

## МОДЕЛИ В ИНЖЕНЕРНОЙ ГЕОЛОГИИ И ГИДРОГЕОЛОГИИ

УДК 556.332.72

# МОДЕЛИРОВАНИЕ ИНТРУЗИИ МОРСКИХ ВОД ПРИ ВОДООТБОРЕ ИЗ ПРИБРЕЖНЫХ ВОДОНОСНЫХ ГОРИЗОНТОВ

© 2024 г. Е. В. Дробязко<sup>1</sup>\*, А. В. Расторгуев<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Московский Государственный Университет имени М.В. Ломоносова,  
Ленинские горы, 1, Москва, 119991 Россия

\*E-mail: levic.kate@gmail.com

Поступила в редакцию 09.10.2023 г.

После доработки 24.10.2023 г.

Принята к публикации 15.11.2023 г.

Интрузии морских вод в прибрежные водоносные горизонты являются объектом исследования гидрогеологов с давних пор до настоящего времени. Для прогнозов развития интрузий применяется широкий спектр методов: аналитические, численно-аналитические и численные. В статье рассмотрен прибрежный водозабор, из-за интенсивной эксплуатации которого в извлекаемых водах выросли минерализация, общая жесткость и содержание хлоридов. Для доказательства продвижения интрузии морских вод было проведено химическое опробование воды из водозаборных скважин, по результатам которого были получены значения хлор-бромного коэффициента, указывающего на наличие примеси морских вод в пресных подземных. Оценка интрузии морских вод проводилась с помощью численно-аналитического и численного моделирования. При построении трехмерной численной модели особое внимание уделено характеру связи эксплуатируемого водоносного горизонта с морем. На численной модели было получено изменение положения интрузии морских вод в разные периоды эксплуатации водозабора с различной величиной водоотбора, после чего было проведено сравнение результатов расчетов численно-аналитической и численной моделей.

**Ключевые слова:** водозабор, интрузия, морские воды, минерализация, численное моделирование

**DOI:** 10.31857/S0869780924010019, **EDN:** GOYOSA

## ВВЕДЕНИЕ

Интрузии морских вод являются серьезной проблемой для всех водозаборов, расположенных в приморских районах [1, 3]. Продвижение соленых вод к водозаборным скважинам приводит к ухудшению качества подземных вод и к выводу скважин из эксплуатации на долгое время.

Целью данной работы является выявление и оценка интрузии морских вод на примере прибрежного водозабора подземных вод.

Для изучения интрузии морских вод был выбран прибрежный водозабор, на котором на протяжении истории эксплуатации отмечалось ухудшение качества подземных вод. Главным предположением причины роста минерализации, общей жесткости и хлоридов является интрузия морских вод. Для доказательства ее продвижения к водозаборным скважинам было проведено химическое опробование воды с определением хлор-бромного коэффициента. Для расчета интрузии морских вод были использованы численно-аналитическая и численные модели.

## ГЕОЛОГО-ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ

Изучаемый водозабор расположен в приустьевой части долины реки, где развиты три водоносных горизонта (рис. 1).

1. Аллювиальный в песках, суглинках, супесях верхней части разреза аллювиальных отложений (основной водоносный горизонт аллювия) мощностью 20–50 м. От нижележащего серравальско-мессинского горизонта местами отделен толщей плотных глин мощностью, достигающей 7–8 м. На отдельных участках водовмещающие породы описываемого водоносного горизонта непосредственно залегают на известняках серравальско-мессинского водоносного горизонта. Удельные дебиты скважин изменяются от 0.1 до 10 л/с.

2. Серравальско-мессинский водоносный горизонт на данной территории является основным эксплуатационным и широко используется для хозяйственно-питьевого водоснабжения. Известняки в долине реки обладают очень высокой проницаемостью, дебиты скважин при откачке составляют 6–60 л/с. Подстилается серравальско-мессинский водоносный горизонт толщей серравальских

