

Оригинальная статья

УДК 627.824.7:628.515:681.518

<https://doi.org/10.26897/1997-6011-2026-4-75-85>



АНАЛИЗ ДАННЫХ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПЬЕЗОМЕТРИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА ОГРАЖДАЮЩИХ ДАМБ ХВОСТОХРАНИЛИЩА ФОСФОГИПСА ПРИ ИХ НАРАЩИВАНИИ

А.А. Ткачев¹, А.И. Мокотова², Е.А. Волкова³, М.С. Медведев⁴

^{1,2,3,4}Новочеркасский инженерно-мелиоративный институт имени А.К. Кортунова – филиал Донского государственного аграрного университета; г. Новочеркасск, Российская Федерация

¹prof_al@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-8060-620X>

²ainekludova@yandex.ru

³katerina7tomashevich7@mail.ru; <https://orcid.org/0009-0007-6471-4490>

⁴arsgorobez@mail.ru

Аннотация. Цель исследований – на основе данных автоматизированного многоточечного мониторинга гидростатического давления и температуры подземных вод установить количественную структуру и динамику вертикального фильтрационного режима ограждающих дамб хвостохранилища фосфогипса и оценить фактический запас их фильтрационной прочности при поэтапном наращивании. Обработаны 42 и 53 замера по скважинам ГГ-1 и ГГ-2 за период ноября 2023 г. – сентября 2025 г., полученные многоточечными системами из четырех пьезорезистивных датчиков со встроенными термисторами и регистраторами САП-1М/GSM. Выполнены статистическая обработка рядов, расчет вертикальных градиентов по 6 измерительным интервалам, оценка относительной проницаемости слоев из условия неразрывности вертикального потока и сопоставление с критериями безопасности K_1 и $K_{пр}$. Установлен устойчивый нисходящий поток с полным перепадом напора 20,62 м (ГГ-1) и 22,47 м (ГГ-2); показано, что режим не является установившимся. В скважине ГГ-2 зарегистрирован переходный процесс: за 39 суток напоры в средней части намывного массива выросли на 7,85 и 7,48 м и рассеялись за 65 суток при реакции основания не более 0,61 м. В скважине ГГ-1 доля перепада напора на интервале «Кремнегель-сцементированный фосфогипс» возросла с 26,4 до 52,5% при снижении доли интервала с прослоем торфа с 51,0 до 21,6%. Термометрия независимо подтверждает различие участков: температура вод основания составляет 7,48°C в ГГ-1 против 12,56°C в ГГ-2. Минимальный запас до критерия K_1 3,12 м. Полученные оценки позволяют обосновать схему дренирования на участке ГГ-2, регламент опроса датчиков в период наращивания и параметризацию слоистой геофильтрационной модели.

Ключевые слова: ограждающие дамбы, хвостохранилище фосфогипса, автоматизированный мониторинг, гидростатическое давление, температурный режим, гидравлический градиент, переходный процесс, фильтрационная прочность, безопасность ГТС

Формат цитирования: Ткачев А.А., Мокотова А.И., Волкова Е.А., Медведев М.С. Анализ данных автоматизированного пьезометрического мониторинга ограждающих дамб хвостохранилища фосфогипса при их наращивании. Природообустройство. 2026;Т.19(4):75-85. <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2026-4-75-85>

Scientific article

ANALYSIS OF AUTOMATED PIEZOMETRIC MONITORING DATA FOR THE CONTAINMENT DAMS OF A PHOSPHOGYPSUM TAILINGS STORAGE FACILITY DURING THEIR RAISING

Tkachev A.A.¹, Mokotova A.I.², Volkova E.A.³, Medvedev M.S.⁴

^{1,2,3,4}Novocherkassk Engineering and Land Reclamation Institute named after A.K. Kortunov – branch of the Don State Agrarian University, Novocherkassk, Russian Federation

¹prof_al@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-8060-620X>

²ainekludova@yandex.ru

³katerina7tomashevich7@mail.ru; <https://orcid.org/0009-0007-6471-4490>

⁴arsgorobez@mail.ru

Abstract. *The purpose of the research* is to establish, from automated multipoint monitoring of hydrostatic pressure and groundwater temperature, the quantitative structure and dynamics of the vertical seepage

regime of the containment dams of a phosphogypsum tailings storage facility and to assess the actual reserve of their seepage strength during staged raising. *Materials and methods.* Forty-two and fifty-three readings from wells GG-1 and GG-2 covering November 2023 – September 2025 were processed; the data came from multipoint systems of four piezoresistive sensors with built-in thermistors and SAP-1M/GSM loggers. The work included statistical processing of the series, calculation of vertical hydraulic gradients for six measuring intervals, estimation of the relative permeability of the layers from the continuity condition of the vertical flow, and comparison with the design safety criteria K1 and Kpr. *Results.* A steady downward flow was established with a total head difference of 20.62 m (GG-1) and 22.47 m (GG-2); the regime was shown not to be steady. A transient process was recorded in well GG-2: over 39 days the heads in the middle of the mass rose by 7.85 and 7.48 m and dissipated over 65 days, while the response of the foundation did not exceed 0.61 m. In well GG-1 the share of head loss across the silica gel – cemented phosphogypsum interval increased from 26.4 to 52.5%, while the share of the interval containing the peat layer decreased from 51.0 to 21.6%. Thermometry independently confirms the difference between the sites: the foundation groundwater temperature is 7.48°C in GG-1 against 12.56°C in GG-2. The minimum reserve up to criterion K1 is 3.12 m. *Conclusions.* The estimates make it possible to substantiate the drainage layout in the GG-2 area, the sensor polling schedule during raising and the parameterisation of a layered seepage model.

Keywords: containment dams, phosphogypsum tailings storage facility, automated monitoring, hydrostatic pressure, thermal regime, hydraulic gradient, transient process, seepage strength, safety of hydraulic structures

For citation: Tkachev A.A., Mokotova A.I., Volkova E.A., Medvedev M.S. Analysis of automated piezometric monitoring data for the containment dams of a phosphogypsum tailings storage facility during their raising. *Prirodoobustroystvo*. 2026;19(4):75-85. (In Russ.) <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2026-4-75-85>

Введение. Поэтапное наращивание ограждающих дамб хвостохранилищ изменяет напряженно-деформированное состояние сооружения и положение кривой депрессии: рост порового давления снижает эффективные напряжения в скелете грунта и сопротивление сдвигу. Неконтролируемое изменение фильтрационного режима остается одной из доминирующих причин аварий [1], а стандарт GISTM требует перехода к риск-ориентированному управлению на основе данных наблюдений [2]. Традиционная сеть с ручными замерами месячной дискретности фиксирует лишь конечный результат медленных процессов и не позволяет разделить вклад отдельных слоев в общее фильтрационное сопротивление [3]. Автоматизированные многоточечные системы устраняют этот пробел, однако их данные чаще используются для констатации отсутствия превышения критериев безопасности [4, 6], тогда как количественная интерпретация: расчет послойных градиентов, оценка контраста проницаемости, параметризация расчетных моделей – выполняется редко, особенно для хвостохранилищ фосфогипса, материал которых претерпевает вторичную цементацию [7-10]. Между тем наибольшую опасность при наращивании представляют не сезонные изменения, а кратковременные процессы генерации избыточного порового давления, сопоставимые по длительности с интервалом между ручными замерами, а встроенные в датчики термисторы дают независимое

от пьезометрии поле для верификации выводов о фильтрации [9].

