЛЬКИНА^{1,2*}, А.М. НИКУЛЕНКОВ^{1,2}, В.Г. РУМИНИН^{1,2}, М.М. ЧЕРЕПАНСКИЙ³

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

² ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет»
7—9, Университетская набережная, г. Санкт-Петербург 199034, Россия

³ ФГБОУ ВО «Российский государственный геологоразведочный университет им. Серго Орджоникидзе»
23, Миклухо-Маклая ул., г. Москва 117485, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Строительство атомной электростанции подразумевает возведение глубокого котлована, что может быть затруднено в условиях сильнообводненных грунтов. Одним из способов ограничить водопиток в строительный котлован является возведение противofильтрационной завесы. Как правило, основание завесы ПФЗ заглубляют до отметок водоупора, однако наличие в нем гидрогеологических окон может негативно отразиться на эффективности такого проектного решения.

Цель. Установить характер деформации глинистого слоя вдоль региональной зоны дислокации на площадке строительства АЭС «Пакш-2».

Материалы и методы. Для изучения сплошности слоя глин был использован обширный комплекс геолого-гидрогеологических методов. Он включал бурение и анализ свыше тысячи инженерно-геологических скважин с отбором керна, комплекс наземной и скважинной геофизики, создание многоуровневой мониторинговой сети скважин за наблюдением уровня подземных вод, проведение опытно-фильтрационных работ, а также методы численного гидрогеологического моделирования.

Результаты. Исследование показало, что наличие большого числа скважин не гарантирует достаточного количества информации для схематизации гидрогеологических условий. Установление сплошности глинистого слоя с амплитудой вертикального смещения в сто метров стало возможным благодаря вероятностному анализу на численной модели и проведению комплекса гидрогеологических исследований, нацеленных на подтверждение или опровержение результатов моделирования.

Заключение. Интерпретация гидрогеологических условий на объектах повышенной ответственности, таких как атомные электростанции, подземные выработки, карьеры, влияет на безопасность и экономическую целесообразность проекта. В условиях недостаточности или отсутствия представлений о геологическом строении территории комплекс гидрогеологических методов может служить самостоятельным источником недостающей информации.

Ключевые слова: противofильтрационная завеса, гидродинамическая томография, гидрогеологическое моделирование, пликтивная структура, строительство АЭС, зона дислокации

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Финансирование: исследование не имело спонсорской поддержки.

Для цитирования: Вилькина М.В., Никуленков А.М., Румынин В.Г., Черепанский М.М. Полевые и модельные исследования проницаемости глинистой толщи зоны дислокации в районе строительства АЭС «Пакш-2», Венгрия. *Известия высших учебных заведений. Геология и разведка*. 2024;66(2):49—59. <https://doi.org/10.32454/0016-7762-2024-66-2-49-59>

Статья поступила в редакцию 15.04.2024
Принята к публикации 15.05.2024
Опубликована 28.06.2024

* Автор, ответственный за переписку

FIELD AND MODEL INVESTIGATIONS OF CLAY LAYER PERMEABILITY IN THE AREA OF PAKS II NPP CONSTRUCTION

MARIIA V. VILKINA^{1,2,*}, ANTON M. NIKULENKOV^{1,2}, VYACHESLAV G. RYMUNIN^{1,2},
MIKHAIL M. CHEREPANSKY³

¹ St. Petersburg Division of the E.M Sergeev Institute of Environmental Geology of the Russian Academy of Sciences
41, Sredny Avenue V.O., St. Petersburg 199004, Russia

² St. Petersburg State University
7—9, Universitetskaya embankment, St. Petersburg 199034, Russia

³ Russian State University for Geological Prospecting
23, Miklukho-Maklaya str., Moscow 117997, Russia

ABSTRACT

Background. The construction of a nuclear power plant inevitably requires excavation of a deep pit. This task may be impeded by high groundwater levels. The groundwater inflow into the pit can be limited by erecting a cut-off wall. As a rule, the cut-off wall is deepened to the aquitard elevation; however, the presence of hydrogeological windows therein may reduce the efficiency of such a solution.

Aim. To determine the nature of clay layer deformation along the regional dislocation area of the Paks II NPP construction site.

Materials and methods. A comprehensive geological and hydrogeological study was carried out to identify the continuity of the clay layer. This included an analysis of core samples from more than 1000 engineering and geological boreholes, surface and borehole geophysical surveys, a multi-level borehole network for groundwater level monitoring, as well as numerical hydrogeological modelling.

Results. It was found that extensive borehole data does not always guarantee the sufficiency of information for mapping the hydrogeological settings. The continuity of the clay layer with a vertical displacement amplitude of 100 meters was established through a probabilistic analysis using a numerical model and a set of hydrogeological surveys aimed at confirming or refuting the modeling results.

Conclusion. Assessment of hydrogeological conditions when implementing high-risk projects, such as nuclear power plants, underground excavations, and open-pit quarries, determines their safety and economic feasibility. In the absence or inconsistency of geological structure knowledge, hydrogeological surveys can serve as an independent source of missing information.

Keywords: cutoff wall, hydraulic tomography, hydrogeological modeling, fold structure, NPP construction, dislocation area

Conflict of interest: the authors declare no conflict of interest.

Financial disclosure: no financial support was provided for this study.