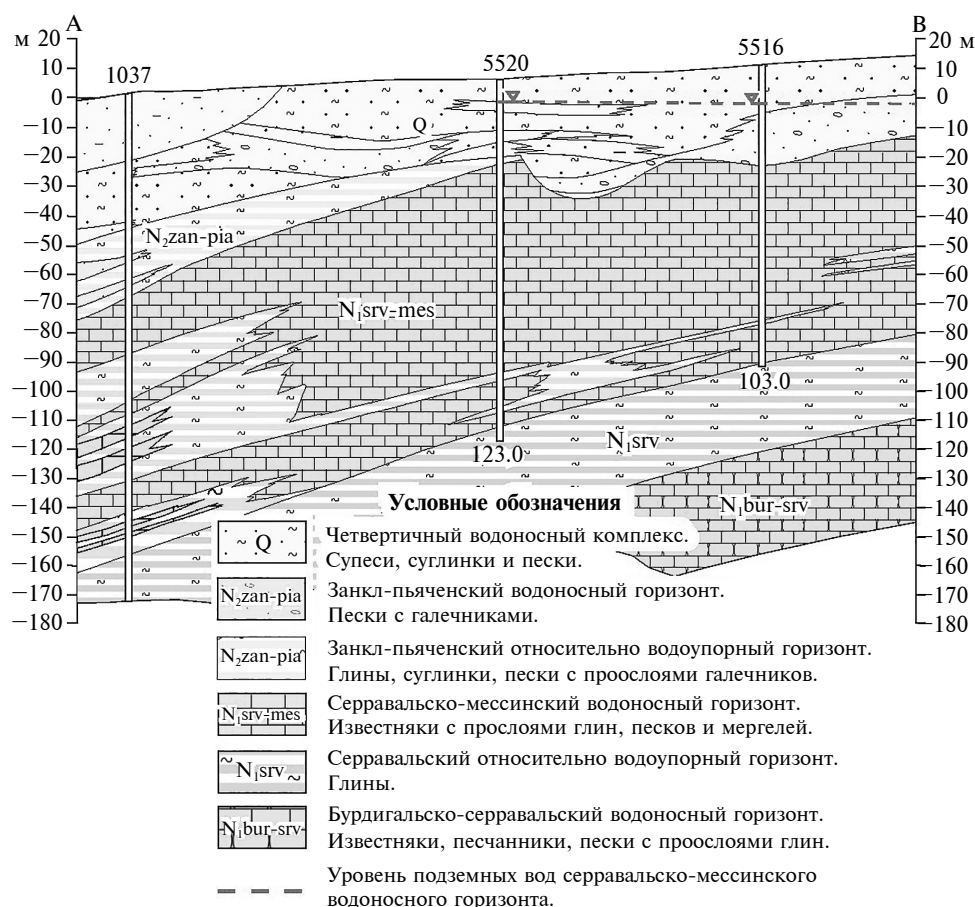


Рис. 1. Гидрогеологический разрез в районе Орловского водозабора.

глин, надежно отделяющих его от залегающего ниже бурдигальско-серравальского водонасыщенного горизонта. Важной особенностью данного района является ограниченная область распространения серравальско-мессинских известняков, к которым приурочен эксплуатируемый водонасыщенный горизонт. Известняки имеют распространение в виде полосы вдоль моря шириной 10–25 км.

3. Бурдигальско-серравальский водонасыщенный горизонт распространен в долине реки повсеместно, залегает третьим от поверхности на глубине 140–214 м. Водовмещающие породы представлены известняками, песчаниками, песками с прослоями глин в нижней части разреза. Горизонт напорный, дебиты скважин составили 1.1–10 л/с при понижениях уровня 17–57 м.

#### Опыт эксплуатации водозабора

Исследуемый водозабор состоит из 16 эксплуатационных скважин, из них 2 резервные, а 7 скважин законсервированы. Эксплуатационные скважины водозабора оборудованы на серравальско-мессинский водонасыщенный горизонт средне-верхнесарматских отложений. На протяжении работы водозабора дебит откачки изменялся, что приводило

и к изменению гидрохимической обстановки. В работе водозабора выделяется 6 периодов с характерными гидродинамическими и гидрохимическими условиями, из представленных в табл. 1 данных можно судить о связи интенсивности эксплуатации водозабора и повышении минерализации вод.

#### Подтверждение морской интрузии на основе хлор-бромного коэффициента

Одна из основных характеристик морской воды — отношение содержания хлора к содержанию брома. Для мирового океана оно равно 293 [3]. Для пресных вод это отношение значительно больше 300, поэтому и для окраинных морей, куда поступает большое количество пресных вод, оно имеет также более высокое значение, например, значение хлор-бромного коэффициента для Черного моря составляет 316 [3]. Таким образом, хлор-бромный коэффициент является одним из показателей, позволяющих определить наличие интрузии морских вод в пресные подземные воды.

