

УДК 622.276.66

DOI: 10.18799/24131830/2025/4/5045

Шифр специальности ВАК: 1.6.6

## Особенности эксплуатации инфильтрационных водозаборов (на примере Моховского месторождения подземных вод в Республике Хакасия)

А.В. Никитенкова<sup>✉</sup>, А.Н. Никитенков, Е.М. Дутова, К.И. Кузеванов

*Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Россия, г. Томск*

<sup>✉</sup>avk92@tpu.ru

**Аннотация.** Работа посвящена изучению особенностей эксплуатации инфильтрационных водозаборов в условиях изменчивости питания подземных вод. Рассматриваются вопросы влияния климатических и антропогенных факторов на питание эксплуатационного водоносного горизонта Моховского месторождения подземных вод. Водозабор характеризуется смешанным питанием за счёт формирования привлекаемых ресурсов из Красноярского водохранилища и из нижележащего горизонта верхнедевонских отложений. Динамический баланс между этими источниками определяется продуктивностью скважин и изменяющимся расстоянием береговой линии водохранилища (питающей границы) от скважин водозабора. Следствием перераспределения баланса в пользу глубинного питания является превышение предельно допустимой концентрации по величинам общей минерализации и жесткости. Анализ гидрогеологических условий позволяет оценивать изменчивость состава подземных вод под влиянием динамически меняющихся условий питания эксплуатационного водоносного горизонта. **Цель:** количественная оценка влияния граничных условий продуктивного горизонта Моховского месторождения на восполнение запасов подземных вод; прогнозное моделирование работы водозабора при изменчивости уровней поверхностных вод водохранилища; оценка изменения состава подземных вод под влиянием поступающих снизу вод девонских отложений и прогноз осаждения вторичных минералов на водоподъемном оборудовании на основе оценки минеральных равновесий. **Методы:** дешифрирование космоснимков, гидродинамическое моделирование, гидрогеохимические расчёты с последующим сопоставлением результатов прогнозов с реальными данными режимных наблюдений. **Результаты и выводы.** Показано, что дешифрирование многозональных космоснимков позволяет контролировать уровень режим водохранилища и оценивать его влияние на условия питания подземных вод. Результаты предложенной схемы построения прогнозов позволяют оценивать эффективность регулирования уровня режима водохранилища за счёт работы сооружений ГЭС и выявлять размеры зон питания инфильтрационных водозаборов. Продемонстрировано, что для обоснования необходимых размеров конечно-разностных сеток гидродинамических моделей можно привлекать дистанционно полученные данные. Результаты численного моделирования эксплуатации водозабора в среде ПК Processing Modflow показывают динамику изменения уровней в эксплуатационном водоносном горизонте при изменении уровня поверхностных вод водохранилища. Средствами ПК HydroGeo выявлена эволюция состава вод продуктивного горизонта под влиянием их смешения с поверхностными водами водохранилища и подземными водами верхнедевонских отложений, залегающими ниже, а также выполнена оценка вероятности образования вторичных минералов на водоподъемном оборудовании.

**Ключевые слова:** дистанционное зондирование, подземные воды, химический состав, инфильтрация, смешение вод, физико-химическое и гидродинамическое моделирование

**Для цитирования:** Особенности эксплуатации инфильтрационных водозаборов (на примере Моховского месторождения подземных вод в Республике Хакасия) / А.В. Никитенкова, А.Н. Никитенков, Е.М. Дутова, К.И. Кузеванов // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2025. – Т. 336. – № 4. – С. 154–168. DOI: 10.18799/24131830/2025/4/5045

---

UDC 622.276.66

DOI: 10.18799/24131830/2025/4/5045

## Features of infiltration water intakes operation (on example of the Mokhovsky groundwater deposit in the Republic of Khakassia)

A.V. Nikitenkova<sup>✉</sup>, A.N. Nikitenkov, E.M. Dutova, K.I. Kuzevanov

*National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russian Federation*

<sup>✉</sup>avk92@tpu.ru

**Abstract. Relevance.** The work is devoted to the study of the features of infiltration intakes operation in conditions of variability of groundwater supply. The paper considers the issues of the impact of climatic and anthropogenic factors on the nutrition of the operational aquifer of the Mokhovsky groundwater deposit. The intake is characterized by a mixed nutrition due to the formation of attracted resources from the Krasnoyarsk reservoir and from the underlying horizon of the Upper Devonian sediments. The dynamic balance between the sources of attracted resources is determined both by the productivity of wells and the changing distance of the reservoir coastline (feeding boundary) from the water intake wells. A consequence of balance redistribution in favor of deep nutrition is a change in the chemical composition of groundwater, which leads to an excess of the maximum permissible concentration in terms of total mineralization and hardness. The analysis of hydrogeological conditions makes it possible to assess the variability of groundwater composition under the influence of dynamically changing supply conditions of an operational aquifer. **Aim.** Quantification of influence of boundary conditions on the Mokhovsky productive horizon during replenishment of groundwater reserves; predictive modeling of the intake operation with variability in reservoir surface water levels; assessment of changes in groundwater composition under the influence of incoming waters from Devonian sediments and forecast of the deposition of secondary minerals on water lifting equipment based on the assessment of mineral equilibria. **Methods.** Decoding satellite images, hydrodynamic modeling, hydrogeochemical calculations with subsequent comparison of forecast results with real data from routine observations. **Results and conclusions.** It is shown that the decryption of multi-zone satellite images makes it possible to control the reservoir level regime and assess its impact on groundwater supply conditions due to surface sources. The results of the proposed forecasting scheme make it possible to assess the effectiveness of regulating the reservoir level regime due to the operation of hydroelectric power plants and identify the size of the supply zones of infiltration intakes. It is demonstrated that remotely obtained data can be used to substantiate the necessary sizes of finite-difference grids of hydrodynamic models. The results of numerical simulation of water intake operation in the Processing Modflow PC environment show the dynamics of changes in levels in the operational aquifer with changes in the reservoir surface water level. Evolution of the composition of the waters of the productive horizon was revealed under the influence of their mixing with the surface waters of the reservoir and the groundwater of the Upper Devonian sediments below, and the probability of the formation of secondary minerals on the water lifting equipment was estimated using the HydroGeo software.

**Keywords:** remote sensing, groundwater, chemical composition, infiltration, mixing of waters, physico-chemical and hydrodynamic modeling

**For citation:** Nikitenkova A.V., Nikitenkov A.N., Dutova E.M., Kuzevanov K.I. Features of infiltration water intakes operation (on example of the Mokhovsky groundwater deposit in the Republic of Khakassia). *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2025, vol. 336, no. 4, pp. 154–168. DOI: 10.18799/24131830/2025/4/5045

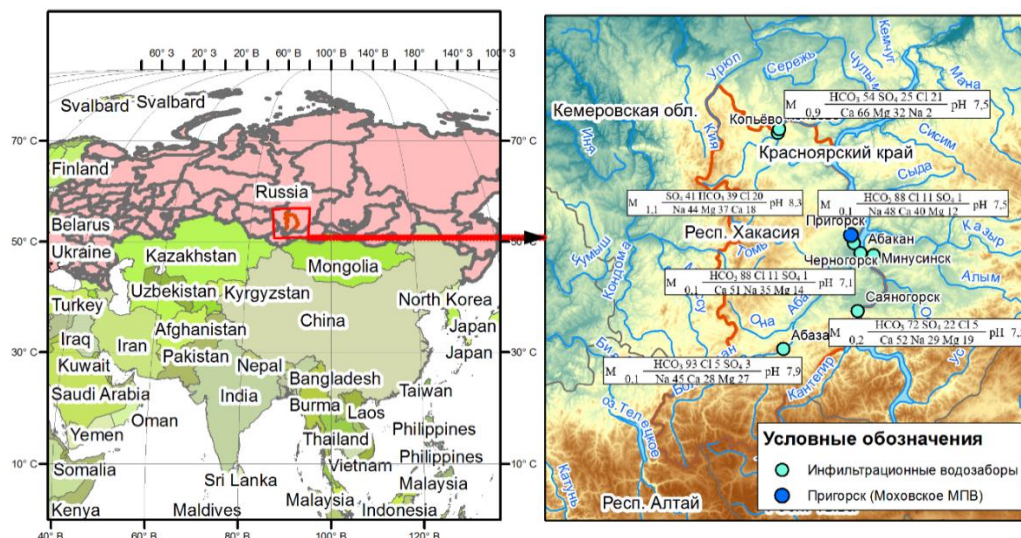
---

### Введение

Инфильтрационные водозаборы являются высокоэффективным методом обеспечения городов качественной питьевой водой. Полное или частичное обеспечение населения питьевой водой при использовании инфильтрационных водозаборов реализуется как во множестве городов России (Кемерово, Красноярск, Горно-Алтайск, Нижний Новгород, Самара, Казань и др.), так и за рубежом (Берлин, Германия; Торунь и Познань, Польша; Асуан, Египет; Дели, Индия; Амстердам, Нидерланды и

др.) [1–8], что обусловлено относительной простотой их эксплуатации и возможностью привлечения значительных по объёмам ресурсов. Подобного рода водозаборы широко используются для водоснабжения населения и в республике Хакасия в городах Абакан, Абаза, Саяногорск, Черногорск, поселках Копьево и Пригорск (рис. 1).

Вместе с тем при использовании инфильтрационных водозаборов следует учитывать и дополнительные факторы, оказывающие влияние на формирование качества подземных вод.