For citation: Vilkina M.V., Nikulenkova A.M., Rymunin V.G., Cherepansky M.M. Field and model investigations of clay layer permeability in the area of Paks II NPP construction. *Proceedings of higher educational establishments. Geology and Exploration*. 2024;66(2):49—59. <https://doi.org/10.32454/0016-7762-2024-66-2-49-59>

Manuscript received 15 April 2024
Accepted 15 May 2024
Published 28 June 2024

* Corresponding author

На начало 2024 года в Евросоюзе насчитывалось 100 действующих энергоблоков на территории 12 стран, производящих до четверти всей электроэнергии, потребляемой регионом [5]. Четыре из них расположены на венгерской атомной электростанции (АЭС) «Пакш». Проект АЭС «Пакш-2» подразумевает строительство двух дополнительных энергоблоков (ЭБ) в 100 м к северу от действующей АЭС «Пакш». Чтобы ограничить водоприток в строительный котлован глубиной 23 м и минимизировать гидродинамическое влияние на уже действующую АЭС «Пакш», было принято решение о возведении противофильтрационной завесы (ПФЗ) по контуру строительного котлована. Максимальная эффективность ПФЗ может быть достигнута путем заглубления ограждающих конструкций (стен ПФЗ) до глубины выдержанного водопора. А наличие гидрогеологических окон в водупорном слое является осложняющим фактором, который необходимо учитывать при проектировании водозащитных мероприятий [13]. Таким образом, **в рамках данного исследования** изученность гидрогеологического строения

определяет безопасность строящейся АЭС «Пакш-2» и действующей АЭС «Пакш».

Гидрогеологическая схематизация изучаемой территории определена структурными особенностями геологического строения и может быть представлена в следующем виде (рис. 1).

1. Четвертичный безнапорный водоносный горизонт, субгоризонтально залегающий у поверхности земли в интервале абсолютных отметок от 97,1 до 80,0 м, сложен аллювиальными песками, гранулометрический состав которых с глубиной увеличивается от пылеватого до гравийного.

2. Верхне-неогеновый напорно-безнапорный водоносный горизонт, заполняющий переслаивающимися глинистыми и супесчаными отложениями грабенообразную структуру.

3. Неогеновый глинистый слой мощностью 10—15 м.

4. Нижне-неогеновый (паннонский) напорный водоносный горизонт, сложенный песками.

Подробно гидрогеологическое строение и характеристика фильтрационных свойств приведены в [4].

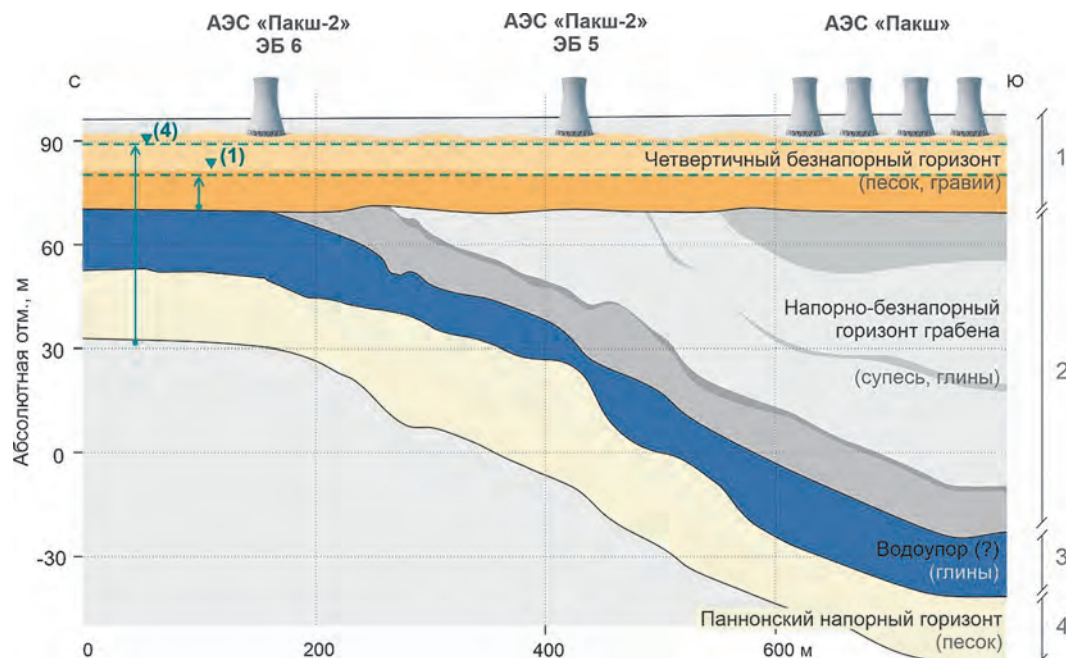


Рис. 1. Схематичный геолого-гидрогеологический разрез через площадку строительства АЭС «Пакш-2»
Fig. 1. Schematic geological and hydrogeological cross-section across the construction site of the Paks II NPP

Имеющийся слой глин рассматривается в качестве потенциального основания для заглубления ПФЗ. По данным, полученным в ходе бурения и комплекса геофизических работ на территории строительства новых энергоблоков, стало известно о резко невыдержанной отметке залегания глин, варьирующей от +70 до -30 абс. м. Согласно геологическим представлениям о строении территории данная структура была сформирована в результате тектонических смещений по региональной зоне дислокации Дунасентдьердь — Харта, пересекающей площадку строительства в районе проектируемого пятого энергоблока. Примечательно, что вертикальное смещение толщ фиксируется лишь в отложениях неогенового возраста, что дает основание заключить об отсутствии сейсмической опасности в регионе.

Столь масштабная (стометровая) амплитуда вертикального смещения могла привести к нарушению сплошности глинистого слоя. Исчерпывающий теоретический и литературный обзор влияния тектонических нарушений на структуру фильтрационного потока приведен в работе [9]. В общем виде на площадке строительства «АЭС Пакш-2» возможны три концептуальных схематизации деформации глинистого слоя (рис. 2):

1. Вертикальное перемещение без нарушения сплошности глинистого слоя (пликативная структура).

2. Вертикальное смещение с серией разрывных нарушений небольшой амплитуды.

3. Вертикальное перемещение с нарушением сплошности слоя (дизъюнктивная структура).