Для выяснения природы загрязнения подземных вод на исследуемом водозаборе в июле 2021 г. были проведены полевые исследования, в ходе которых были отобраны пробы воды из эксплуатационных

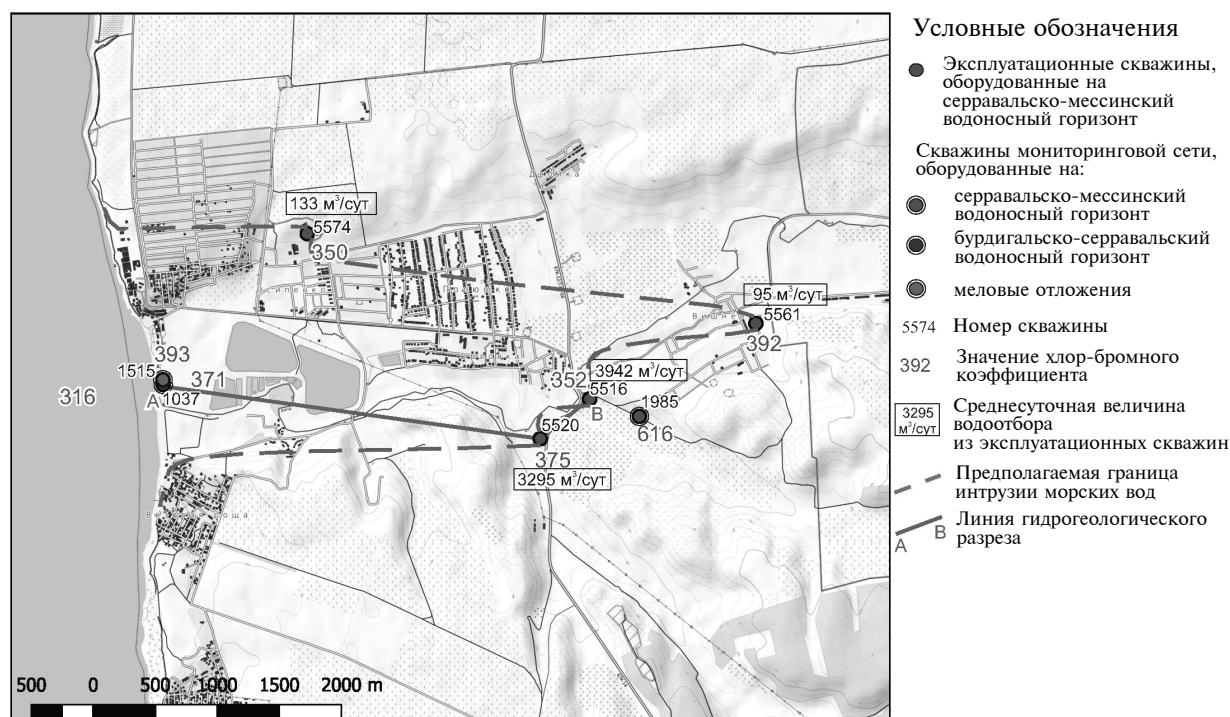


Рис. 2. Распределение значений хлор-бромного коэффициента в районе водозабора.

скважин №№ 5574, 5516, 5520, 5561 (рис. 2). Также для проведения химического анализа были взяты пробы воды из скважин Государственной опорной наблюдательной сети (ГОНС), см. на рис. 2 точки под номерами 1515, 1037 и 1985.

По результатам опробования был рассчитан хлор-бромный коэффициент для каждой из скважин (см. рис. 2). Согласно полученным данным, в эксплуатационных скважинах водозабора отмечаются значения хлор-бромного коэффициента, характерные для вод, содержащих примесь морской воды. В то же время в скважине ГОНС (см. рис. 2, № 1985), оборудованной также на ссравальско-мессинский водоносный горизонт, это значение составляет в 1.75 раз больше и соответствует значению, присущему пресным водам. Можно сделать вывод, что данное различие связано с тем, что скв. 1985, расположенная выше исследуемого водозабора по потоку, не является эксплуатационной, следовательно, не подтягивает морские воды.

Также по результатам химического опробования было рассчитано смешение пресных подземных и морских вод в районе исследования. В скважинах водозабора разбавление пресной воды морской по хлоридам составляет порядка 3.5%. При таком соотношении расчетное содержание брома в пресных подземных водах приближено к нулю, что подтверждается лабораторными исследованиями, согласно которым содержание брома в подземных водах, движущихся с берега ниже порога определения ( $< 0.05$  мг/л). Данные расчеты подтверждают морское происхождение брома в скважинах водозабора.