Цель исследований: на основе данных автоматизированного многоточечного мониторинга гидростатического давления и температуры подземных вод установить количественную структуру вертикального фильтрационного режима ограждающих дамб хвостохранилища фосфогипса и оценить фактический запас их фильтрационной прочности при поэтапном наращивании.

Задачи исследований:

- 1) выполнить статистическую обработку рядов наблюдений и установить характер их изменчивости во времени;
- 2) определить вертикальное распределение пьезометрических напоров и порового давления в теле дамбы и основании;
- 3) рассчитать вертикальные гидравлические градиенты по всем измерительным интервалам, выявить слои основного фильтрационного сопротивления и проследить их изменение за период наблюдений;
- 4) оценить относительную фильтрационную неоднородность разреза и привлечь данные термометрии для независимой проверки полученных выводов;
- 5) сопоставить фактические уровни с проектными критериями безопасности и определить запас;
- 6) сформулировать инженерные решения, вытекающие из установленных закономерностей.

Материалы и методы исследований.

Объект исследований – ограждающие дамбы действующего хвостохранилища фосфогипса I класса ответственности в районе г. Череповца Вологодской области, возводимые по намывной технологии с поэтапным наращиванием ярусов обвалования. Тело дамбы сложено фосфогипсом, свойства которого изменяются во времени: верхние слои не консолидированы, глубокие горизонты уплотнены и частично сцементированы вследствие вторичных физико-химических процессов. В разрезе присутствует также прослой кремнегеля – побочного продукта производства с низкой водопроницаемостью.

Геолого-литологическое строение разрезов, вскрытых скважинами, приведено на рисунке 1. Под техногенными грунтами залегают четвертичные аллювиальные пески, подстилаемые слабопроницаемыми суглинками. В разрезе скважины ГГ-1 на глубине 32,5-34,2 м вскрыт прослой торфа мощностью 1,7 м; в разрезе ГГ-2 он отсутствует, что и определяет различие фильтрационных условий на двух участках. Лабораторные определения физико-механических и фильтрационных характеристик не выполнялись, поэтому оценка фильтрационной неоднородности носит относительный характер.

Контрольно-измерительная аппаратура. Наблюдательная сеть объекта включает в себя традиционную сеть из 80 пьезометрических скважин в 28 контрольных створах (замеры электроуровнемером один раз в месяц) и автоматизированную подсистему, данные которой служат в качестве основы представленных исследований. Последняя развернута на базе скважин ГГ-1 и ГГ-2, пробуренных 20-22.11.2023 г. и 21-24.11.2023 г. вблизи существующих створов пьезометров. Каждая скважина обсажена фильтровой колонной и оборудована многоточечной системой из четырех автономных датчиков, глубины установки которых выбраны по литологическому строению массива: в скважине ГГ-1 датчик 56665 – на 13,0 м (фосфогипс слабый), 56694 – на 29,0 м (кремнегель), 56800 – на 32,0 м (сцементированный фосфогипс), 56887 – на 36,0 м (четвертичные пески); в скважине ГГ-2 датчики 57229 и 56670 – на 8,0 и 18,0 м (фосфогипс средней плотности), 56878 – на 28,0 м (сцементированный фосфогипс), 53026 – на 39,0 м (четвертичные пески). Гидравлическая изоляция точек измерения обеспечивается тампонами из гранулированного бентонита, исключаящими переток вдоль затрубного пространства, и именно она обеспечивает достоверность послойных градиентов.

Применены пьезорезистивные датчики гидростатического давления со встроенными термисторами: диапазон измерения давления составляет 0-100 м вод. ст. при пределе допускаемой погрешности $\pm 0,10$ м вод. ст., диапазон измерения температуры – от -20 до $+80^\circ\text{C}$ при погрешности $\pm 0,2^\circ\text{C}$. Сбор и передача данных осуществляются регистратором САП-1М/GSM (заводские номера 1022104 и 1022105); дискретность опроса – сутки.

Методика обработки данных. Абсолютная отметка пьезометрического уровня для каждого датчика рассчитывалась по формуле:

$$H_{\text{абс}} = H_{\text{изм}} + Z_{\text{дат}}, \text{ м}, \quad (1)$$

где $H_{\text{абс}}$ – абсолютная отметка пьезометрического уровня, м (Балтийская система высот); $H_{\text{изм}}$ – показание датчика (гидростатический напор), м вод. ст.; $Z_{\text{дат}}$ – абсолютная отметка установки датчика, м.

$$u = \gamma_{\text{в}} \cdot H_{\text{изм}}, \text{ кПа}, \quad (2)$$

где u – поровое давление, кПа; $\gamma_{\text{в}} = 9,81 \text{ кН/м}^3$ – удельный вес воды; $H_{\text{изм}}$ – показание датчика, м вод. ст.

Значение u входит непосредственно в критерий прочности Мора-Кулона в эффективных напряжениях (принцип Терцаги), связывающий результаты мониторинга с устойчивостью откосов [1, 5]:

$$\tau_f = c' + \sigma' \cdot \text{tg } \phi' = c' + (\sigma - u) \cdot \text{tg } \phi', \text{ кПа}, \quad (3)$$

где τ_f – сопротивление грунта сдвигу, кПа; c' – эффективное удельное сцепление, кПа; σ – полное нормальное напряжение, кПа, зависящее от высоты наращиваемого яруса; σ' – эффективное нормальное напряжение, кПа; ϕ' – эффективный угол внутреннего трения, град.

Из формулы (3) следует, что рост u при неизменном σ линейно снижает σ' и, соответственно, τ_f ; именно поэтому непрерывный контроль u является определяющим для оценки безопасности при наращивании. Вертикальный гидравлический градиент между соседними датчиками рассчитывался по формуле:

$$I = (H_1 - H_2) / L, \quad (4)$$

где I – вертикальный гидравлический градиент, безразмерная величина; H_1, H_2 – абсолютные отметки пьезометрических уровней на верхнем и нижнем датчиках соответственно, м; L – расстояние между датчиками по вертикали, м. Положительное значение соответствует нисходящей фильтрации, отрицательное – восходящей.