Работы, проведенные в рамках настоящего исследования, были нацелены на установление принадлежности гидрогеологического строения к одной из предложенных схематизаций. Обзор используемых для этого методов приведен ниже.

Материалы и методы

Целью настоящего исследования являлось установление не только геометрии глинистого слоя, но и его водоупорных свойств. Для этого был проведен комплекс геолого-гидрогеологических исследований, основные методы которого перечислены в настоящем разделе.

1. Бурение инженерно-геологических скважин

Для детализации глинистого слоя на площадке строительства АЭС «Пакш-2» была создана инженерно-геологическая сеть наблюдений, насчитывающая более 1000 скважин глубиной от 20 до 150 м. Чтобы определить амплитуду и геометрию вертикального смещения вдоль зоны

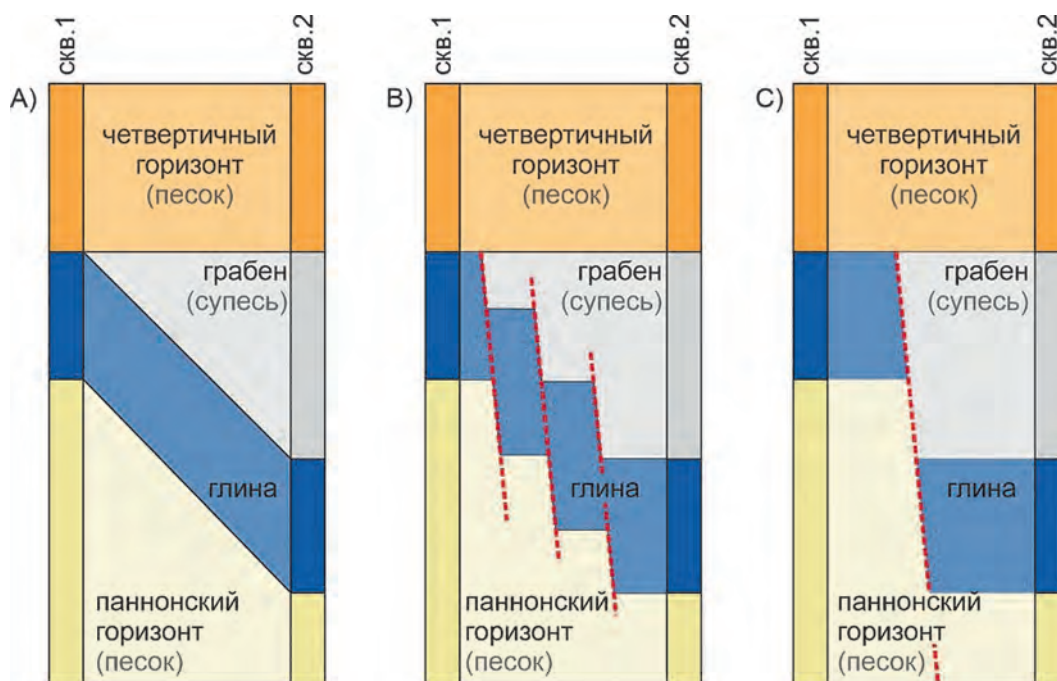


Рис. 2. Концепции деформации глинистого слоя в зоне дислокации: А — разрыв отсутствует; В — разрыв локальный; С — протяженный разрыв

Fig. 2. Concepts of the clay layer deformations in the fault zone: A) no discontinuity; B) local discontinuity; C) regional discontinuity

Дунасентдьердь — Харта, расстояние между скважинами не превышало 20 м. В скважинах проводилось детальное описание кернового материала, была разработана система маркирующих горизонтов, проведено статическое зондирование более чем в 500 точках, выполнен комплекс скважинной и наземной геофизики включая методы вертикального электрического зондирования, межскважинного сейсмического просвечивания и многие другие [4].

2. Мониторинг за уровнем подземных вод

Часть скважин, пробуренная в рамках инженерно-геологических изысканий, в дальнейшем была использована для создания мониторинговой сети за наблюдением уровня подземных вод. Так, на территории площадки были организованы многоуровневые кусты гидрогеологических скважин, оборудованные на верхний (четвертичный) и нижний (паннонский) водоносные горизонты (рис. 3).

Наблюдательная сеть скважин служит источником информации о распределении напоров в плане и по глубине. Очевидно, что разница напоров между двумя водоносными горизонтами, разделенными водоупором, будет тем больше, чем

изолирующие свойства водоупора совершеннее. Количественно данная зависимость в зоне разгрузки подземных вод может быть выражена следующим образом [2, 6]:

$$\Delta H_0 = \varepsilon L \sqrt{\frac{m'T_2}{k'T_1(T_1 + T_2)}}, \quad (1)$$

где ΔH_0 — разница напоров, м; ε — величина инфильтрационного питания, м/сут; L — длина от водораздела до зоны разгрузки, м; k' — коэффициент фильтрации (м/сут) и мощность m' (м) разделяющего слоя; $T_1 = k_1m_1$, $T_2 = k_2m_2$ — проводимость верхнего и нижнего водоносных горизонтов соответственно, м²/сут; k , m — коэффициент фильтрации (м/сут) и мощность (м) водоносного горизонта.