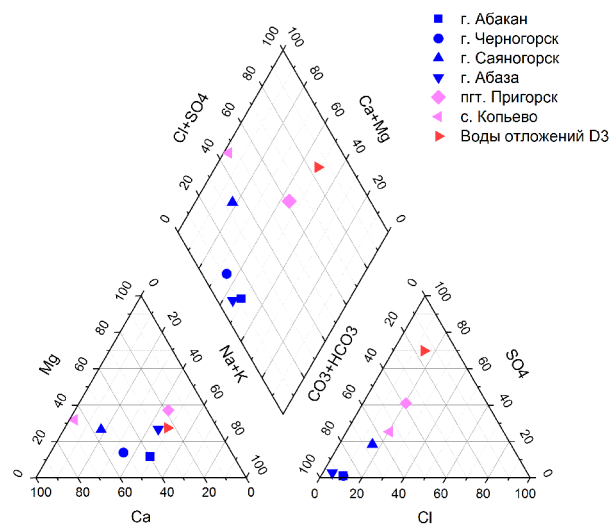


**Рис. 1.** Схема расположения инфильтрационных водозаборов республики Хакасия с формулами Курлова для состава эксплуатируемых вод

**Fig. 1.** Layout of the infiltration intakes of the Khakassia with Kurlov formulas for groundwater composition

Сравнение условий эксплуатации таких месторождений подземных вод республики Хакасия показывает, что в наиболее выгодном положении оказываются водозаборы, приуроченные к хорошо разработанным долинам полноводных рек (водозаборы городов Абакан, Саяногорск, Абаза). Общая минерализация воды здесь составляет 100–200 мг/дм<sup>3</sup>. В долинах малых рек и в пределах участков, удаленных от поверхностных водотоков, ситуация зачастую усугубляется подтягиванием некондиционных вод смежных водоносных горизонтов, происходящим за счёт работы водозаборных сооружений. Примером является водозабор ж/д станции Копьево в долине р. Чулым, где минерализация подземных вод, отбираемых из пойменных галечников, превышает 1000 мг/дм<sup>3</sup>. Более сложная ситуация характерна для Моховского месторождения, расположенного в долине р. Енисей на берегу Красноярского водохранилища, которое эксплуатировалось для водоснабжения пгт. Пригорск (рис. 1, 2).

В условиях изменчивости климата, а также в результате сложностей с согласованием регулирования стока на каскадах ГЭС рассмотренные проблемы в ряде случаев усугубляются вследствие значительного снижения уровней в поверхностных водных объектах. Исходя из этого очевидна необходимость учета гидрогеологических условий, а также прогнозирование работы водозаборов в изменчивых антропогенно-климатических условиях. Проблематика эксплуатации инфильтрационных водозаборов как в гидрогеологическом, так и в гидрогеохимическом аспектах рассматривалась в ряде работ отечественных [9–17] и зарубежных гидрогеологов [2–8, 18].



**Рис. 2.** Диаграмма Пайпера с составом вод инфильтрационных месторождений

**Fig. 2.** Piper diagram with the composition of the waters of infiltration deposits

Целью данной работы является рассмотрение влияния изменчивости граничных условий продуктивного горизонта Моховского месторождения на восполнение запасов подземных вод при эксплуатации Пригорского водозабора. Достижение данной цели реализуется на основе объединения классических подходов к оценке формирования ресурсов подземных вод на инфильтрационных водозаборах и современных методов, основанных на дешифрировании космоснимков, гидродинамическом и гидрогеохимическом моделировании.

В ходе анализа гидрогеологических условий территории решались следующие задачи:

- 1) исследование динамики уровня Красноярского водохранилища на участке водозабора;
- 2) моделирование работы инфильтрационного водозабора;
- 3) исследование гидрогеохимического режима эксплуатации подземных вод с применением физико-химических расчётов и моделирования.

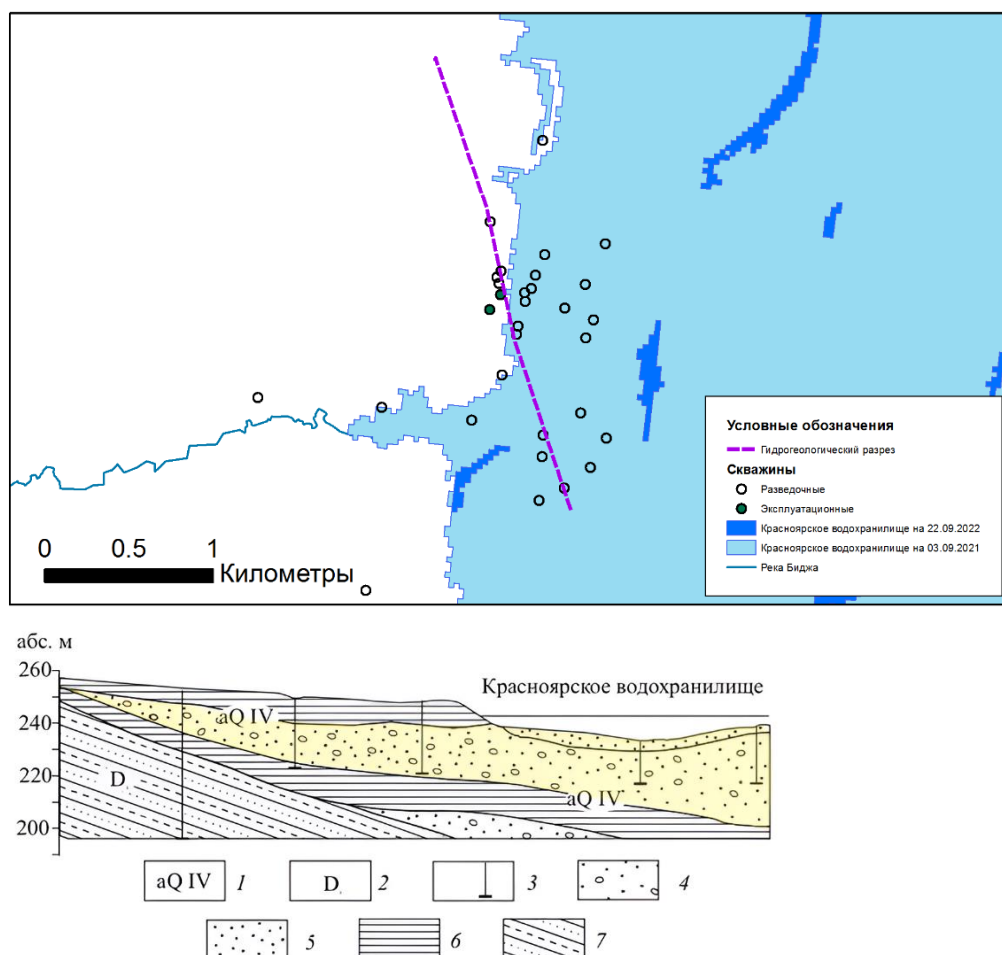
Для изучения динамики уровней подземных вод в процессе эксплуатации месторождения в зависимости от изменчивости зеркала поверхностных вод Красноярского водохранилища привлекались данные режимных наблюдений за уровнями водохранилища [19] и выполнялось дешифрирование многозональных космоснимков [20].

Анализ условий формирования ресурсов проводился на основе построенной гидродинамической модели, включающей данные по эксплуатационным скважинам и учитывающей динамику береговой линии водохранилища как питающей границы.

Эволюция состава подземных вод при эксплуатации месторождения исследовалась с использованием гидрогеохимической модели. Оценивались минеральные равновесия и возможность вторичного минералообразования в условиях эксплуатации водозабора, сопровождающейся перераспределением балансовых составляющих эксплуатационных запасов подземных вод. Падение уровня поверхностных вод сокращает их приток к водозабору с одновременным нарастанием подтягивания высокоминерализованных вод из нижележащих верхнедевонских отложений, что ведёт к закономерному росту минерализации добываемой из скважин воды.

### Характеристика объекта исследования

Моховское месторождение расположено в северо-восточной части Южно-Минусинской котловины (рис. 3), в районе аала Мохов и пгт. Пригорск.



**Рис. 3.** Схема строения Моховского месторождения подземных вод: 1 – водоносный горизонт современных аллювиальных отложений; 2 – водоносный комплекс верхнедевонских терригенных отложений; 3 – гидрогеологические скважины; 4 – гравийно-галечниковые отложения с песчаным заполнителем; 5 – пески; 6 – глины; 7 – алевролиты, песчаники, аргиллиты

**Fig. 3.** Hydrogeological section of the Mokhovskiy groundwater deposit: 1 – aquifer of modern alluvial deposits; 2 – aquifer complex of Upper Devonian terrigenous deposits; 3 – hydrogeological wells; 4 – gravel and pebble deposits with sandy aggregate; 5 – sands; 6 – clays; 7 – siltstones, sandstones, mudstones

Геоморфологически месторождение приурочено к террасе, периодически затопляемой при изменениях уровня воды в водохранилище. По характеру гидрогеологических особенностей относится к третьей группе месторождений со сложными условиями.

Продуктивным является водоносный горизонт современных четвертичных аллювиальных отложений долины р. Енисей, представленный гравийно-галечниковым материалом с песчаным заполнителем. Горизонт подстилается комплексом верхнедевонских отложений, содержащих напорные сульфатные магниевые воды, имеющие повышенную минерализацию (1,6–4,0 г/дм<sup>3</sup>). Фильтрационные свойства пород и водообильность продуктивного горизонта достаточно высокие. Удельные дебиты скважин изменяются от 1,1–4,6 до 9,2–20,2 л/с [9].

Режим подземных вод определяется как гидрологическим режимом Красноярского водохранилища, характеризующимся максимальным положением уровня в осенний период и минимальным – в апреле–мае, так и постоянной разгрузкой солоноватых подземных вод девонских отложений, происходящей в продуктивный горизонт через гидравлические окна в нижнем глинистом слое аллювия. Воды водохранилища гидрокарбонатно-кальциевые, пресные, мягкие с жесткостью не выше 1,6 ммоль/дм<sup>3</sup>.

При отборе подземных вод из четвертичных аллювиальных отложений эксплуатационными скважинами водозабора общая минерализация в зависимости от положения уровня воды в водохранилище колеблется от 0,13 г/дм<sup>3</sup> при высоком его стоянии до 1,3, а иногда и 2,0 г/дм<sup>3</sup> при отступлении береговой линии от водозабора. Состав вод при этом меняется с гидрокарбонатного натриевого на сульфатный магниевый, сульфатный натриевый, характерные для вод девонских отложений, под-

стилающих продуктивный водоносный горизонт (табл. 1).

#### Методика исследования

Методика проведенных в работе исследований носила комплексный характер и проводилась по ряду направлений.

#### Дешифрирование космоснимков для анализа расположения зоны восполнения ресурсов Моховского водозабора

Основной задачей данного этапа работы является комплексное исследование влияния динамики акватории Красноярского водохранилища на гидрогеологические условия эксплуатации Моховского месторождения подземных вод водоснабжения пгт. Пригорск.