Для количественной оценки фильтрационной неоднородности разреза использовано условие неразрывности установившегося вертикального потока: при отсутствии источников и стоков удельный расход через все слои одинаков, $q = k_i \cdot I_i = \text{const}$, откуда относительный коэффициент фильтрации i -го

интервала по отношению к верхнему (опорному) интервалу –

$$k_i / k_1 = I_i / I_1, \quad (5)$$

где k_i , k_1 – коэффициенты фильтрации i -го и опорного интервалов, м/сут.; I_i , I_1 – соответствующие вертикальные градиенты.

Соотношение (5) позволяет по данным одного лишь пьезометрического мониторинга получить оценку контраста проницаемости слоев без отбора монолитов. Запас пьезометрического уровня до проектного критерия безопасности определялся как

$$\Delta H_{K1} = H_{K1} - H_{абс}, \quad (6)$$

где H_{K1} – абсолютная отметка пьезометрического уровня, отвечающая критерию безопасности первого уровня $K1$ (коэффициент устойчивости $k_{st} = 1,25$), м. Аналогично рассчитывался запас до предельного критерия $K_{пр}$ ($k_{st} = 1,0$). Значения H_{K1} и $H_{K_{пр}}$ приняты по Декларации безопасности ГТС для текущего этапа эксплуатации.

Результаты и их обсуждение. Характер рядов наблюдений. Ряды абсолютных отметок пьезометрических уровней приведены на рисунке 2, их статистические характеристики – в таблице 1. Массив включает в себя 42 замера

по скважине ГГ-1 и 53 по скважине ГГ-2; показания на даты оборудования скважин (22.11.2023 г. и 24.11.2023 г.) в обработку не включались, поскольку отражают уровень воды в незатампонированном стволе.

Полученные характеристики опровергают предположение о квазиустановившемся характере режима, которое можно было бы сделать по единичному срезу измерений. Датчики верхней зоны обеих скважин и датчики основания демонстрируют размах 1,18-2,65 м при СКО 0,22-0,83 м, что отвечает сезонным колебаниям, тогда как датчик 56800 в скважине ГГ-1 и датчики 56670 и 56878 в скважине ГГ-2 показывают размах 8,71-9,03 м при СКО 2,00-2,59 м – на порядок выше сезонного фона. Природа этих изменений в двух скважинах является различной.

Переходный процесс февраля 2025 г. в скважине ГГ-2. Наиболее выразительное событие за весь период наблюдений – кратковременный подъем напоров в средней части намывного массива скважины ГГ-2 (рис. 2б). За 39 суток, с 15.01.2025 г. по 23.02.2025 г., отметка уровня выросла на 7,85 м по датчику 56670 (18,0 м)

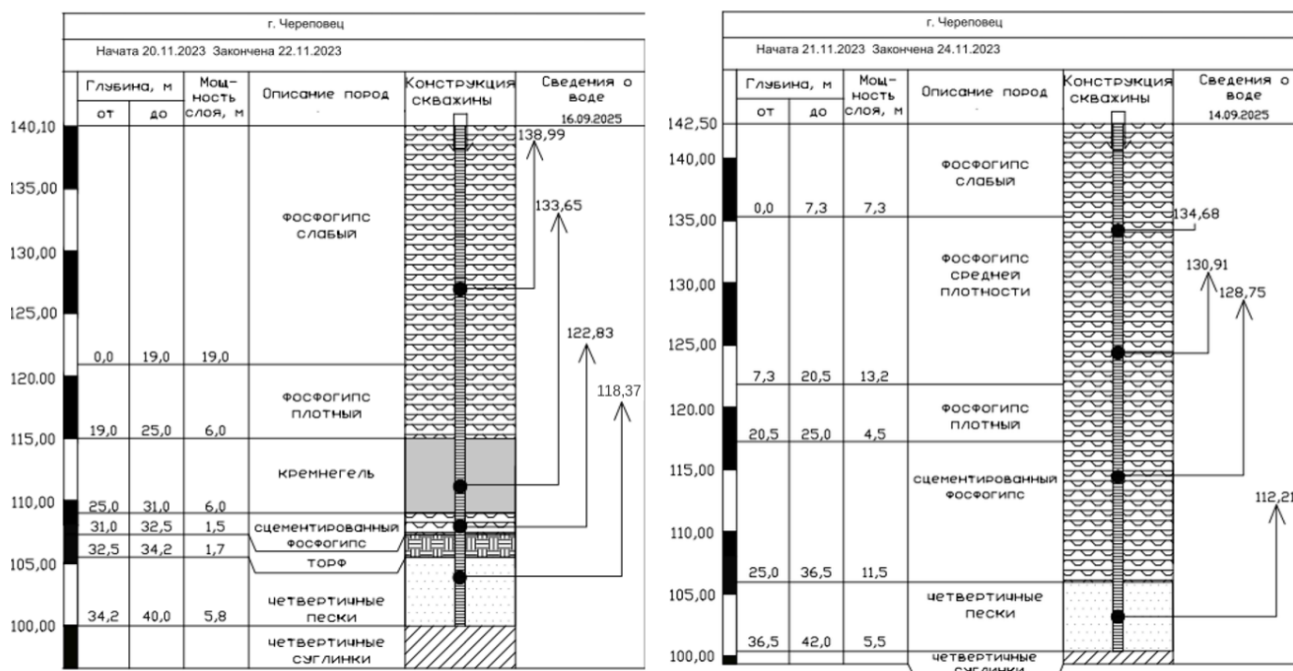


Рис. 1. Геолого-литологические разрезы скважин ГГ-1 (а) и ГГ-2 (б) с распределением пьезометрических уровней по глубине на 16.09.2025 г. и 14.09.2025 г.:

слева – шкала абсолютных отметок, м (Балтийская система высот);
в графах «Глубина, м» – границы и мощности литологических разностей;
в графе «Конструкция скважины» точками показаны места установки датчиков;
цифрами со стрелками указаны абсолютные отметки пьезометрических уровней, м

Fig. 2. Time series of absolute elevations of piezometric levels recorded by the sensors of wells GG-1 (a) and GG-2 (b) over the period XI.2023 – IX.2025.