3. Опытнo-фильтрационные работы

Для количественного и качественного анализа фильтрационных свойств разделяющего слоя глин в нижнем (паннонском) водоносном горизонте были проведены четыре откачки длительностью от 5 до 7 суток с постоянным расходом от 150 до 370 м³/сут. При этом 44 скважины многоуровневой мониторинговой сети использовались

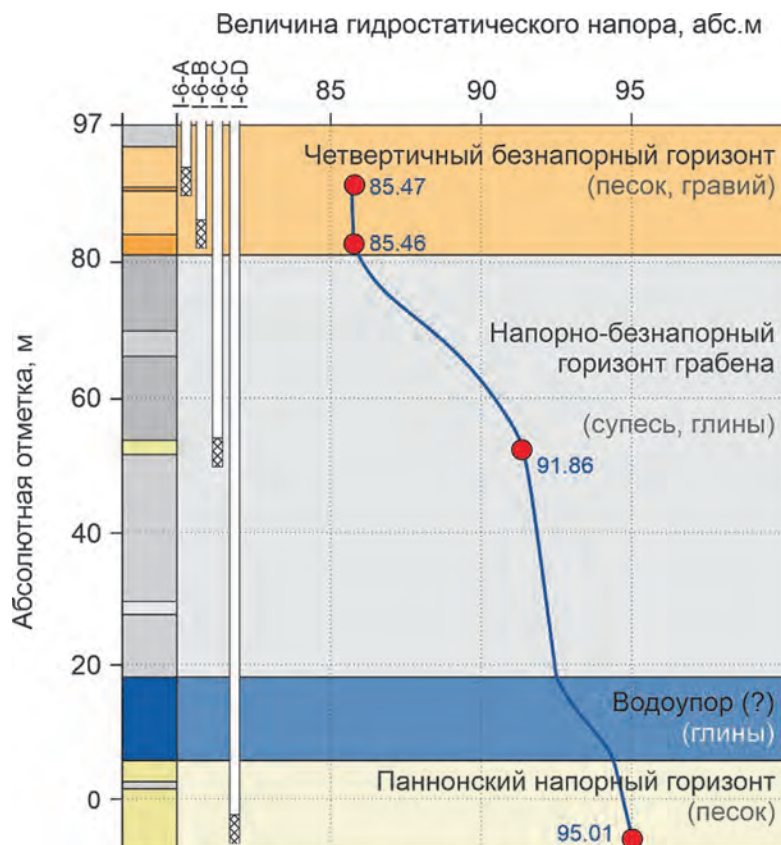


Рис. 3. Распределение фактических напоров по глубине в многоуровневом кусте скважин I-6

Fig. 3. Distribution of the observed hydraulic heads with depth in a multi-level wells cluster

для пространственного анализа гидродинамического возмущения, создаваемого откачкой по всей глубине.

На качественном уровне интерпретировать результаты подобных откачек можно с помощью индикаторного признака: наличия или отсутствия понижения на откачку из смежного водоносного горизонта. Данный алгоритм также получил название гидродинамической томографии [8, 12].

Количественная оценка приводилась с помощью графиков временного $S - \lg(t)$ прослеживания по схеме неограниченного плано-однородного пласта (решение C.V. Theis, 1935 [11], (2)), а также по схеме пласта с перетеканием с поддержанием постоянного напора в смежном пласте (решение Hantush—Jacob, 1955 [10], (3)):

$$s = \frac{Q}{4\pi T} W\left(\frac{r^2}{4at}\right); \quad (2)$$

$$s = \frac{Q}{4\pi T} W\left(\frac{r^2}{4Tt}, \frac{r}{B}\right) = \frac{Q}{4\pi T} W\left(\frac{r^2}{4at}, \frac{r}{B}\right), \quad (3)$$

$$W(u, \beta) = \int_u^\infty \frac{1}{\tau} \exp\left(-\tau - \frac{\beta^2}{4\tau}\right) d\tau,$$

$$B = \sqrt{\frac{Tm'}{k'}},$$

где s — понижение в наблюдательной скважине, м; Q — расход опытной скважины, м³/сут; $T = km$ — проводимость основного водоносного горизонта, м²/сут; k, m, S — коэффициент фильтрации (м/сут), мощность (м) и водоотдача (–) основного водоносного горизонта; $a = T/S$ — пьезопроводность основного водоносного горизонта, м²/сут; B — параметр перетекания для одного смежного пласта, м; k' — коэффициент фильтрации (м/сут) и мощность m' (м) слабопроницаемого слоя; r — расстояние от опытной до наблюдательной скважины, м; t — время от начала откачки, сут; $W(u, \beta)$ — функция влияния скважины с учетом перетекания [7].

Отметим, что решение Hantush—Jacob (3) стремится к решению Theis (2), если параметр перетекания стремится к бесконечности, $B \rightarrow \infty$. Данное замечание отвечает физическому смыслу: когда перетекание из смежного горизонта отсутствует, гидрогеологические условия можно схематизировать до однородного, выдержанного в плане водоносного горизонта.

4. Численное моделирование

Методы численного моделирования значительно расширяют возможности вероятностного анализа строения гидрогеологической среды [3]. Так,

на откалиброванной гидрогеологической модели с помощью открытого программного кода MODFLOW сравнивались три концепции деформации глинистого слоя: 1) сплошной водоупор без разрывных нарушений (пликативная структура); 2) локальное разрывное нарушение в водоупоре и 3) протяженное линейное разрывное нарушение (дизъюнктивная структура) (рис. 2). Нарушение сплошности глинистого слоя имитировалось путем задания в модельные блоки (которые расположены вдоль линий дислокаций) повышенного коэффициента фильтрации. Критерием достоверности результатов моделирования служила фактически наблюдаемая разница напоров между верхним (четвертичным) и нижним (паннонским) водоносными горизонтами.

Результаты

Густая сеть пробуренных инженерно-геологических скважин значительно расширила представления о геологическом строении территории, однако не позволила сделать вывод о характере деформации глинистого слоя.

Многоуровневые кусты наблюдательных скважин на площадке АЭС «Пакш-2» стали источником информации о распределении уровней подземных вод по глубине (рис. 3). Разница уровней подземных вод между нижним (паннонским) и верхним (четвертичным) водоносными горизонтами рассматривается как косвенный признак водоупорных свойства разделяющего слоя глин. Данные, полученные в ходе гидрогеологического мониторинга за уровнем подземных вод, использовались для анализа разницы уровня подземных вод в плане. Фактическая разница в напоре (рис. 4А) сравнивалась с результатами модельных расчетов, выполненных для трех сценариев сплошности глинистого слоя (рис. 4В, С, D).