Исходными данными для выполнения работы послужили фондовые материалы по оценке запасов подземных вод Моховского месторождения, включая документацию по мониторингу подземных вод, данные Енисейского бассейнового водного управления по уровням воды в верхнем бьефе Красноярской ГЭС (размещенные в открытом доступе на сайте Росводресурсов [19]), 16 космоснимков *LandSat 8* за период с 03.2021 до 03.2023 и дополнительные материалы по гидрогеологическим условиям [9].

При поиске пригодных для дешифрирования космоснимков использовалось два главных критерия: отсутствие облачности над акваторией водохранилища и наличие свободной воды, которую можно достаточно качественно идентифицировать при автоматизированном распознавании. Все снимки относятся к периоду с аномально низкими уровнями воды в Енисее (2021–2023 гг.). Данный период интересен большой амплитудой колебаний уровня воды, отражающей разнообразие условий поступления вод в продуктивный водоносный горизонт Моховского водозабора.

**Таблица 1.** Состав подземных вод Пригорского водозабора

**Table 1.** Composition of underground waters of the Prigorsky water intake

| Название горизонта<br>Name of horizon                                                                                                                                                                | Содержание, мг/л/Contents, mg/l |        |                 |           |           |           |                   | pH   | Жесткость<br>общая, ммоль-л<br>Total water<br>hardness mmol-l | Сухой остаток,<br>мг/л<br>Dry residue,<br>mg/l |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------|--------|-----------------|-----------|-----------|-----------|-------------------|------|---------------------------------------------------------------|------------------------------------------------|
|                                                                                                                                                                                                      | HCO <sub>3</sub>                | Cl     | SO <sub>4</sub> | Na        | Ca        | Mg        | Fe <sub>общ</sub> |      |                                                               |                                                |
| Средний состав отдельных ионов по эксплуатационным скважинам на начало эксплуатации месторождения<br>Average composition of individual ions for production wells at the beginning of field operation |                                 |        |                 |           |           |           |                   |      |                                                               |                                                |
| aQ <sub>IV</sub>                                                                                                                                                                                     | 85,4                            | 7,1    | 4,9             | 26        | 10        | 1,2       | Н.д./n.a.         | 7,70 | 0,6                                                           | 134,6                                          |
| D <sub>3</sub>                                                                                                                                                                                       | 392,80                          | 215,45 | 1389,22         | 463,51    | 196,23    | 138,33    | Н.д./n.a.         | 7,68 | 21,16                                                         | 2509,14                                        |
| Средний состав отдельных ионов по эксплуатационным скважинам за 2021 г.<br>Average composition of individual ions for production wells in 2021                                                       |                                 |        |                 |           |           |           |                   |      |                                                               |                                                |
| aQ <sub>IV</sub>                                                                                                                                                                                     | Н.д./n.a.                       | 144    | 498             | Н.д./n.a. | Н.д./n.a. | Н.д./n.a. | <0,1              | 7,66 | 10,0                                                          | 1316                                           |
| Содержание, мг/л, согласно СанПин 1.2.3685-21<br>Content, mg/l, according to SanPiN 1.2.3685-21                                                                                                      |                                 |        |                 |           |           |           |                   |      |                                                               |                                                |
| –                                                                                                                                                                                                    | –                               | <350   | <500            | 200       | 180       | 40        | 2                 | <0,3 | 6–9                                                           | <1000                                          |

Для дешифрирования использовался ближний инфракрасный канал со спектральным диапазоном 0,85–0,89 мкм и пространственным разрешением 30 м, являющийся одним из самых удобных для идентификации водной поверхности [9]. Для выделения на космоснимках береговой линии и ранжирования различных типов подстилающей поверхности осуществлена интерактивная контролируемая классификация. Этот этап обработки требует предварительного формирования обучающих выборок по соответствующим типам подстилающей поверхности, которые должны быть оформлены в виде файла сигнатур (с выделением водных объектов, растительности и горных пород).

На основе результатов дешифрирования космоснимков были получены данные о положении береговой линии водохранилища и отдельных проток в радиусе 9 км от водозабора (для оценки всей верхней части площади зеркала водохранилища). На указанном расстоянии оценивается степень затопления акватории водохранилища как вверх, так и вниз по течению с охватом территории противоположного берега.

Положение береговой линии существенно влияет на условия восполнения запасов продуктивного водоносного горизонта, т. к. значительно увеличивает расстояние от водозаборных скважин до питающей границы в условиях обмеления водохранилища. Диагностика положения береговой линии в среде *ПК ArcGIS 10* выполнялась с использованием растрово-векторного преобразования в полигоны классов поверхности, полученных в результате дешифрирования. На основе полученных данных оценивалось расположение области питания продуктивного горизонта Моховского месторождения подземных вод поверхностными водами относительно скважин водозабора.

Дополнительно проанализирована связь размеров площади свободной водной поверхности с уровнями в верхнем бьефе водохранилища (табл. 2). Оценка производилась как непосредственно на дату космоснимков, так и со смещением по срокам до двух недель для учёта времени фронта возмущения и связанного с ним изменения уровней. Уровни воды в верхнем бьефе водохранилища были получены с официального сайта Росводресурсов [19]. В качестве базовой оценки по затоплению чаши водохранилища принята площадь свободной водной поверхности по космоснимку на 03.09.2021 г. Этой дате соответствует как отметка уровня 242,4 м (близкая к максимуму 242,52 м, наблюдавшемуся 29.08.2021 г., для периода наблюдений с 2021 по 2024 гг.), так и максимальная площадь затопления (92,4 км<sup>2</sup> в пределах радиуса в 9 км от водозабора), к которой приведены оценки площадей затопления за другие даты.

**Таблица 2.** Данные по космоснимкам и уровням воды от Енисейского бассейнового водного управления Федерального агентства водных ресурсов

**Table 2.** Data on Landsat images and water levels from the Yenisei Basin Water Management of the Federal Agency of Water Resources

| Дата снимка<br>Image date | Уровень верхнего бьефа Красноярского водохранилища, м<br>Level of upstream Krasnoyarsk reservoir, m | Дата замера уровней в верхнем бьефе Красноярского водохранилища (+5 дней к дате снимка)<br>Date of measuring the levels in the upper reaches of the Krasnoyarsk reservoir (+5 days to the date of the snapshot) | Доля площади акватории при максимальных уровнях, покрытая водой в радиусе 9 км от водозабора<br>Proportion of the water area at maximum levels covered by water within a radius of 9 km from the intake |
|---------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 17.07.2021                | 241,6                                                                                               | 22.07.2021                                                                                                                                                                                                      | 0,96                                                                                                                                                                                                    |
| 02.08.2021                | 241,81                                                                                              | 07.08.2021                                                                                                                                                                                                      | 0,99                                                                                                                                                                                                    |
| 18.08.2021                | 242,34                                                                                              | 23.08.2021                                                                                                                                                                                                      | 0,92                                                                                                                                                                                                    |
| 03.09.2021                | 242,4                                                                                               | 08.09.2021                                                                                                                                                                                                      | 1,00                                                                                                                                                                                                    |
| 05.10.2021                | 241,2                                                                                               | 10.10.2021                                                                                                                                                                                                      | 0,99                                                                                                                                                                                                    |
| 07.04.2022                | 230,78                                                                                              | 12.04.2022                                                                                                                                                                                                      | 0,29                                                                                                                                                                                                    |
| 15.04.2022                | 231,02                                                                                              | 20.04.2022                                                                                                                                                                                                      | 0,24                                                                                                                                                                                                    |
| 17.05.2022                | 232,58                                                                                              | 22.05.2022                                                                                                                                                                                                      | 0,26                                                                                                                                                                                                    |
| 10.06.2022                | 233,95                                                                                              | 15.06.2022                                                                                                                                                                                                      | 0,41                                                                                                                                                                                                    |
| 26.06.2022                | 233,46                                                                                              | 01.07.2022                                                                                                                                                                                                      | 0,37                                                                                                                                                                                                    |
| 04.07.2022                | 233,26                                                                                              | 09.07.2022                                                                                                                                                                                                      | 0,30                                                                                                                                                                                                    |
| 12.07.2022                | 233,21                                                                                              | 17.07.2022                                                                                                                                                                                                      | 0,29                                                                                                                                                                                                    |
| 28.07.2022                | 233,13                                                                                              | 02.08.2022                                                                                                                                                                                                      | 0,30                                                                                                                                                                                                    |
| 13.08.2022                | 232,77                                                                                              | 18.08.2022                                                                                                                                                                                                      | 0,24                                                                                                                                                                                                    |
| 22.09.2022                | 232,17                                                                                              | 27.09.2022                                                                                                                                                                                                      | 0,21                                                                                                                                                                                                    |
| 16.10.2022                | 232,28                                                                                              | 21.10.2022                                                                                                                                                                                                      | 0,21                                                                                                                                                                                                    |

#### Разработка гидродинамической модели

Схематизация гидрогеологических условий показывает, что питание эксплуатационного водоносного горизонта в границах Моховского месторождения осуществляется преимущественно за счёт поверхностных вод Красноярского водохранилища гидравлически связанных с водоносным горизонтом четвертичных отложений, сложенных гравийно-галечниковыми отложениями с высокими значениями фильтрационных параметров, и за счёт подтягивания высокоминерализованных вод отложений верхнего девона, залегающих ниже. Сверху продуктивный горизонт перекрыт слоем глины и суглинков, снизу – слоями переслаивающихся песком глины и суглинков. Коэффициент фильтрации на границе с водохранилищем изменяется от 24 до 243 м/сутки, при коэффициентах фильтрации до 125 м/сутки в затопляемой части горизонта. Связь продуктивных отложений с водами Красноярского водохранилища установлена в результате



режимных наблюдений [19]. Нижележащий напорный водоносный комплекс верхнего девона распространён в западной части месторождения, сложен тонкозернистыми песчаниками. По фильтрационным параметрам комплекс неоднороден [21].

Прогноз изменения гидрогеологических условий месторождения под влиянием эксплуатации инфильтрационного водозабора в условиях изменяющегося уровня воды в Красноярском водохранилище выполнен средствами ПК *Processing Modflow 8* на основе разработанной четырёхслойной гидродинамической модели [22]. Расположение области моделирования показано на рис. 4.