Abscissa – date of observation; ordinate – absolute elevation of the piezometric level, m (Baltic height system); the legend gives the sensor serial number, installation depth and host lithological unit

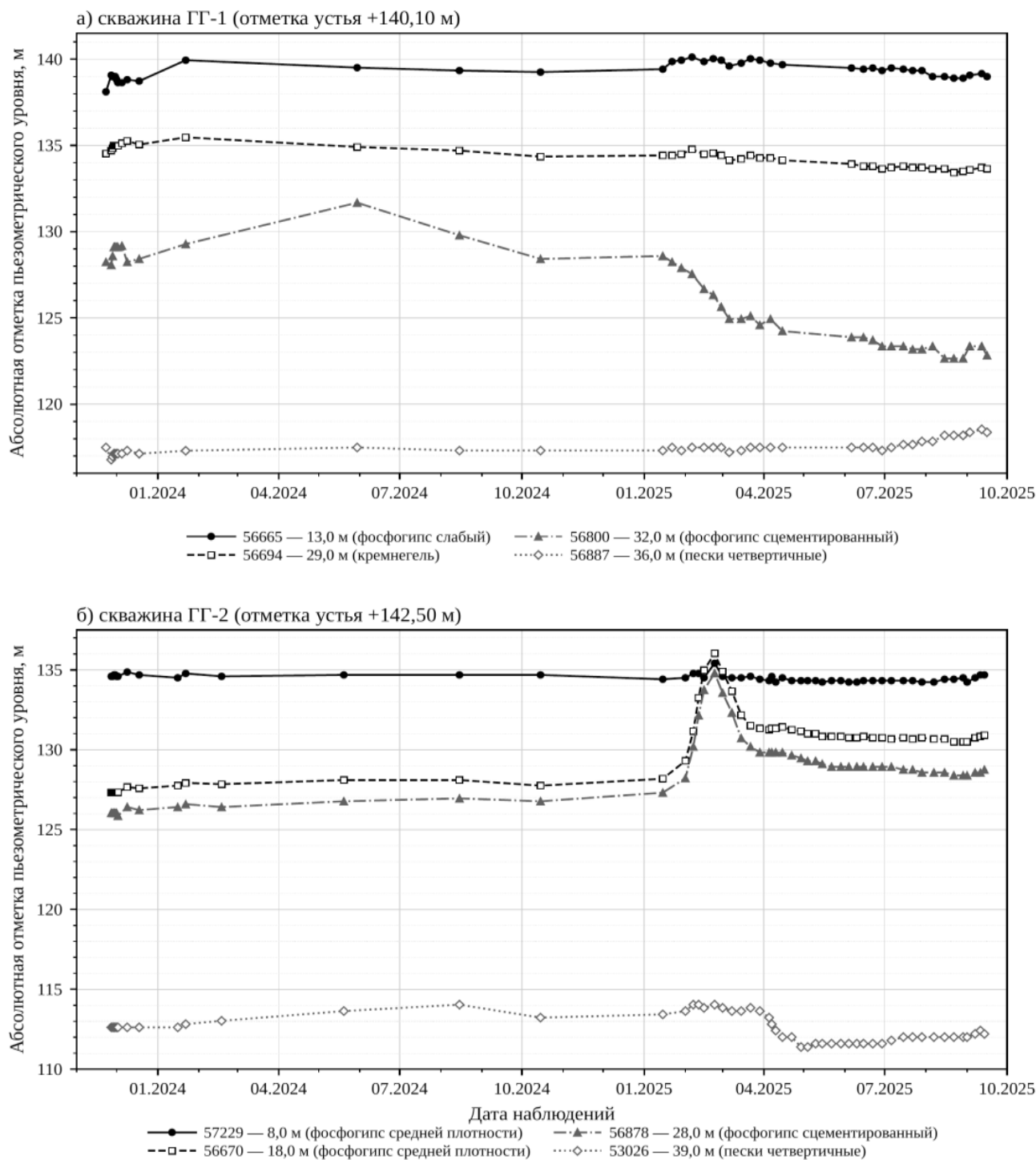


Рис. 2. Динамика абсолютных отметок пьезометрических уровней по датчикам скважин ГГ-1 (а) и ГГ-2 (б) за период XI.2023 г. – IX.2025 г.:

по оси абсцисс – дата наблюдений; по оси ординат – абсолютная отметка пьезометрического уровня, м (Балтийская система высот); в легенде – заводской номер датчика, глубина установки и вмещающая литологическая разность

Fig. 2. Time series of absolute elevations of piezometric levels recorded by the sensors of wells GG-1 (a) and GG-2 (b) over the period XI.2023 – IX.2025.

Abscissa – date of observation; ordinate – absolute elevation of the piezometric level, m (Baltic height system); the legend gives the sensor serial number, installation depth and host lithological unit

и на 7,48 м по датчику 56878 (28,0 м), достигнув максимальных за период значений +136,03 и +134,79 м при среднем темпе подъема 0,20 и 0,19 м/сут. Диссипация избыточного

напора заняла около 65 суток: к 29.03.2025 г. уровни вернулись к отметкам +131,33 и +129,83 м.

Реакция остальных горизонтов оказалась несопоставимо слабее: датчик 57229,

Таблица 1. Статистические характеристики рядов пьезометрических уровней и температуры подземных вод (XI.2023 г. – IX.2025 г.)

Table 1. Statistical characteristics of the piezometric level and groundwater temperature series (XI.2023 – IX.2025)

Скв.	№ датчика	Глу-би-на, м	Уровень мин., м	Уро-вень макс., м	Уро-вень средн., м	СКО уров-ня, м	Раз-мах уров-ня, м	t мин., °C	t макс., °C	t средн., °C	Раз-мах t, °C
ГГ-1	56665	13,0	+138,11	+140,12	+139,34	0,46	2,01	14,7	20,4	15,95	5,7
ГГ-1	56694	29,0	+133,43	+135,47	+134,31	0,55	2,04	8,8	9,8	9,46	1,0
ГГ-1	5680	32,0	+122,65	+131,68	+126,07	2,59	9,03	8,2	9,0	8,46	0,8
ГГ-1	56887	36,0	+116,78	+118,54	+117,51	0,39	1,76	7,4	7,9	7,48	0,5
ГГ-2	57229	8,0	+134,23	+135,41	+134,49	0,22	1,18	11,9	14,0	13,14	2,1
ГГ-2	56670	18,0	+127,32	+136,03	+130,32	2,04	8,71	13,2	14,3	13,82	1,1
ГГ-2	56878	28,0	+125,86	+134,79	+128,74	2,00	8,93	13,5	14,7	14,14	1,2
ГГ-2	53026	39,0	+111,39	+114,04	+112,57	0,83	2,65	11,8	13,8	12,56	2,0

фиксирующий поверхность депрессии, поднялся на 1,00 м, а датчик 53026 в песках основания – на 0,61 м. Следовательно, импульс был сгенерирован внутри намывного массива и практически полностью погашен слоем сцементированного фосфогипса, не достигнув водоносного горизонта основания. Градиент в нижнем интервале вырос при этом с 1,26 до 1,89, что представляет наибольшую нагрузку на контактную зону за весь период наблюдений.

Событие имеет и методическое значение: продолжительность его фазы максимума составила около трех недель, поэтому при месячной дискретности ручных замеров вероятность зафиксировать пик близка к случайной, а темп подъема 0,2 м/сут. не мог быть определен.

Перераспределение фильтрационного сопротивления в скважине ГГ-1. Изменения в скважине ГГ-1 носят не импульсный, а направленный характер (рис. 2а). Отметка уровня по датчику 56800 (32,0 м) монотонно снизилась с +131,68 м (30.05.2024) до +122,65 м (август 2025 г.), то есть на 9,03 м, тогда как на вышележащем датчике 56694 снижение составило лишь 1,82 м, а на нижележащем 56887 уровень вырос на 1,06 м. При практически неизменном полном перепаде напора по всей толще (20,62–22,19 м) это означает перераспределение фильтрационного сопротивления между слоями.