Сравнительный анализ показывает, что наличие протяженной зоны разрыва в глинистом слое (рис. 4D) существенно меняет гидрогеологический режим паннонского горизонта: на участках разрыва сплошности водоупора уровни в нем снижаются. Это приводит к сокращению разницы напоров между четвертичным и паннонским горизонтами до 2—3 м (рис. 4D) по сравнению с фактическими 4—5 м (рис. 4D). На этом основании сценарий с протяженной зоной разрыва был исключен из дальнейшего рассмотрения.

Фактическое распределение разницы напоров (рис. 4А) в целом отвечает модельному сценарию с отсутствием разрыва в сплошности глинистого слоя (рис. 4В). При этом нельзя

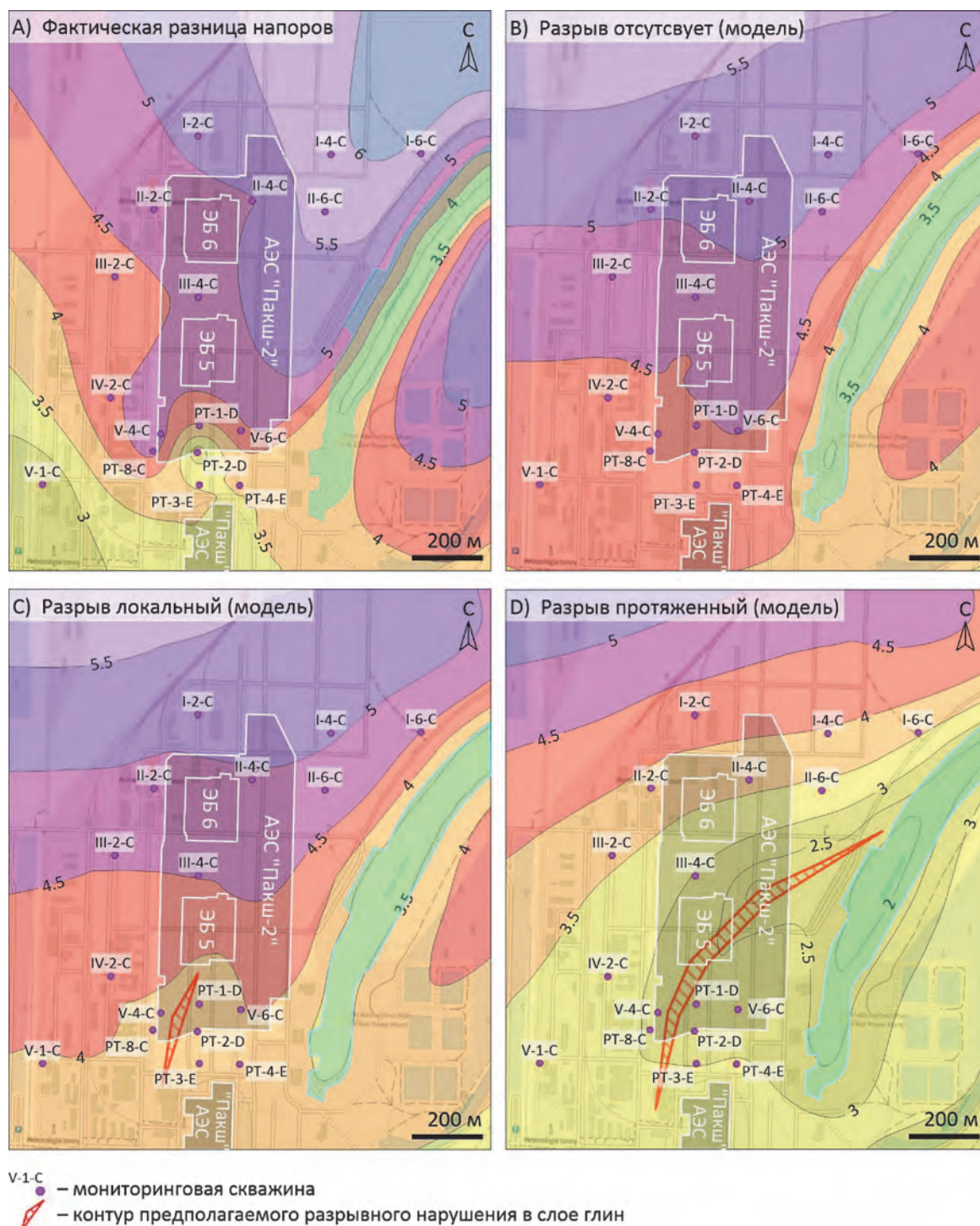


Рис. 4. Карта разницы напора между нижним (паннонским) и верхним (четвертичным) водоносными горизонтами: А — фактическая на площадке строительства по данным мониторинга; В — модельная для сценария без разрыва сплошности в глинистом слое; С — модельная для сценария с локальным разрывом сплошности в глинистом слое; D — модельная для сценария с выдержанным разрывом сплошности в глинистом слое
Fig. 4. Map of the hydraulic head difference between the bottom (pannonian) and upper (quaternary) aquifers: A) observed at the construction site based on the monitoring data; B) model for the no discontinuity scenario; C) model for the local discontinuity scenario; D) model for the regional discontinuity scenario

оставить без внимания аномально низкую разницу в напорах, фиксирующуюся в районе скважины РТ-2-D (рис. 4А). Данная «аномалия» может быть вызвана перетоком через гидрогеологическое окно, образовавшимся в результате вертикального смещения глинистого слоя амплитудой 100 м. Данный сценарий отвечает модельному прогнозу, отображенному на рисунке 4С (локальный разрыв). Однако данное предположение не нашло подтверждения при анализе данных откачки из скважины РТ-2-D.