**Рис. 4.** Расположение зоны охвата гидродинамической модели (на основе карт google)

**Fig. 4.** Location of the coverage area of the hydrodynamic model (based on Google maps)

Разработка гидродинамической модели выполнялась с использованием вспомогательных средств предварительной подготовки исходных данных в виде матриц неоднородности параметров с размерностью, соответствующей детальности конечно-

разностной сетки. Такие матрицы заполнялись в среде электронных таблиц ПК *Excel* по всем пространственным параметрам модели, включая абсолютные отметки рельефа, кровли и подошвы расчётных слоев модели. Интерполяция неоднородных параметров выполнялась с использованием ПК *Surfer* и сохранялась в файлах *grid*-файлы с размерностью, соответствующей детальности расчётной сетки, позволяющей выполнять передачу данных напрямую в ПК *Processing Modflow* без дополнительного преобразования. Основные параметры расчётных слоев модели, включая их фильтрационно-емкостные характеристики, полученные при оценке запасов, представлены в табл. 3.

В пределах временных интервалов до одного года могут наблюдаться относительно стабильные уровни воды в водохранилище. В связи с этим расчётный срок решения прогнозных задач моделирования в течение периода относительно стабильных уровней поверхностных вод установлен продолжительностью в один год. Дебит скважин изменялся по двум вариантам для оценки режимов их эксплуатации как при фактических параметрах нагрузки, так и при максимальных разрешенных лицензией расходах.

Поле начальных напоров задано по данным разведочных работ в пределах месторождения и с учетом понижения уровней. Величина активной пористости водовмещающих отложений задана на основе фондовых материалов, характеризующих гидрогеологические условия района.

#### Физико-химические расчеты и моделирование

Для изучения состава формирующихся под влиянием водоотбора вод и выпадающих из них вторичных минералов проведены физико-химические расчёты и моделирование в программном комплексе *HydroGeo* (автор – М.Б. Букаты, ТПУ [23]).

Моделировалось смешение вод аллювиальных и верхнедевонских отложений, рассмотренное ранее, а также оценена минералообразующая способность полученной смеси.

**Таблица 3.** Параметры слоёв, используемые в модели гидрогеологических условий водозабора

**Table 3.** Parameters of layers used in the model of hydrogeological conditions of water intake

| Водоносный горизонт<br>Aquifer | Начальные напоры, м<br>Initial heads, m | Дебит скважины 1,<br>м³/сут<br>Well 1 discharge, m³/day | Дебит скважины 2,<br>м³/сут<br>Well 2 discharge, m³/day | Параметр проницаемости границы с рекой, м/сут<br>Permeability of river bank, m/day | Отметка дна реки, м<br>Level of river bottom, m | Пористость<br>Porosity | Коэффициент фильтрации, м/сут<br>Filtration coefficient, m/day |
|--------------------------------|-----------------------------------------|---------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------|------------------------|----------------------------------------------------------------|
| aQ <sub>IV</sub>               | 231(о)/243(н)                           | –                                                       | –                                                       | –                                                                                  | –                                               | 0,5                    | 0,001                                                          |
| aQ <sub>IV</sub>               | 231(о)/243(н)                           | 153(ф)/450(п)                                           | 153(ф)/450(п)                                           | 200                                                                                | 230                                             | 0,25                   | 120                                                            |
| aQ <sub>IV</sub>               | 231(о)/243(н)                           | –                                                       | –                                                       | –                                                                                  | –                                               | 0,5                    | 0,001                                                          |
| D <sub>3</sub>                 | 245                                     | –                                                       | –                                                       | –                                                                                  | –                                               | 0,25                   | 120                                                            |

\*(о) – обмеление/shallowing, (н) – нормальные уровни вод/normal water levels, (ф) – фактические расходы/current discharge, (п) – проектные расходы/projected discharge.

При расчётах использовались параметры, характерные для средних ландшафтно-климатических условий района ( $T=10\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $P_{\text{общ}}=1\text{ атм}$ ). Система представлена 15 базовыми ионами ( $\text{H}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Fe}^{3+}$ ,  $\text{Al}^{3+}$ ,  $\text{e}^-$ ,  $\text{OH}^-$ ,  $(\text{NO}_3)^-$ ,  $(\text{SO}_4)^{2-}$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $(\text{HCO}_3)^-$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ), 33 компонентами водного раствора ( $\text{CO}_2$ ,  $(\text{CO})^{2+}$ ,  $(\text{CO}_3)^{2-}$ ,  $\text{H}_2\text{CO}_3$ ,  $(\text{NH}_4\text{CO}_3)^-$ ,  $(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$ ,  $\text{NH}_4\text{HCO}_3$ ,  $(\text{NH}_4)^+$ ,  $\text{NaHCO}_3$ ,  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ,  $(\text{NaCO}_3)^-$ ,  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ,  $(\text{NaSO}_4)^-$ ,  $\text{MgCO}_3$ ,  $(\text{MgHCO}_3)^+$ ,  $\text{Mg}(\text{HCO}_3)_2$ ,  $\text{MgSO}_4$ ,  $\text{Al}(\text{OH})_3$ ,  $(\text{AlOH})^{2+}$ ,  $(\text{Al}(\text{OH})_2)^+$ ,  $(\text{Al}(\text{OH})_4)^-$ ,  $(\text{CaHSO}_4)^+$ ,  $\text{Ca}(\text{HSO}_4)_2$ ,  $\text{CaCO}_3$ ,  $(\text{Ca}(\text{CO}_3)_2)^{2-}$ ,  $(\text{CaHCO}_3)^+$ ,  $(\text{FeHCO}_3)^+$ ,  $(\text{Fe}(\text{NO}_3)_2)^+$ ,  $(\text{FeNO}_3)^{2+}$ ,  $(\text{FeSO}_4)^+$ ,  $(\text{Fe}(\text{SO}_4)_2)^-$ ,  $(\text{FeOH})^{2+}$ ,  $(\text{Fe}(\text{OH})_4)^-$ ), 54 минералами:  $\text{Na}_{27}\text{Ca}_{10}\text{K}_{02}(\text{Fe}^{3+})_{19}\text{Mg}_{22}\text{Al}_{158}\text{Si}_{394}\text{O}_{10}(\text{OH})_2$  – монтмориллонит (Na–Ca),  $\text{Mg}_{275}\text{Al}_{15}\text{Si}_3\text{O}_{10}(\text{OH})_2$  – иллит (Mg),  $\text{Mg}_{225}\text{Al}_{15}\text{Si}_{125}\text{O}_5(\text{OH})_4$  – хлорит (Mg),  $\text{Mg}_5\text{Al}_2\text{Si}_3\text{O}_{10}(\text{OH})_8$  – хлорит (Mg),  $\text{MgAl}_2\text{Si}_4\text{O}_{11}(\text{OH})_2$  – монтмориллонит (Mg),  $\text{Mg}_{6525}(\text{Fe}^{3+})_{335}\text{Al}_{147}\text{Si}_{382}\text{O}_{10}(\text{OH})_2$  – монтмориллонит (Mg– $\text{Fe}^{3+}$ ),  $\text{Mg}_{67}(\text{Fe}^{3+})_{14}\text{Al}_{184}\text{Si}_{368}\text{O}_{10}(\text{OH})_2$  – монтмориллонит (Mg– $\text{Fe}^{3+}$ ),  $\text{Mg}_{485}(\text{Fe}^{3+})_{22}\text{Al}_{171}\text{Si}_{381}\text{O}_{10}(\text{OH})_2$  – монтмориллонит (Mg– $\text{Fe}^{3+}$ ),  $\text{Mg}_6\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_8$  х – хлорит (Mg),  $\text{Al}_4\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_8$  – хлорит (Al),  $\text{Al}_2\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$  м – монтмориллонит,  $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$  к – каолинит,  $\text{KAlSi}_3\text{O}_8$  – полевошпат (K),  $\text{K}_8\text{Al}_{256}\text{Si}_{338}\text{O}_{10}(\text{OH})_2$  – иллит ( $\text{K}_8$ ),  $\text{K}_3\text{Al}_{19}\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$  – монтмориллонит (K),  $\text{K}_5\text{Al}_{25}\text{Si}_{34}\text{O}_{10}(\text{OH})_2$  – иллит (K),  $\text{K}_{33}\text{Al}_{233}\text{Si}_{367}\text{O}_{10}(\text{OH})_2$  – бейделлит (K),  $\text{KAl}_3\text{Si}_3\text{O}_{10}(\text{OH})_2$  – мусковит,  $\text{K}_{67}\text{Al}_{267}\text{Si}_{333}\text{O}_{10}(\text{OH})_2$  – иллит ( $\text{K}_{67}$ ),  $\text{K}_5(\text{Fe}^{3+})\text{Al}_{15}\text{Si}_{34}\text{O}_{10}(\text{OH})_2$  – иллит (K– $\text{Fe}^{3+}$ ),  $\text{K}(\text{Fe}^{3+})_2\text{AlSi}_3\text{O}_{10}(\text{OH})_2$  – мусковит ( $\text{Fe}^{3+}$ ),  $\text{K}(\text{Fe}^{2+})\text{AlSi}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$  м – мусковит ( $\text{Fe}^{2+}$ ),  $\text{KMgAlSi}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$  м – мусковит (Mg),  $\text{K}_6\text{Mg}_{25}\text{Al}_{23}\text{Si}_{34}\text{O}_{10}(\text{OH})_2$  – иллит (K–Mg),  $\text{K}_{72}\text{Na}_{06}\text{Ca}_{01}(\text{Fe}^{3+})_{09}\text{Mg}_{08}\text{Al}_{259}\text{Si}_{325}\text{O}_{10}(\text{OH})_2$  – иллит,  $\text{K}_{63}\text{Na}_{017}\text{Ca}_{145}(\text{Fe}^{3+})_{327}\text{Mg}_{349}\text{Al}_{19}\text{Si}_{3421}\text{O}_{10}(\text{OH})_2$  – иллит,  $\text{K}_{754}\text{Na}_{006}\text{Ca}_{025}(\text{Fe}^{3+})_{038}\text{Mg}_{027}\text{Al}_{2672}\text{Si}_{3253}\text{O}_{10}(\text{OH})_2$  – иллит,  $\text{K}_{56}\text{Na}_{04}\text{Mg}_{24}\text{Al}_{268}\text{Si}_{322}\text{O}_{10}(\text{OH})_2$  – иллит,  $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$  – анортит,  $\text{Ca}_{15}\text{Al}_{19}\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$  – монтмориллонит (Ca),  $\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{Si}_3\text{O}_{10}(\text{OH})_2$  – пренит,  $\text{Ca}_{187}\text{Na}_{0205}\text{K}_{0205}\text{Fe}^{3+}_{141}\text{Mg}_{336}\text{Al}_{159}\text{Si}_{393}\text{O}_{10}(\text{OH})_2$  – монтмориллонит ( $\text{Fe}^{2+}$ – $\text{Fe}^{3+}$ ),  $(\text{Fe}^{2+})_4(\text{Fe}^{3+})\text{Al}_2\text{Si}_3\text{O}_{10}(\text{OH})_7$  – хлорит ( $\text{Fe}^{2+}$ – $\text{Fe}^{3+}$ ),  $(\text{Fe}^{3+})_{335}\text{Mg}_{4456}\text{Al}_{16084}\text{Si}_{382}\text{O}_{10}(\text{OH})_2$  – монтмориллонит ( $\text{Fe}^{3+}$ –Mg),  $(\text{Fe}^{2+})_{2924}\text{Mg}_{29}\text{Al}_{16984}\text{Si}_{3935}\text{O}_{10}(\text{OH})_2$  – монтмориллонит ( $\text{Fe}^{2+}$ –Mg),  $(\text{Fe}^{2+})_3\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$  т – тальк (Fe),  $\text{Na}_3\text{Al}_{19}\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$  – монтмориллонит (Na),  $\text{NaCl}$  – галит,  $\text{SiO}_2$  х – халцедон,  $\text{SiO}_2$  кв – кварц,  $\text{KHCO}_3$  – калицит,  $\text{K}_2\text{SO}_4$  – арканит,  $\text{CaCO}_3$  а – арагонит,  $\text{CaCO}_3$  к – кальцит,  $\text{CaSO}_4$  – ангидрит,  $\text{CaSO}_4(\text{H}_2\text{O})_2$  – гипс,  $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$  – доломит,  $(\text{Fe}^{2+})\text{CO}_3$  сф – сидерит сферол,  $(\text{Fe}^{2+})\text{CO}_3$  – сидерит,  $(\text{Fe}^{3+})_2\text{O}_3$  – гематит,  $(\text{Fe}^{3+})\text{OOH}$  – гётит,  $(\text{Fe}^{2+})(\text{Fe}^{3+})_2\text{O}_4$  – магнетит.