Расчет градиентов по опорным датам показал, что в течение 2024 г. и в начале 2025 г. основное сопротивление было сосредоточено в интервале 32,0–36,0 м, включающем в себя прослой торфа: на него приходилось от 50,6 до 64,4% полного перепада при градиенте 2,78–3,55. В первом полугодии 2025 г. произошла инверсия: доля интервала 29,0–32,0 м (кремнегель и сцементированный фосфогипс) выросла с 26,4 до 52,5%, а доля интервала 32,0–36,0 м снизилась с 51,0 до 21,6%; градиенты изменились с 1,94 до 3,61 и с 2,82

до 1,12 при практически неизменном градиенте верхнего интервала (0,31–0,35).

Наиболее вероятное объяснение заключается в продолжающейся цементации фосфогипса в интервале 31,0–32,5 м и кольматации кремнегеля при сохранении дренирующей способности контакта с песками. Вместе с тем нельзя исключить и приборную природу тренда – дрейф нуля датчика 56800.

Структура фильтрационного режима на конец периода наблюдений. Дальнейшие расчеты выполнены по данным сентября 2025 г. (табл. 2, 3). Данные всех 8 датчиков свидетельствуют об устойчивом нисходящем потоке, дренирующемся в водоносный горизонт четвертичных песков. Общий перепад напора составляет 20,62 м в скважине ГГ-1 и 22,47 м в скважине ГГ-2 при мощности контролируемой толщи 23,0 и 31,0 м; при отсутствии зон восходящей фильтрации это подтверждает прямую гидравлическую связь техногенного и природного водоносных горизонтов.

Отметки уровней на верхних датчиках позволяют оценить заглубление поверхности депрессии относительно гребня действующего яруса: в скважине ГГ-1 оно составляет 1,11 м, в скважине ГГ-2–7,82 м. Различие в 6,71 м между участками одного сооружения объясняет минимальный запас до критерия К1 именно на участке ГГ-1 и повышает там риск сезонного морозного пучения. Датчик 57229 при показании 0,18 м вод. ст. фиксирует положение самой поверхности депрессии.

Рассчитанные по (2) значения порового давления изменяются от 1,8 кПа на поверхности депрессии до 221,2 кПа на глубине 29,0 м. Максимальные значения приурочены не к нижним, а к средним датчикам обеих скважин, что прямо следует из послойной структуры сопротивления: над водоупорным комплексом накапливается

Таблица 2. Пьезометрические уровни, поровое давление и сопоставление с критериями безопасности (сентябрь 2025 г.)

Table 1. Statistical characteristics of the piezometric level and groundwater temperature series (XI.2023 – IX.2025)

Скв.	№ датчика	Глубина, м	Показание датчика, м вод. ст.	Абс. отм. пьезометр. уровня, м	u , кПа	$K1$ ($k_{st} = 1,25$), м	Запас до $K1$, м	$K_{пр}$ ($k_{st} = 1,0$), м	Запас до $K_{пр}$, м
ГТ-1	56665	13,0	11,89	+138,99	116,6	+142,11	3,12	+152,01	13,02
ГТ-1	56694	29,0	22,55	+133,65	221,2	+138,13	4,48	+138,85	5,20
ГТ-1	56800	32,0	14,73	+122,83	144,5	+137,66	14,83	+138,85	16,02
ГТ-1	56887	36,0	14,27	+118,37	140,0	+161,71	43,34	+163,75	45,38
ГТ-2	57229	8,0	0,18	+134,68	1,8	+139,73	5,05	+140,39	5,71
ГТ-2	56670	18,0	6,41	+130,91	62,9	+140,04	9,13	+140,39	9,48
ГТ-2	56878	28,0	14,25	+128,75	139,8	+140,04	11,29	+140,39	11,64
ГТ-2	53026	39,0	8,71	+112,21	85,4	+134,55	22,34	+150,40	38,19

Примечание. $K1$ – критерий безопасности первого уровня, соответствующий нормативному коэффициенту устойчивости $k_{st} = 1,25$; $K_{пр}$ – предельный критерий, соответствующий $k_{st} = 1,0$. Значения приняты по Декларации безопасности ГТС.

Таблица 3. Вертикальные гидравлические градиенты, распределение перепада напора и относительная проницаемость по измерительным интервалам (сентябрь 2025 г.)

Table 3. Vertical hydraulic gradients, head loss distribution and relative permeability by measuring intervals (September 2025)

Интервал (скважина, датчики)	Глубина, м	L , м	Литологический состав интервала	ΔH , м	Доля, %	I	k_i/k_1
ГТ-1: 56665-56694	13,0-29,0	16,0	Фосфогипс слабый и плотный	5,34	25,9	0,334	1,00
ГТ-1: 56694-56800	29,0-32,0	3,0	Кремнегель, цементированный фосфогипс	10,82	52,5	3,607	0,093
ГТ-1: 56800-56887	32,0-36,0	4,0	Цементированный фосфогипс, торф, пески	4,46	21,6	1,115	0,300
ГТ-1: в целом	13,0-36,0	23,0	Вся контролируемая толща	20,62	100	0,897	–
ГТ-2: 57229-56670	8,0-18,0	10,0	Фосфогипс средней плотности	3,77	16,8	0,377	1,00
ГТ-2: 56670-56878	18,0-28,0	10,0	Фосфогипс средней плотности и плотный	2,16	9,6	0,216	1,745
ГТ-2: 56878-53026	28,0-39,0	11,0	Цементированный фосфогипс, пески	16,54	73,6	1,504	0,251
ГТ-2: в целом	8,0-39,0	31,0	Вся контролируемая толща	22,47	100	0,725	–

Примечание. Относительная проницаемость рассчитана по формуле (5) относительно верхнего интервала каждой скважины, принятого за опорный (k_1).

Note. The relative permeability is calculated according to formula (5) relative to the upper interval of each well, taken as the reference interval (k_1).

напор, который затем резко срабатывается. Согласно (3) зона наименьших эффективных напряжений расположена непосредственно над водоупором, а не у подошвы сооружения.

В скважине ГТ-1 более половины полного перепада напора – 10,82 м из 20,62 м – срабатывается на интервале мощностью всего 3,0 м, приуроченном к кремнегелю и цементированному фосфогипсу, где градиент достигает 3,61, а относительный коэффициент фильтрации в 10,8 раза ниже, чем у вышележащей толщи. Именно этот комплекс, а не прослой торфа, выполняет функцию основного водоупора: торф попадает в интервал 32,0-36,0 м с градиентом 1,12.