Качественная интерпретация пятидневной откачки из скважины РТ-2-D с расходом 230 м³/сут показала, что ни в одной наблюдательной скважине, оборудованной на интервал выше кровли глинистого слоя, понижения уровня подземных вод зарегистрировано не было. В то же время все скважины, расположенные под глинистым слоем, демонстрируют схожую между собой реакцию на откачку (рис. 5А). Кривые понижения описываются прямолинейным участком без выполаживания, что свидетельствует об отсутствии перетекания из смежного водоносного горизонта.

Количественная интерпретация откачки включала аппроксимацию данных понижения аналитическим решением Theis (2) [1]. Полученные таким образом значения проводимости и пьезопроводности для каждой скважины затем подставлялись

в решение Hantush—Jacob (3) для оценки потенциального параметра перетекания и, как следствие, коэффициента фильтрации разделяющего водоупора (рис. 5В). Обработка откачек проводилась в программном комплексе ANSDIMAT [7].

Из данных, представленных на графиках, видно, что понижения хорошо описываются аналитическим решением для выдержанного в плане водоносного горизонта, что подтверждает вывод о сплошности глинистого слоя (рис. 6). Оценка коэффициента фильтрации слабопроницаемого слоя (слоя глин) по решению Hantush—Jacob дает значения порядка 1,5Е-04 м/сут (рис. 5В), что в целом соответствует оценкам в 2,3 Е-04 м/сут, полученным по формуле (1) (при $\Delta H_0 = 5$ м; $\epsilon = 0,00025$ м/сут; $L = 3000$ м; $m' = 10$ м; $T_1 = 900$ м/сут; $T_2 = 80$ м/сут).

Заключение

Атомные электростанции являются объектом повышенной ответственности, что предполагает наличие большого количества исходных данных, в том числе данных бурения скважин, исчисляющихся несколькими сотнями, а в отдельных случаях тысячами единиц. Данное обстоятельство, тем не менее, не гарантирует достаточности информации для схематизации гидрогеологических условий, тогда как в условиях повышенного риска

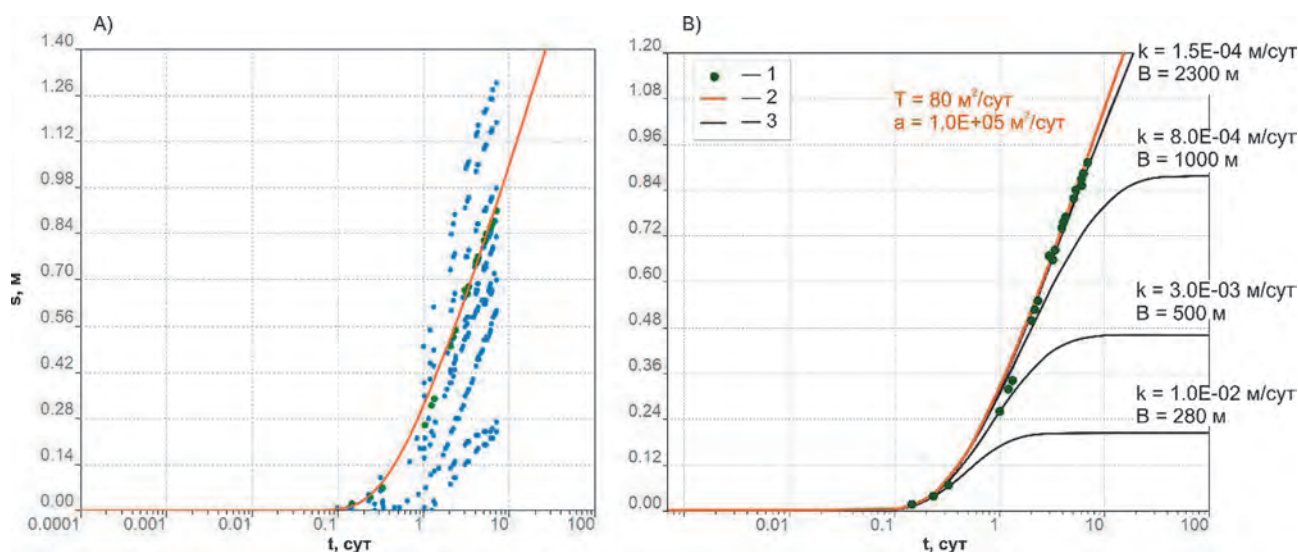


Рис. 5. Графики фактического понижения уровня подземных вод во время откачки из скважины РТ-2-D: А — в группе скважин, оборудованных на паннонский горизонт; В — в одной из скважин с примером аналитической обработки и оцененными параметрами перетекания В (1 — фактические замеры уровня; 2 — решение Theis, [11] (2); 3 — решение Hantush—Jacob [10], (3))

Fig. 5. Graphs of the observed groundwater drawdown during the pumping test in the РТ-2-D well: А) in a group of wells screened to the pannonian aquifer; В) in a single well with an example of the analytical interpretation and evaluated leakage factor В (1 — observed drawdown levels; 2 — Theis solution [11] (2); 3 — Hantush—Jacob solution [10], (3))