Для реализации расчётов выполнены следующие работы:

- 1) настройка модели: выбор базовых ионов, ассоциатов, минералов;
- 2) смешение вод водохранилища и девонских отложений с различными соотношениями (шаг 10 %);
- 3) анализ параметра насыщенности для полученной смеси вод.

Балансировка электронейтральности раствора, необходимая для проведения расчётов, осуществлена за счёт преобладающего в начальном растворе иона  $\text{Na}^+$ .

Смешение производится во вкладке ПК Hydro-Geo «Смешение–испарение» путём ввода составов смешиваемых вод и соотношения смешения. После смешения с выбранным соотношением оценивается параметр насыщенности (вкладка «растворение–осаждение»). Оценка возможного процесса вторичного минералообразования производилась путём моделирования взаимодействий в системе вода–порода вплоть до достижения равновесий (расчёт во вкладке «растворение–осаждение»).

## Результаты исследования и их обсуждение

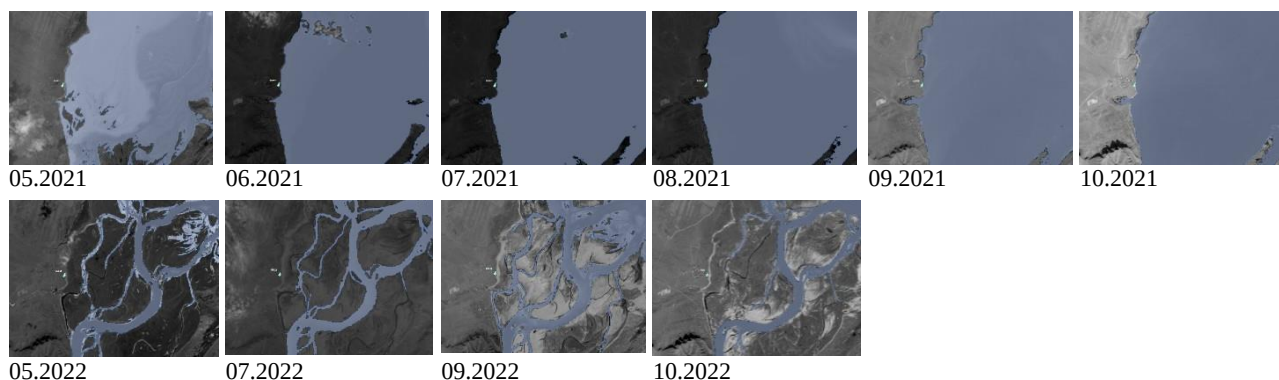
### Исследование уровневого режима поверхностных вод с привлечением данных дистанционного зондирования

В результате дешифрирования многозональных космоснимков получена оценка динамики перемещения береговой линии во времени. Часть фактического материала после обработки представлена на рис. 5.

На протяжении 2021 г. в летние месяцы наблюдались относительно небольшие колебания отметок уровней воды в верхнем бьефе Красноярской ГЭС от 241,39 до 242,44 м. В 2022 г. амплитуда изменения уровней в течение теплого времени года достигала 3,3 м при абсолютных значениях от 230,55 до 233,92 м. Оценка площадей свободной водной поверхности по результатам дешифрирования космоснимков за 2021 и 2022 гг. наглядно показывает, что 2021 г. был многоводным. В течение этого периода свободная водная поверхность водохранилища находилась на расстоянии 30–40 м от водозабора, без существенных изменений на протяжении всего года. Гидрологический режим за 2022 г. характеризуется катастрофическим обмелением реки Енисей, в процессе которого линия уреза свободной воды отступила от водозабора на расстояние до 1 км. Сопоставление уровней затопления представлено на рис. 6.

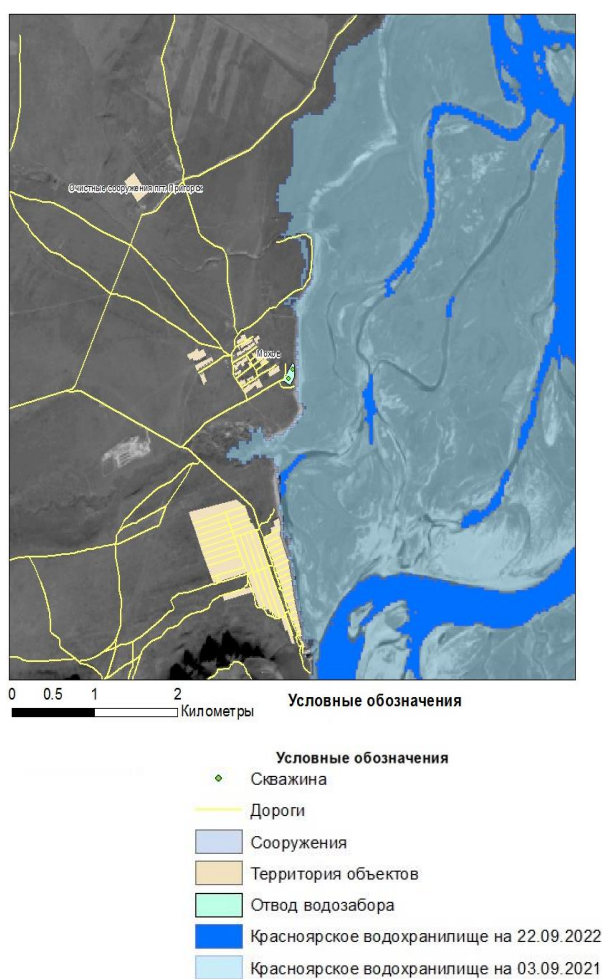
В результате сопоставления относительных площадей затопления в пределах 9-ти километрового радиуса от водозабора с уровнями воды в верхнем бьефе водохранилища на даты в пределах двухнедельного интервала от даты снимка было установлено, что наибольший коэффициент корреляции порядка 0,985 достигается при сопоставлении уровней и площадей, при условии что уровни берутся на дату через 5 суток после даты снимка (предполагая, что 5 суток соответствуют времени добега воды до створа Красноярской ГЭС).





**Рис. 5.** Схема расположения зеркала водохранилища (грязно-синим) в районе Моховского водозабора на даты наблюдений

**Fig. 5.** Layout of the reservoir mirror (dirty blue) in the area of the Mokhovsky water intake on the observation dates



В качестве подложки использован панхроматический канал снимка за 22.09.2022

**Рис. 6.** Площадь зеркала Красноярского водохранилища при различных уровнях воды

**Fig. 6.** Surface of the Krasnoyarsk reservoir water mirror at various water levels

Исходя из анализа заполненности водохранилища на основе космоснимков можно сделать вывод о том, что близким к оптимальному для пита-

ния водозабора является уровень порядка 240,4 м (по снимку за 21.10.2021 г.). При дальнейшем росте уровней значимых изменений береговой линии не происходит, а при их значимом существенном снижении (на 10.06.2022 г. до отметки близкой к 234 м) происходит обмеление, ведущее к отходу свободной воды от водозабора на расстояние до 1 км (вместо 30–50 м при типичных, близких к оптимальным, условиях).