В скважине ГТ-2 картина является качественно иной. Верхние два интервала общей мощностью 20,0 м срабатывают лишь 26,4% полного перепада при градиентах 0,377 и 0,216.

Основное сопротивление сосредоточено в нижнем интервале 28,0-39,0 м: 16,54 м перепада (73,6%) при градиенте 1,50. Роль водоупора здесь выполняет исключительно цементированный фосфогипс мощностью 11,5 м – образование техногенное, свойства которого могут изменяться во времени.

Осредненные по всей толще градиенты (0,897 против 0,725) различий между участками не выявляют. Принципиальное различие обнаруживается только на уровне послойного анализа и заключается в том, где именно сосредоточено фильтрационное сопротивление: в скважине ГТ-1 – в средней части разреза, на удалении 8,0 м от контакта с песками основания, в скважине ГТ-2 – непосредственно у этого контакта. Это основной содержательный итог работы, недостижимый при использовании традиционной

сети одноточечных пьезометров: разброс отметок уровня по глубине в пределах одной точки достигает 20,62 и 22,47 м (табл. 2). Отметим, что градиент 1,50 осреднен по интервалу, включающему в себя и сцементированный фосфогипс, и пески, поэтому локальный градиент в песках заведомо меньше, а контактная зона «Сцементированный фосфогипс-песок» наиболее уязвима для контактного размыва.

Температурный режим и независимая проверка выводов о неоднородности. Ряды температуры подземных вод приведены на рисунке 3, статистические характеристики – в таблице 1.

Термические профили двух скважин различаются принципиально. В скважине ГГ-1 средняя температура закономерно убывает с глубиной: 15,95°C на 13,0 м; 9,46°C на 29,0 м; 8,46°C на 32,0 м; 7,48°C в песках основания на 36,0 м. Сезонная волна прослеживается только на верхнем датчике (размах – 5,7°C) и практически полностью затухает на глубине 29,0 м. В скважине ГГ-2 разрез, напротив, близок к изотермическому: 13,14; 13,82; 14,14; 12,56°C при размахе 1,1-2,1°C.

Наиболее информативным является сопоставление температур в песках основания при сопоставимых глубинах: 7,48°C в скважине ГГ-1 (36,0 м) против 12,56°C в скважине ГГ-2 (39,0 м). Значение 7,5°C отвечает фоновой температуре подземных вод региона, тогда как превышение на 5,08°C можно объяснить только поступлением в горизонт основания более теплой воды техногенного происхождения. Тем самым термометрия независимо подтверждает основной вывод работы: на участке ГГ-2 эффективный водоупор между намывным массивом и основанием отсутствует, тогда как на участке ГГ-1 комплекс «Кремнегель-сцементированный фосфогипс-торф» ограничивает и фильтрационный, и конвективный теплопереносы [9]. Дополнительный аргумент – синхронное с подъемом напоров понижение температуры на датчиках 56670 и 56878 на 0,7 и 0,6°C в феврале 2025 г.

Сопоставление с критериями безопасности. За весь период наблюдений пьезометрические уровни не превышали критериальных значений К1 (табл. 2), однако запас распределен по разрезу крайне неравномерно: минимальное значение 3,12 м приурочено к верхнему датчику 56665 скважины ГГ-1 на глубине 13,0 м, второе по критичности – 4,48 м (датчик 56694), тогда как для датчиков основания запас превышает 22 м. Лимитирующей является, таким образом, не зона основания, а верхняя, наименее

консолидированная часть намывного массива, – именно та, на которую непосредственно воздействует наращивание очередного яруса. Отметим, что значения К1 для датчиков 56887 и 56665 превышают отметку гребня действующего яруса на 21,6 и 2,01 м, то есть физически недостижимы: по-видимому, критерии рассчитаны для проектной отметки после завершения наращивания.

Инженерные решения, вытекающие из результатов. Установленные закономерности позволяют сформулировать следующие технические решения по обеспечению безопасности при наращивании ограждающих дамб.

1. *Дифференциация проектных решений по участкам.* Участки, аналогичные разрезу ГГ-2 (73,6% перепада напора у контакта с песками основания), требуют первоочередной проработки организованного дренирования основания, участки, аналогичные разрезу ГГ-1, – контроля состояния слоя кремнегеля и сцементированного фосфогипса.

2. *Развитие схемы размещения контрольно-измерительной аппаратуры.* Для разрешения градиента в контактной зоне необходим дополнительный датчик на отметке кровли четвертичных песков (+106,0 м в разрезе ГГ-2, глубина – 36,5 м). Двух автоматизированных скважин на 28 створов недостаточно для пространственной интерполяции: рекомендуется оборудовать многоточечными системами не менее одного створа на каждом характерном участке дамбы.

3. *Регламент опроса датчиков в период наращивания.* Суточная дискретность опроса достаточна для регистрации процессов, подобных событию февраля 2025 г., но недостаточна для определения начальной фазы генерации избыточного давления. На период отсыпки и намыва яруса рекомендуется повышение частоты опроса до одного раза в 2-4 ч – не только для датчиков верхней зоны (56665, 57229), но и для датчиков средней части массива (56670, 56878).

4. *Пороговые значения системы оповещения.* С учетом фактического минимального запаса 3,12 м целесообразно задать предупредительный порог по датчику 56665 на уровне снижения запаса до 1,5 м с автоматическим уведомлением службы эксплуатации ГТС.

5. *Параметризация расчетных моделей.* Соотношения относительной проницаемости (табл. 3) дают основание для перехода от однородной к слоистой геофильтрационной модели с контрастом коэффициентов фильтрации не менее одного порядка. Поскольку распределение сопротивления изменяется во времени, модель должна перекалибровываться по актуальным