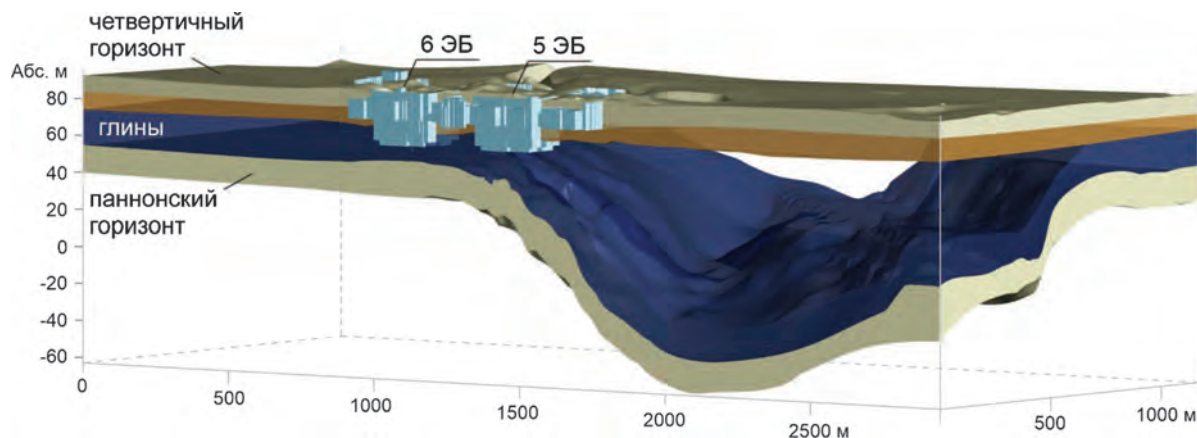


Рис. 6. Трехмерная геологическая модель грабенообразной структуры с выдержанным слоем глин в районе проектируемого пятого энергоблока АЭС «Пакш-2»

Fig. 6. Three-dimensional geological model of the fault structure and continuous clay layer under the designed nuclear island 5 of the Paks NPP

обоснованное выделение гидрогеологических единиц отвечает за экономическую составляющую объекта и его безопасность.

Настоящее исследование является наглядным примером эффективности комплексного подхода для изучения гидрогеологической среды. Последовательный анализ информации из различных источников позволил методично исключить из рассмотрения концепции гидрогеологического строения, не удовлетворяющие фактическим

данным. Так, с помощью данных мониторинговой сети удалось установить отсутствие выдержанного разрыва сплошности в глинистом слое, а с помощью данных многоуровневых откачек исключить наличие локальных гидрогеологических окон. Результаты гидрогеологического моделирования верифицировали интерпретацию натурных данных.

ЛИТЕРАТУРА

1. Боровский Б.В., Самсонов Б.Г., Язвин Л.С. Методика определения параметров водоносных горизонтов по данным откачек. М.: Недра, 1979. 326 с.
2. Бочеввер Ф.М., Гармонов И.В., Лебедев А.В., Шестаков В.М. Основы гидрогеологических расчетов. М.: Недра, 1969. 365 с.
3. Капырин И.В. Расчетные коды для гидрогеологического моделирования в задачах оценки безопасности ОИАЭ // Радиоактивные отходы. 2022. № 2(19). С. 105—118.
4. Никуленков А.М., Новицкая О.И., Румынин В.Г., Вилькина М.В., Шварц А.А., Синдаловский Л.Н. Экспериментальные и модельные исследования фильтрационных потоков в районе строительства АЭС «Пакш-2» (Венгрия) // Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология. 2023. № 6. С. 47—61.
5. Официальный сайт всемирной ядерной ассоциации. 2016. URL: <https://www.world-nuclear.org> (дата обращения: 19.02.2024).
6. Румынин В.Г. Геомиграционные модели в гидрогеологии. СПб.: Наука, 2011. 1158 с.
7. Синдаловский Л.Н. Гидрогеологические расчеты с использованием программы ANSDIMAT. СПб.: Наука, 2021. 891 с.
8. Berg S. Comparison of hydraulic tomography with traditional methods at a highly heterogeneous site // Groundwater. 2011. Vol. 53. P. 71—89.
9. Bense V., Gleesonb T., Loveless S., Bour O., Scibek J. Fault zone hydrogeology // Earth Science Review. Elsevier. 2013. Vol. 127. P. 171—192.
10. Hantush M.S., Jacob C.E. Non-Steady radial flow in an infinite leaky aquifer // Transactions, American Geophysical Union. 1955. Vol. 36, No. 1. P. 95—100.
11. Theis C.V. The relationship between the lowering of the piezometric surface and the rate and duration of discharge of a well using groundwater storage // Transactions, American Geophysical Union. 1935. Vol. 35. Pt. 2. P. 519—524.
12. 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. Elsevier. 2023. Vol. 617. P. 18.
13. Zhuang C., Zhan H., Xu X., Wang J., Zhou Z., Dou Z. Effects of aquitard windows on groundwater fluctuations within a coastal leaky aquifer system: An analytical and experimental study // Advances in Water Resources. Elsevier. 2023. Vol. 177. P. 15.