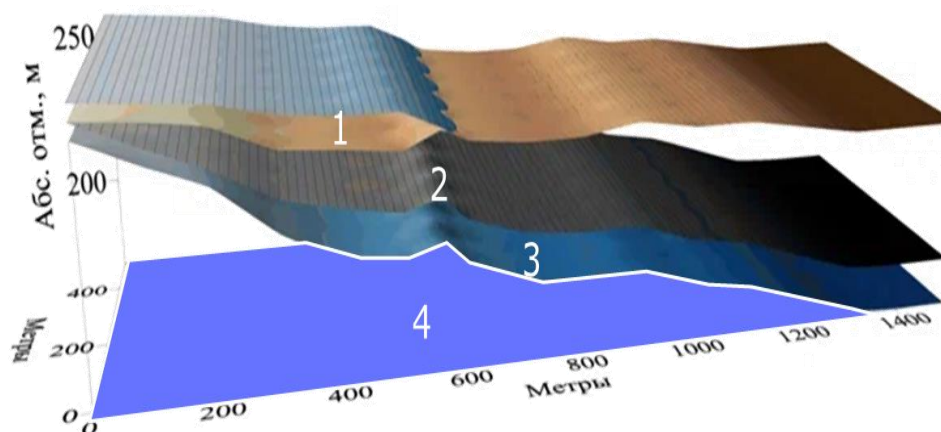
#### Гидродинамическая модель

В результате анализа гидрогеологического разреза территории и материалов проведенных на ней исследований создана четырехслойная модель (рис. 7). Работа реализована в среде программного комплекса Surfer. Данные, полученные в результате оцифровки геологических границ, использованы для создания численной гидродинамической модели средствами программного комплекса Processing Modflow 8.

Моделирование изменения уровней подземных вод проведено на прогнозный период одного гидрологического года эксплуатации водозабора со следующими возможными сочетаниями условий питания:

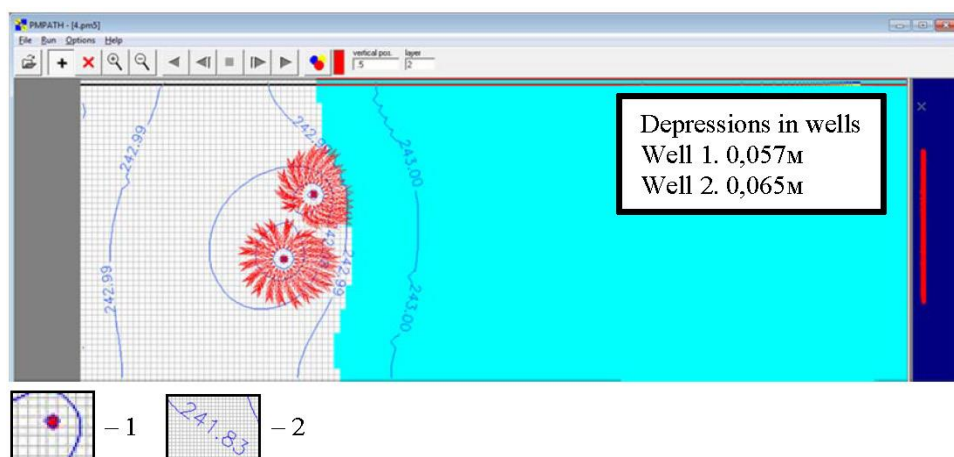
- 1) обмеление водохранилища+фактические расходы скважин;
- 2) обмеление водохранилища+максимальные по лицензии расходы скважин;
- 3) нормальные уровни водохранилища+фактические расходы скважин;
- 4) нормальные уровни водохранилища+максимальные по лицензии расходы скважин.

Помимо определения величин понижения уровней подземных вод под влиянием водоотбора, была проведена оценка размеров водозахватных областей эксплуатационных скважин на расчетный период, продолжительностью один год, для рассмотренных выше условий питания продуктивного горизонта. Результаты представлены на рис. 8, 9.



**Рис. 7.** Схематическая модель геологического разреза Моховского месторождения подземных вод: 1 – глинистые отложения; 2 – четвертичные аллювиальные отложения, представленные гравийно-галечниковым материалом с песчаным заполнителем (продуктивный водоносный горизонт); 3 – переслаивающиеся глины, суглинки; 4 – водоносный комплекс верхнедевонских отложений

**Fig. 7.** Model of the hydrogeological section of the Mokhovskiy groundwater deposit: 1 – clay deposits; 2 – Quaternary alluvial deposits represented by gravel-pebble material with sandy aggregate (productive aquifer); 3 – overlapping clays, loams; 4 – aquifer complex of the Upper Devonian sediments



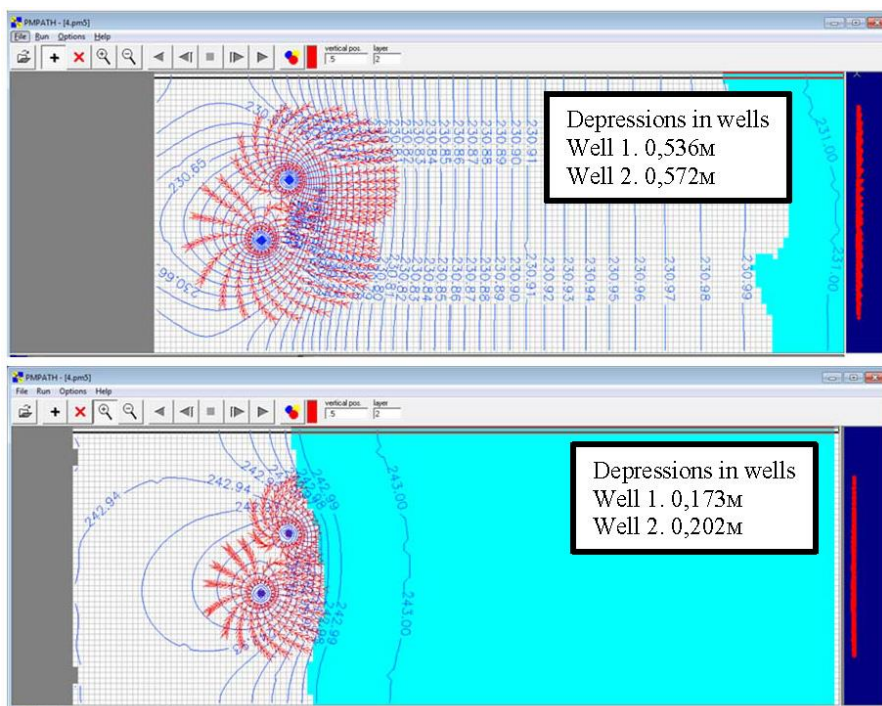
**Рис. 8.** Результат решения прогнозной геофильтрационной задачи в функции напора через один год эксплуатации скважин с расходом 308 м<sup>3</sup>/сутки: 1 – эксплуатационная скважина; 2 – гидроизогипсы и их абсолютные отметки в условиях эксплуатации по результатам моделирования

**Fig. 8.** Result of solving the forecast model (after one year) with a well flow rate of 308 m<sup>3</sup>/day: 1 – production well; 2 – water level and its absolute marks under operating conditions based on the results of modeling

В результате моделирования установлено, что при наступлении периодов сильного обмеления водохранилища питание продуктивного горизонта теоретически может существенно измениться за счёт увеличения доли притока солоноватых подземных вод девонских отложений. При нормальных уровнях в водохранилище, зафиксированных на момент подсчёта запасов подземных вод, баланс между водами четвертичных отложений и девона определяется режимом эксплуатации скважин. Это способствует интенсивному разбавлению солоноватых подземных вод пресными поверхностными, привлекаемыми из водохранилища.

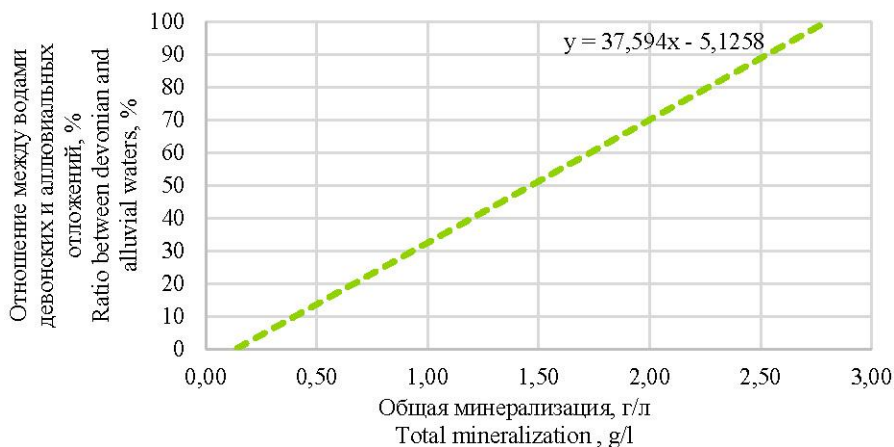
### Геохимические особенности и минералообразующая способность вод месторождения

При эксплуатации водозабора происходит изменение химического состава вод водоносного горизонта за счёт изменчивости соотношения вод девонских отложений и вод водохранилища, при определенном соотношении которых происходит превышение предельно допустимой концентрации (ПДК) по отдельным компонентам, а также активизируется выпадение вторичных карбонатных минералов на водоподъемном оборудовании [24], ведущее к скорому выходу его из строя.



**Рис. 9.** Результат решения прогнозной гидродинамической модели (анализ областей подтягивания вод за 1 год) при расходе скважин 900 м³/сутки

**Fig. 9.** Result of solving a predictive hydrodynamic model (analysis of areas of water pull-up for 1 year) at a well flow rate of 900 m³/day



**Рис. 10.** Изменение минерализации продуктивного горизонта Моховского месторождения в зависимости от доли вод девонских отложений

**Fig. 10.** Change in productive horizon mineralization of the Mokhovskiy deposit depending on the proportion of waters of Devonian deposits

Как видно из полученной зависимости (рис. 10), превышение ПДК по минерализации происходит при доле девонских вод более 32,5 %. При этом пробы из скважин водозабора, взятые в 2021 г., показывают величины минерализации порядка 1,2–1,3 г/л [24], что соответствует доле вод из девонских отложений в ~40–45 %.

Параметры насыщенности к вторичным минералам смеси из вод девонских отложений и Енисея,

оцененные при различных соотношениях вод с шагом 10 %, представленные в табл. 6, характеризуют возможность выпадения соответствующих вторичных минералов из раствора: положительные значения соответствуют насыщенности раствора к минералу и возможности его выпадения в осадок, отрицательные – не насыщенному состоянию раствора, позволяющему растворять данный минерал при его наличии.