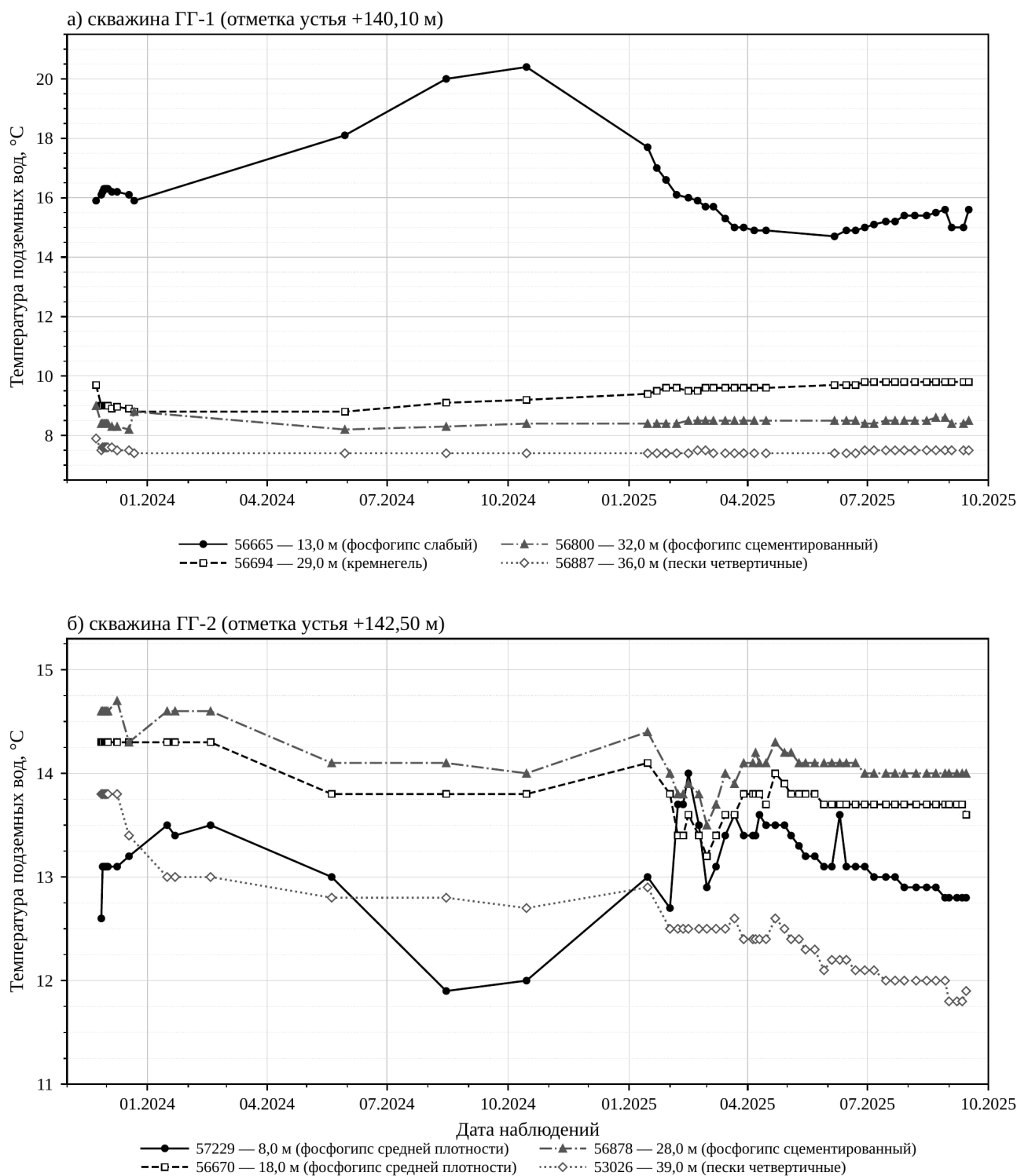


Рис. 3. Динамика температуры подземных вод по датчикам скважин ГГ-1 (а) и ГГ-2 (б) за период XI.2023 г. – IX.2025 г.:
 по оси абсцисс – дата наблюдений; по оси ординат – температура подземных вод, °C (условные обозначения см. на рисунке 2)

Fig. 3. Time series of groundwater temperature recorded by the sensors of wells GG-1 (a) and GG-2 (b) over the period XI.2023 – IX.2025.

Abscissa – date of observation; ordinate – groundwater temperature, °C; for legend see Fig. 2

данным мониторинга перед проектированием каждого очередного яруса [10].

6. Метрологическое сопровождение.

Направленное снижение уровня по датчику

56800 при слабой реакции соседних требует исключения приборной причины: необходимы контрольный замер в ближайшем пьезометре традиционной сети и внеочередная поверка датчика,

а впредь – регламент ежегодного сопоставления показаний автоматизированных датчиков с ручными замерами.

Ограничения исследований. Наблюдения 2024 г. представлены единичными замерами, что ограничивает точность датировки начала переходного процесса. Оценка фильтрационной неоднородности по (5) справедлива при допущениях одномерности и квазиустановившегося потока; абсолютные значения коэффициентов фильтрации требуют лабораторного определения. Интерпретация температурного поля является качественной, тренд по датчику 56800 требует верификации, а выводы о пространственной неоднородности основаны на данных двух скважин.

Выводы

1. Установлено наличие устойчивого нисходящего фильтрационного потока, охватывающего всю контролируемую толщ техногенных отложений и дренирующегося в водоносный горизонт четвертичных песков основания. Полный перепад напора составляет 20,62 м на участке скважины ГГ-1 и 22,47 м – на участке ГГ-2, что подтверждает прямую гидравлическую связь техногенного и природного водоносных горизонтов и обосновывает рассмотрение системы «Сооружение-основание» как единого объекта при моделировании.

2. Статистическая обработка рядов за ноябрь 2023 г. – сентябрь 2025 г. показала, что режим не является установившимся: наряду с сезонной составляющей (размах – 1,18-2,65 м) выявлены изменения на порядок большей амплитуды: размах – 8,71-9,03 м по датчикам 56800, 56670 и 56878.

3. В скважине ГГ-2 зарегистрирован переходный процесс генерации и диссипации избыточного порового давления: за 39 суток уровни на глубинах 18,0 и 28,0 м выросли на 7,85 и 7,48 м при темпе 0,20 и 0,19 м/сут., после чего рассеялись за 65 сут., тогда как реакция поверхности депрессии составила 1,00 м, а горизонта основания – 0,61 м. Синхронное

понижение температуры на 0,6-0,7°C подтверждает гидравлическую природу события, а продолжительность фазы максимума около трех недель делает его регистрацию ручными замерами месячной дискретности практически случайной.

4. Выполнено количественное разделение фильтрационного сопротивления по слоям и прослежено его изменение во времени: в скважине ГГ-1 за первое полугодие 2025 г. доля перепада напора на интервале 29,0-32,0 м выросла с 26,4 до 52,5%, а на интервале 32,0-36,0 м, включающем прослой торфа, снизилась с 51,0 до 21,6%. Основную водоупорную функцию выполняет комплекс «Кремнегель-цементированный фосфогипс», относительная проницаемость которого в 10,8 раза ниже, чем у вышележащего фосфогипса.

5. В разрезе скважины ГГ-2, где комплекс кремнегеля и торфа не выражен, 73,6% перепада напора сосредоточено у контакта цементованного фосфогипса с четвертичными песками. Различие в положении зоны основного сопротивления между участками не выявляется традиционной сетью одноточечных пьезометров и определяет необходимость дифференциации проектных решений по дренированию основания. Термометрия подтверждает это независимо: температура вод основания составляет 7,48°C в скважине ГГ-1 против 12,56°C в ГГ-2 при фоновом значении около 7,5°C.

6. Пьезометрические уровни за весь период не превышали значений К1, причем минимальный запас 3,12 м приурочен не к основанию, а к верхней неконсолидированной части намывного массива, которая и является лимитирующей зоной при наращивании. Результаты позволили обосновать конкретные инженерные решения: дополнительный датчик на кровле четвертичных песков в разрезе ГГ-2; повышение дискретности опроса датчиков верхней и средней зон до одного раза в 2-4 ч на период намыва яруса; предупредительный порог оповещения по датчику 56665 при снижении запаса до 1,5 м.