REFERENCES

1. Borevskiy B.V., Samsonov B.G., Yazvin L.S. Methodology for determining the parameters of aquifers based on pumping data. Moscow: Nedra, 1979. 326 p. (In Russian).
2. Bochever F.M., Garmonov I.V., Lebedev A.V., Shestakov V.M. Basics of the hydrogeological calculations. Moscow: Nedra, 1969. 365 p. (In Russian).
3. Kapyrin I.V. Computational codes for the hydrogeological modeling in the safety assessment of nuclear facilities // Radioactive wastes. 2022. Vol. 2(19). P. 105—118 (In Russian).
4. Nikulenkova A.M., Novitskaya O.I., Rumynin V.G., Vil'kina M.V. Shvarts A.A. Sindalovskii L.N. Field and model research of the groundwater flows in the area of the Paks-2 NPP construction // Hungary. Geocology, Engineering geology. Hydrogeology. Geocryology, 2023. No. 6. P. 47—61.
5. Website of the World Nuclear Association, 2016. Available from: <https://www.world-nuclear.org> (last accessed 19.02.2024).
6. Rumynin V.G. Subsurface solute transport models with application to groundwater hydrology. St. Petersburg: Nauka, 2011. 1158 p. (In Russian).
7. Sindalovskiy L.N. Aquifer Test Solutions A Practitioner's Guide with Algorithms Using ANSDIMAT. St. Petersburg: Nauka, 2021. 891 p. (In Russian).
8. Berg, S. Comparison of hydraulic tomography with traditional methods at a highly heterogeneous site // Groundwater. 2011. Vol. 53. P. 71—89.
9. Bense V., Gleeson T., Loveless S., Bour O., Scibek J. Fault zone hydrogeology // Earth Science Review. Elsevier. 2013. Vol. 127. P. 171—192.
10. Hantush M.S., Jacob C.E. Non-Steady radial flow in an infinite leaky aquifer // Transactions, American Geophysical Union. 1955. Vol. 36, no. 1. P. 95—100.
11. Theis C.V. The relationship between the lowering of the piezometric surface and the rate and duration of discharge of a well using groundwater storage // Transactions, American Geophysical Union. 1935. Vol. 35. Pt. 2. P. 519—524.
12. 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. Elsevier. 2023. Vol. 617. P. 18.
13. Zhuang C., Zhan H., Xu X., Wang J., Zhou Z., Dou Z. Effects of aquitard windows on groundwater fluctuations within a coastal leaky aquifer system: An analytical and experimental study // Advances in Water Resources. Elsevier. 2023. Vol. 177. P. 15.

ВКЛАД АВТОРОВ / AUTHOR CONTRIBUTIONS

Вилькина М.В. — внесла вклад в разработку концепции статьи, подготовила текст статьи, обработала результаты опытно-фильтрационных работ, визуализировала результаты численного моделирования, выполнила перевод на английский язык, утвердила публикуемую версию статьи и согласна принять на себя ответственность за все аспекты работы

Никулеников А.М. — разработал концепцию статьи, добавил и отредактировал текст, разработал численную фильтрационную модель, разработал концепт опытно-фильтрационных работ.

Румынин В.Г. — внес вклад в разработку концепции статьи, разработал концепции деформации глинистого слоя, разработал аналитическую зависимость для разницы напора в зоне региональной разгрузки.

Черепанский М.М. — внес вклад в разработку концепции статьи, общие правки статьи.

Mariia V. Vilkina — contributed to the development of the article concept, prepared the text of the article, analyzed the pumping tests' results, visualized the results of the numerical modeling, translated into English, approved the published version of the article and agrees to accept responsibility for all aspects of the work.

Anton M. Nikulenkova — develop the article concept, added and edited the text of the article, developed the numerical model, developed the concept of the pumping tests.

Vyacheslav G. Rymunin — contributed to the development of the article concept, developed the concepts of the clay layer deformation, developed an analytical solution of the hydraulic head difference in the discharge zone.

Mikhail M. Cherepansky — contributed to the development of the article concept, made general comments to the article.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Вилькина Мария Владимировна* — младший научный сотрудник Санкт-Петербургского отделения Института геоэкологии РАН, аспирант кафедры гидрогеологии ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет».

41, Средний проспект В.О., г. Санкт-Петербург 199004, Россия

7—9, Университетская набережная, г. Санкт-Петербург 199034, Россия

e-mail: wilkina.mari@hgepro.ru

SPIN-код: 7660-2571

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3687-7069>

Никуленков Антон Михайлович — кандидат геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник, заведующий лабораторией экспериментальной гидрогеологии и гидрогеомеханики Санкт-Петербургского отделения Института геоэкологии РАН.

41, Средний проспект В.О., г. Санкт-Петербург 199004, Россия

e-mail: annik@hgepro.ru

SPIN-код:

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5498-076X>

Румынин Вячеслав Гениевич — доктор геолого-минералогических наук, директор Санкт-Петербургского отделения Института геоэкологии РАН; профессор ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет», член-корреспондент РАН.

41, Средний проспект В.О., г. Санкт-Петербург 199004, Россия

7—9, Университетская набережная, г. Санкт-Петербург 199034, Россия

e-mail: rumynin@hgepro.ru

SPIN-код: 5695-387

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3928-0228>

Черепанский Михаил Михайлович — доктор геолого-минералогических наук, профессор ФГБОУ ВО «Российский государственный геологоразведочный университет им. Серго Орджоникидзе».

23, Миклухо-Маклая ул., г. Москва 117485, Россия

e-mail: vodamch@mail.ru

SPIN-код: 6148-5599

Mariia V. Vilkina* — junior research scientist of the Institute of the Environmental Geology of the RAS, PhD student in hydrogeology of Saint-Petersburg State University.

41, Sredny Avenue V.O., St. Petersburg 199004, Russia

e-mail: wilkina.mari@hgepro.ru

SPIN-code: 7660-2571

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3687-7069>

Anton M. Nikulenkov — Cand. Sci. (Geol.-Min.), Leading research scientist, head of experimental hydrogeology and hydrogeomechanics laboratory of the Institute of the Environmental Geology of the RAS.

41, Sredny Avenue V.O., St. Petersburg 199004, Russia

e-mail: annik@hgepro.ru

SPIN-code:

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5498-076X>

Vyacheslav G. Rymunin — Dr. Sci. (Geol.-Min.), director of the Institute of the Environmental Geology of the RAS; Professor of Saint-Petersburg State University, corresponding member of the RAS.

41, Sredny Avenue V.O., St. Petersburg 199004, Russia

7—9, Universitetskaya embankment, St. Petersburg 199034, Russia

e-mail: rumynin@hgepro.ru

SPIN-code: 5695-387

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3928-0228>

Mikhail M. Cherepansky — Dr. Sci. (Geol.-Min.), Professor of Russian State University for Geological Prospecting.

23, Miklukho-Maklaya str., Moscow 117997, Russia

e-mail: vodamch@mail.ru

SPIN-code: 6148-5599

* Автор, ответственный за переписку / Corresponding author