**Таблица 5.** Параметр насыщенности\* к вторичным минералам при различных соотношениях вод из водохранилища и девонского горизонта

**Table 5.** Saturation parameter\* to secondary minerals at different ratios of water from the reservoir and the Devonian horizon

| Минерализация, г/л<br>Mineralization, g/l    |                                             | 0,14    | 0,40    | 0,67    | 0,93    | 1,20    | 1,47    | 1,73    | 2,00    | 2,26     | 2,53     | 2,80     |
|----------------------------------------------|---------------------------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|----------|----------|----------|
| Минерал<br>Mineral                           | Соотношение вод<br>Ratio                    |         |         |         |         |         |         |         |         |          |          |          |
|                                              | Формула<br>Formula                          | 1,0:0,0 | 0,9:0,1 | 0,8:0,2 | 0,7:0,3 | 0,6:0,4 | 0,5:0,5 | 0,4:0,6 | 0,3:0,7 | 0,2: 0,8 | 0,1: 0,9 | 0,0: 1,0 |
| Хлорит (Mg)<br>Chlorite (Mg)                 | $Mg_{2,25}Al_{1,5}Si_{1,25}O_5(OH)_4$       | 7,6     | 13      | 14      | 14      | 15      | 15      | 15      | 15      | 15       | 16       | 16       |
| Арагонит Aragonite                           | $CaCO_3$ а                                  | -1,8    | -0,67   | -0,086  | 0,32    | 0,63    | 0,95    | 1,1     | 1,3     | 1,4      | 1,6      | 1,7      |
| Кальцит/Calcite                              | $CaCO_3$ к                                  | -1,9    | -0,76   | -0,17   | 0,24    | 0,55    | 0,87    | 1       | 1,2     | 1,4      | 1,5      | 1,6      |
| Ангидрит/Anhydrite                           | $CaSO_4$                                    | -8,8    | -4,8    | -3,8    | -3,3    | -2,9    | -2,6    | -2,4    | -2,2    | -2       | -1,9     | -1,8     |
| Гипс/Gypsum                                  | $CaSO_4(H_2O)_2$                            | -7,1    | -3,1    | -2,2    | -1,6    | -1,3    | -0,98   | -0,75   | -0,57   | -0,41    | -0,27    | -0,15    |
| Доломит/Dolomite                             | $CaMg(CO_3)_2$                              | -2,7    | 0,93    | 2,2     | 3       | 3,7     | 4,3     | 4,6     | 5,1     | 5,3      | 5,6      | 5,8      |
| Сидерит (сферолит)<br>Siderite (spherical)   | $(Fe^{2+})CO_3$ сф                          | -3,2    | -3,2    | -3,3    | -3,3    | -3,3    | -3,2    | -3,3    | -3,3    | -3,3     | -3,3     | -3,4     |
| Сидерит/Siderite                             | $(Fe^{2+})CO_3$                             | -2,3    | -2,3    | -2,4    | -2,4    | -2,4    | -2,4    | -2,4    | -2,4    | -2,5     | -2,5     | -2,5     |
| Хлорит/Chlorite<br>( $Fe^{2+}$ - $Fe^{3+}$ ) | $(Fe^{2+})_4(Fe^{3+})Al_2Si_3O_{10}(OH)_7O$ | 7,2     | 4,4     | 3,9     | 3,4     | 3       | 3,2     | 2,2     | 2,4     | 1,7      | 1,6      | 1,3      |
| Гематит/Hematite                             | $(Fe^{3+})_2O_3$                            | 5,8     | 4,9     | 4,6     | 4,4     | 4,1     | 4,3     | 3,7     | 3,8     | 3,5      | 3,4      | 3,2      |
| Гётит/Goetite                                | $(Fe^{3+})OOH$                              | 6,5     | 6,1     | 5,9     | 5,8     | 5,7     | 5,8     | 5,5     | 5,5     | 5,4      | 5,3      | 5,2      |
| Магнетит/Magnetite                           | $(Fe^{2+})(Fe^{3+})_2O_4$                   | 16      | 15      | 14      | 14      | 13      | 14      | 13      | 13      | 12       | 12       | 12       |

Железа, как и алюминия, в водах крайне мало (предполагаем, что в микроскопических количествах данные элементы в водах присутствуют, поэтому приняты значения содержания порядка 0,000001 мг/л для оценки возможности минералообразования с учетом этих элементов), поэтому и минералов, их содержащих, образовываться может немного. В значимых объемах в виде вторичной фазы могут выпадать арагонит, кальцит и доломит.

Характерно, что при наблюдаемом в продуктивном водоносном горизонте соотношении вод, близком к 0,7:0,3–0,6:0,4, начинается выпадение в осадок кальцита и арагонита, что ведет к быстрому накоплению вторичных минеральных образований на водоподъемном оборудовании и выходу его из строя. При этом изначально предполагалось, что водозабор будет эксплуатироваться в типично инфильтрационном режиме (запасы утверждены в 15,5 тыс. м<sup>3</sup>/сутки) с разбавлением вод продуктивного горизонта водами водохранилища. Как видно из результатов моделирования, проблемы с образованием вторичных минералов можно было бы избежать при данном сценарии его работы.

## Вывод

Изучена возможность применения гидродинамического моделирования для прогноза работы водозабора в условиях изменчивости уровня воды в водохранилище и оценки влияния режима поверхностных вод на условия эксплуатации Моховского месторождения подземных вод.

В результате численного моделирования условий эксплуатации водозабора средствами ПК

Processing Modflow получена оценка влияния положения уреза береговой линии и отметок уровня поверхностных вод на условия водоотбора за счёт перераспределения балансовых составляющих привлекаемых ресурсов и изменения качества подземных вод.

Показано, что исходные данные для корректного задания граничных условий, используемых при прогнозных оценках на основе моделирования гидрогеологических условий, могут быть уточнены в результате дешифрирования многозональных космоснимков.

Убедительно доказано, что данные, получаемые дистанционно, позволяют на численных гидродинамических моделях не только корректировать размеры области питания и поясов зоны санитарной охраны инфильтрационных водозаборов, но и более обоснованно подходить к построению расчётных конечно-разностных сеток.

В результате оценок минеральных равновесий, полученных средствами ПК HydroGeo, выявлены основные черты эволюции состава подземных вод эксплуатационного водоносного горизонта аллювиальных отложений Моховского месторождения в процессе их смешения с поверхностными водами Красноярского водохранилища и с водами верхнедевонских отложений, залегающими ниже подошвы продуктивного пласта. Даны оценки рисков образования вторичных минералов на водоподъемном оборудовании и возможного ухудшения качества подземных вод за счёт перетоков из подстилающего водоносного горизонта.

Таким образом, применение гидродинамического моделирования не только позволяет эффективно контролировать изменчивость уровней в скважинах, но и служит обоснованием количественных параметров смешения природных вод для постановки и решения прогнозных задач гидрогеохимического моделирования.

Комплексный подход к использованию цифровых технологий при анализе гидрогеологических условий инфильтрационных водозаборов позволяет системно и более обоснованно подходить к процессу планирования и организации водоотбора не только на рассматриваемом водозаборе, но и на других аналогичных объектах.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шевелев Ф.А., Орлов Г.А. Водоснабжение больших городов зарубежных стран. – М.: Стройиздат, 1987. – 351 с.
2. Kołaska S., Jeż-Walkowiak J., Dymaczewski Z. Changes of physicochemical and microbiological parameters of infiltration water at Dębina intake in Poznań, unique conditions – a flood // E3S Web of Conferences. – 2018. – Vol. 30. – article 01004. DOI: 10.1051/e3sconf/20183001004
3. Kubiak-Wójcicka K., Jamorska I., Górski L. Identification of risks for drinking water intakes in urbanized area: the case study of Toruń (Central Poland) // Water. – 2021. – Vol. 13. – № 23. – Article 3378. DOI: 10.3390/w13233378
4. Analysis of the performance of bank filtration for water supply in arid climates: case study in Egypt / A. Abdelrady, S. Sharma, A. Sefelnasr, M. El-rawy, M. Kennedy // Water. – 2020. – Vol. 12. – № 6. – article 1816. DOI: 10.3390/w12061816
5. Challenges and possible solutions for riverbank filtration sites in Upper Egypt / M. ElHadary, A. Salah, M. Beshoy, R. Peters, A. Ghanem, A. Elansary, R. Wahaab, M. Mostafa // Air, Soil and Water Research. – 2024. – Vol. 17. – P. 1–11. DOI: 10.1177/11786221241274480
6. Riverbank filtration: a frontline treatment method for surface and groundwater – African perspective / F. Uwimpaye, G. Twagirayezu, I. Odiri Agbamu, K. Mazurkiewicz, J. Jeż-Walkowiak // Environmental Monitoring and Assessment. – 2025. – Vol. 11. – article 100331. DOI: 10.1007/s10661-024-13413-4
7. National feasibility study & roadmap for riverbank filtration in Egypt. Available at: <https://unhabitat.org/> (дата обращения 03.02.2025).
8. Grischek T., Bartak R. Riverbed clogging and sustainability of riverbank filtration // Water. – 2016. – Vol. 8. – № 12. – Article 604.
9. Подземные воды Республики Хакасия и водоснабжение населения / Д.С. Покровский, Е.М. Дутова, А.А. Булатов, К.И. Кузеванов. – Томск: Изд-во НТЛ, 2001. – 300 с.
10. Изменение гидрогеохимических условий при эксплуатации Академического месторождения / Е.М. Дутова, И.В. Вологодина, Д.С. Покровский, Л.Д. Замооровская // Известия Томского политехнического университета. – 2008. – Т. 312. – № 1. – С. 59–63.
11. Токарев И.В., Исаков В.А., Исакова Т.Н. Использование изотопных методов для оценки ресурсов из запасов подземных вод // Разведка и охрана недр. – 2024. – № 1. – С. 74–82. DOI: 10.53085/0034-026X\_2024\_1\_74.
12. Yalaletdinova A., Kantor E., Galimova Yu. Drinking-water quality risk assessment based on parameters with organoleptic (taste and odor) effects observed in water from surface water intake and infiltration water intake facilities // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2021. – Vol. 670. – Article 012046. DOI: 10.1088/1755-1315/670/1/012046.
13. Modeling the content of chloroform in drinking water infiltration intake by periods of the annual cycle: low-water and permanent watercourse / M. Malkova, N. Minchenkov, O. Kantor, E. Kantor // E3S Web of Conferences. – 2023. – Vol. 390. – Article 05002. DOI: 10.1051/e3sconf/202339005002.
14. Гидрогеологические аспекты развития водохозяйственных технологий урбанизированных территорий на примере Оренбуржья / А.Я. Гаев, И.В. Куделина, И.Н. Алферов, Т.В. Леонтьева // Вестник Пермского университета. Геология. – 2022. – Т. 21. – № 1. – С. 24–33. DOI: 10.17072/psu.geol.21.1.24
15. Плотноков Н.И. Поиски и разведка пресных подземных вод. – М.: Недра, 1985. – 370 с.
16. Никитин М.Р. Оценка влияния водохранилищ на гидрогеологические условия / отв. ред. И.С. Зекцер. – М.: Наука, 1990. – 94 с.
17. Боровский Б.В., Дробноход Н.И., Язвин Л.С. Оценка запасов подземных вод. – Киев: Выща шкклоа, 1989. – 407 с.
18. Effect of initial treatment of surface water at an artificial infiltration intake / J. Jeż-Walkowiak, A. Makala, B. Mądrecka-Witkowska, M. Michalkiewicz, N. Kolwicz. // Desalination and Water Treatment. – 2021. – Vol. 226. – P. 62–76. DOI: 10.5004/dwt.2021.27264.
19. Росводресурсы. URL: <https://voda.gov.ru/> (дата обращения 03.02.2025).
20. Mondejar J.P., Tongco A.F. Near infrared band of Landsat 8 as water index: a case study around Cordova and Lapu-Lapu City, Cebu, Philippines // Sustain Environ Res. – 2019. – Vol. 29. – № 16. DOI: 10.1186/s42834-019-0016-5
21. Материалы создания Государственной гидрогеологической карты Российской Федерации масштаба 1:1000000 (третье поколение) лист N-46 – Абакан–Красноярск, 2017. – Красноярск, Красноярский филиал ФБУ "ТФГИ по СФО".
22. Кузеванов К.И. Моделирование работы системы взаимодействия скважин в среде PMWIN (Processing Modflow). – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2011. – 64 с.
23. Dutova E.M., Nikitenkov A.N., Kuzevanov K.I. The HydroGeo Software Package and Its Usage // E3S Web of Conferences. 16th International Symposium on Water-Rock Interaction (WRI-16) and 13th International Symposium on Applied Isotope Geochemistry (1st IAGC International Conference). – Tomsk, Russia, July 21–26, 2019. – Vol. 98. DOI: 10.1051/e3sconf/20199804005
24. ГУП РХ «Хакресводоканал». URL: <https://www.hakresvod.ru/> (дата обращения 03.02.2025).