Список использованных источников

1. Гаппаров Ф.А., Нарзиев Ж.Ж., Ирмахамедова Л.Х. Результаты исследований процесса фильтрации в теле грунтовой плотины и ее химическое влияние на пьезометры // Молодой ученый. 2018. № 21 (207). С. 34-38
2. Абакумова О.А., Любаненко А.В. Международные стандарты экологического менеджмента как инструмент правового регулирования бизнеса // Вестник Тюменского государственного университета. 2021. Т. 7, № 1 (25). С. 147-167
3. Лобач А.А., Блинов И.Ф., Магрук В.И., Родионов В.Б. Компьютеризация надзора за состоянием сооружений

References

1. Gapparov F.A., Narziev Zh.Zh., Irmukhamedova L.Kh. Results of studies of the filtration process in the body of an earth dam and its chemical effect on piezometers // Young Scientist. 2018; (21(207)): 34-38.
2. Abakumova O.A., Lyubanenko A.V. International standards of environmental management as an instrument of legal regulation of business // Bulletin of Tyumen State University. 2021; 7(1(25)): 147-167.
3. Lobach A.A., Blinov I.F., Magruk V.I., Rodionov V.B. Computerization of supervision over the condition of structures

Загорской ГАЭС // Гидротехническое строительство. 1996. № 4. С. 41-44

4. Малышев А.С., Пашали А.А., Здолник С.Е., Волков М.Г. Удаленный мониторинг механизированного фонда скважин в ОАО «НК «Роснефть» // Научно-технический вестник ОАО «НК «Роснефть». 2009. № 1. С. 23-28

5. Иваненко Ю.Г., Бакштанин А.М., Ткачев А.А., Иваненко Д.Ю. Специальные задачи гидравлики рек и каналов. Москва: Редакция журнала «Механизация и электрификация сельского хозяйства», 2020. 220 с.

6. Ткачев А.А., Клименко В.В., Родионенко А.В. Анализ применения берегоукрепительных конструкций // Мелиорация и водное хозяйство: Материалы Всероссийской научно-практической конференции, г. Новочеркасск, 24 октября 2019 г. Новочеркасск: ООО «Лик», 2019. Вып. 17. Ч. 1. С. 221-225

7. Piciullo L., Storösten E.B., Liu Z., Nadim F., Lacasse S. A new look at the statistics of tailings dam failures // Engineering Geology. 2022. Vol. 303. Article 106657

8. Delgado B., Da Fonseca A., Bittar R., Castilho B., Coelho D. Geomechanical behaviour of an iron ore tailings under high-stress levels for disposal by dry stacking. 2023.

9. Kharaghani S. Seepage investigation of embankment dams using numerical modelling of temperature field // Indian Journal of Science and Technology. 2013.

10. Chen Y. et al. Coupled hydro-mechanical modeling of tailings storage facilities aided by continuous field monitoring data // Engineering Geology. 2025. Vol. 320. Article 107050

Информация об авторах

Александр Александрович Ткачев, д-р техн. наук, доцент; <https://orcid.org/0000-0002-8060-620X>; prof_al@mail.ru;

Александра Ивановна Мокотова, магистрант; ainekludova@yandex.ru;

Екатерина Александровна Волкова, старший преподаватель; <https://orcid.org/0009-0007-6471-4490>; 7katerina7tomashevich7@mail.ru;

Михаил Сергеевич Медведев, аспирант; arsgorobez@mail.ru

Вклад авторов

А.А. Ткачев – концепция и методика исследования, интерпретация результатов, научное редактирование текста.

А.И. Мокотова – сбор и первичная обработка данных мониторинга, подготовка таблиц. Е.А. Волкова – обзор литературы, расчёт градиентов и относительной проницаемости, графические материалы, перевод на английский язык

. М.С. Медведев – обработка временных рядов, расчёт порового давления и запасов до критериев безопасности, раздел с инженерными решениями.

Conflict of interest / Конфликт интересов

The authors declare no conflict of interest / Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию / Received 01.04.2026

Поступила после рецензирования / Received 14.08.2026

Принята к публикации / Accepted 07.09.2026

of the Zagorsk pumped storage power plant // Hydrotechnical Construction. 1996; (4): 41-44.

4. Malyshev A.S., Pashali A.A., Zdolnik S.E., Volkov M.G. Remote monitoring of the mechanized well stock in OJSC NK Rosneft // Scientific and Technical Bulletin of OJSC NK Rosneft. 2009; (1): 23-28.

5. Ivanenko Yu.G., Bakshtanin A.M., Tkachev A.A., Ivanenko D.Yu. Special problems of hydraulics of rivers and canals. Moscow: Editorial Board of the Journal "Mechanization and Electrification of Agriculture"; 2020. 220 p. ISBN 978-5-6042796-1-8.

6. Tkachev A.A., Klimenko V.V., Rodionenko A.V. Analysis of the application of bank protection structures // Land Reclamation and Water Management: Proceedings of the All-Russian Scientific and Practical Conference, Novocherkassk, October 24, 2019. Vol. 17, part 1. Novocherkassk: ООО "Лик"; 2019. P. 221-225.

7. Piciullo L., Storösten E.B., Liu Z., Nadim F., Lacasse S. A new look at the statistics of tailings dam failures. Engineering Geology. 2022; 303: 106657.

8. Delgado B., Da Fonseca A., Bittar R., Castilho B., Coelho D. Geomechanical behaviour of an iron ore tailings under high-stress levels for disposal by dry stacking. 2023.

9. Kharaghani S. Seepage investigation of embankment dams using numerical modelling of temperature field. Indian Journal of Science and Technology. 2013.

10. Chen Y. et al. Coupled hydro-mechanical modeling of tailings storage facilities aided by continuous field monitoring data. Engineering Geology. 2025; 320: 107050.

Information about the authors

Alexander A. Tkachev, Doctor of Engineering Sciences, Associate Professor, <https://orcid.org/0000-0002-8060-620X>, prof_al@mail.ru

Alexandra I. Mokotova, Master's Student, ainekludova@yandex.ru

Ekaterina A. Volkova, Senior Lecturer,

<https://orcid.org/0009-0007-6471-4490>, 7katerina7tomashevich7@mail.ru

Mikhail S. Medvedev, Postgraduate Student, arsgorobez@mail.ru

About the authors

A.A. Tkachev – research concept and methodology, interpretation of the results, scientific editing.

A.I. Mokotova – collection and primary processing of the monitoring data, preparation of the tables.

E.A. Volkova – literature review, calculation of gradients and relative permeability, graphic materials, translation into English.

M.S. Medvedev – processing of the time series, calculation of pore pressure and safety-criteria reserves, section on engineering solutions.