## Информация об авторах

**Александра Васильевна Никитенкова**, аспирант отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30, avk92@tpu.ru, <https://orcid.org/0009-0004-2684-9085>

**Алексей Николаевич Никитенков**, кандидат геолого-минералогических наук, доцент отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30, nik@tpu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8539-1420>

**Екатерина Матвеевна Дутова**, доктор геолого-минералогических наук, профессор отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30, dutova@tpu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1648-6685>

**Константин Иванович Кузеванов**, кандидат геолого-минералогических наук, доцент отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30, kki55@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3219-7031>

Поступила в редакцию: 03.03.2025

Поступила после рецензирования: 11.03.2025

Принята к публикации: 19.03.2025

## REFERENCES

1. Shevelev F.A., Orlov G.A. *Water supply in large cities of foreign countries*. Moscow, Stroyizdat Publ., 1987. 351 p. (In Russ.)
2. Kołaska S., Jeż-Walkowiak J., Dymaczewski Z. Changes of physicochemical and microbiological parameters of infiltration water at Dębina intake in Poznań, unique conditions – a flood. *E3S Web of Conferences*, 2018, vol. 30, article 01004. DOI: 10.1051/e3sconf/20183001004
3. Kubiak-Wójcicka K., Jamorska I., Górski L. Identification of risks for drinking water intakes in urbanized area: the case study of Toruń (Central Poland). *Water*, 2021, vol. 13, no. 23, Article 3378. DOI: 10.3390/w13233378
4. Abdelrady A., Sharma S., Sefelnasr A., El-Rawy M., Kennedy M. Analysis of the performance of bank filtration for water supply in arid climates: case study in Egypt. *Water*, 2020, vol. 12, no. 6, article 1816. DOI: 10.3390/w12061816
5. ElHadary M., Salah A., Beshoy M., Peters R., Ghanem A., Elansary A., Wahaab R., Mostafa M. Challenges and possible solutions for riverbank filtration sites in Upper Egypt. *Air, Soil and Water Research*, 2024, vol. 17, pp. 1–11. DOI: 10.1177/11786221241274480
6. Uwimpaye F., Twagirayezu G., Odiri Agbamu I., Mazurkiewicz K., Jeż-Walkowiak J. Riverbank filtration: a frontline treatment method for surface and groundwater – African perspective. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2025, vol. 11, article 100331. DOI: 10.1007/s10661-024-13413-4
7. *National feasibility study & roadmap for riverbank filtration in Egypt*. Available at: <https://unhabitat.org/> (accessed 3 February 2025).
8. Grischek T., Bartak R. Riverbed clogging and sustainability of riverbank filtration. *Water*, 2016, vol. 8, no. 12, article 604.
9. Pokrovsky D.S., Dutova E.M., Bulatov A.A., Kuzevanov K.I. *Groundwater of the Republic of Khakassia and water supply to the population*. Tomsk, NTL Publ. House, 2001. 300 p. (In Russ.)
10. Dutova E.M., Vologdina I.V., Pokrovsky D.S., Zamorovskaya L.D. Changes in hydrogeochemical conditions during the exploitation of the Academic deposit. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2008, vol. 312, no. 1, pp. 59–63. (In Russ.)
11. Tokarev I.V., Isakov V.A., Isakova T.N. The use of isotope methods for assessing groundwater reserves. *Exploration and protection of the subsoil*, 2024, no. 1, pp. 74–82. (In Russ.) DOI: 10.53085/0034-026X\_2024\_1\_74.
12. Yalaletdinova A., Kantor E., Galimova Yu. Drinking-water quality risk assessment based on parameters with organoleptic (taste and odor) effects observed in water from surface water intake and infiltration water intake facilities. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2021, vol. 670, Article 012046. DOI: 10.1088/1755-1315/670/1/012046.
13. Malkova M., Minchenkov N., Kantor O., Kantor E. Modeling the content of chloroform in drinking water infiltration intake by periods of the annual cycle: low-water and permanent watercourse. *E3S Web of Conferences*, 2023, vol. 390, article 05002. DOI: 10.1051/e3sconf/202339005002.
14. Gaev A.Ya., Kudelina I.V., Alferov I.N., Leontieva T.V. Hydrogeological aspects of the development of water management technologies in urbanized territories on the example of Orenburg region. *Bulletin of Perm University. Geology*, 2022, vol. 21, no. 1, pp. 24–33. (In Russ.) DOI: 10.17072/psu.geol.21.1.24
15. Plotnikov N.I. *Prospecting and exploration of fresh groundwater*. Moscow, Nedra Publ., 1985. (In Russ.)
16. Nikitin M.R. *Assessment of the influence of reservoirs on hydrogeological conditions*. Ed. by I.S. Zektser. Moscow, Nauka Publ., 1990. 94 p. (In Russ.)
17. Borevsky B.V., Drobnokhod N.I., Yazvin L.S. *Assessment of groundwater reserves*. Kiev, Visha Shkola Publ., 1989. 407 p. (In Russ.)
18. Jeż-Walkowiak J., Makala A., Mądrecka-Witkowska B., Michalkiewicz M., Kolwicz N. Effect of Initial treatment of surface water at an artificial infiltration intake. *Desalination and Water Treatment*, 2021, vol. 226, pp. 62–76. DOI: 10.5004/dwt.2021.27264.
19. *Rosvodresursy*. Available at: <https://voda.gov.ru/> (accessed 3 February 2025).

20. Mondejar, J.P., Tongco, A.F. Near infrared band of Landsat 8 as water index: a case study around Cordova and Lapu-Lapu City, Cebu, Philippines. *Sustain Environ Res*, 2019, vol. 29, no. 16. DOI: 10.1186/s42834-019-0016-5
21. *Materials for the creation of the 1:1000000 scale State Hydrogeological Map of the Russian Federation (third generation) sheet N-46 – Abakan – Krasnoyarsk, 2017*. Krasnoyarsk, Krasnoyarsk department of TFGI on SFO (In Russ.)
22. Kuzevanov K.I. *Modeling the operation of the well interaction system in the PMWIN (Processing Modflow) environment*. Tomsk, Tomsk Polytechnic University Publ. House of, 2011. 64 p. (In Russ.)
23. Dutova E.M., Nikitenkov A.N., Kuzevanov K.I. The HydroGeo Software Package and Its Usage. *E3S Web of Conferences. 16th International Symposium on Water-Rock Interaction (WRI-16) and 13th International Symposium on Applied Isotope Geochemistry (1st IAGC International Conference)*. Tomsk, Russia, July 21–26, 2019. Vol. 98. DOI: 10.1051/e3sconf/20199804005
24. *GUP RH "Khakresvodokanal"*. Available at: <https://www.hakresvod.ru/> (accessed 3 February 2025).

#### Information about the authors

**Alexandra V. Nikitenkova**, Postgraduate Student, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation, avk92@tpu.ru, <https://orcid.org/0009-0004-2684-9085>

**Aleksey N. Nikitenkov**, Cand. Sc., Associate Professor, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation, nik@tpu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8539-1420>

**Ekaterina M. Dutova**, Dr. Sc., Professor, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation, dutova@tpu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1648-6685>

**Konstantin I. Kuzevanov**, Cand. Sc., Associate Professor, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation, kki55@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3219-7031>

Received: 03.03.2025

Revised: 11.03.2025

Accepted: 19.03.2025