Результаты химических опробований воды из скважин водозабора, а также данные мониторинга, приведенные выше, позволяют сделать вывод о том, что причиной ухудшения качества подземных вод на исследуемом водозаборе является морская интрузия. Также полученные данные позволяют

Таблица 1. Опыт эксплуатации водозабора

| Период | Годы                   | Водоотбор, тыс. м <sup>3</sup> /сут | Минерализация, г/л |
|--------|------------------------|-------------------------------------|--------------------|
| 1      | 1970–1984              | 37.6–53.8                           | 0.6–1.0            |
| 2      | 1984–1990              | 45.3–19.3                           | 2.0–6.0            |
| 3      | 1990–1997              | 19.3–32.2                           | 1.4–2.4            |
| 4      | 1998–2001              | 0.40–0.94                           | 1.5–1.7            |
| 5      | 2001–2009              | 0.21–0.98                           | 0.7–1.7            |
| 6      | 2009 — настоящее время | 16.0–18.7                           | 0.95–1.24          |

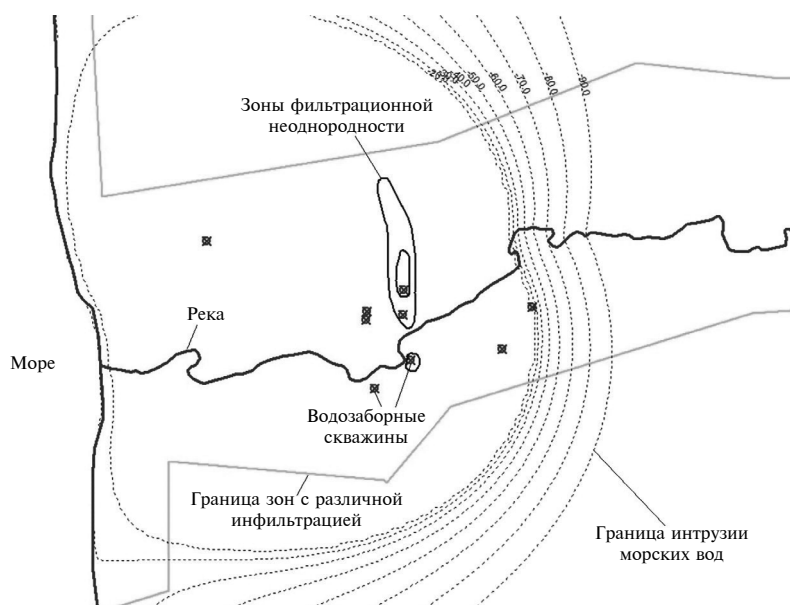


Рис. 3. Положение границы раздела пресных и соленых вод, полученное на основе МАЭ.

провести предполагаемый контур интрузии морских вод в районе водозабора (см. рис. 2).

#### *Расчет интрузии морских вод с помощью численно-аналитического моделирования*

Первая оценка развития интрузии была выполнена на плановой модели численно-аналитически, методом аналитических элементов (МАЭ). При этом принималась предпосылка о резкой границе раздела пресных и соленых вод. На модели учтен эксплуатационный водоносный горизонт и неоднородность распределения фильтрационных свойств и инфильтрационного питания. Инфильтрационное питание получено на основе работ коллектива кафедры гидрогеологии. Модель рассчитывалась с современной величиной водотбора,  $18.7 \text{ м}^3/\text{сут}$ . Фильтрационные свойства серравальско-мессинского водоносного горизонта задавались в соответствии с проведенными ранее опытно-фильтрационными работами. Плотность морских и пресных вод задавалась  $1012 \text{ кг/м}^3$  и  $1000 \text{ кг/м}^3$ , соответственно. Результаты расчетов МАЭ распространения интрузии с помощью программы GFLOW [8] приведены на рис. 3.

Оценка, полученная на основе МАЭ, показывает наличие интрузии морских вод на исследуемом водозаборе. Однако эти расчеты дают предельную стационарную оценку развития интрузии. Допущениями при расчетах были: однослойное строение, прямая связь с морем и не учёт дисперсии. Для оценок более приближенных к реальности было выполнено численное моделирование.

#### *Уточнение связи водоносного горизонта с морем на основе численных расчетов на профильных моделях*

Согласно проводимым ранее исследованиям [5], морские донные отложения в районе изучаемого водозабора представлены песками, благодаря чему связь подземных вод с морем должна быть хорошей. Однако помимо четвертичных отложений между серравальско-мессинским водоносным горизонтом и морем залегают плиоценовые отложения (закл-пьяченский относительно водоупорный горизонт). Определение состава плиоценовых отложений крайне важно для понимания характера связи морских вод с эксплуатируемым водоносным горизонтом. Согласно данным бурения, плиоценовые отложения представлены глинами с прослоями песков с галькой. Поскольку скважины пробурены только в сухопутной части района, а данных бурения на акватории нет, состав отложений плиоцена под морем остается неизвестным. Были выдвинуты два возможных предположения о составе этих отложений, основанных на имеющихся данных:

1. Плиоценовые отложения под морем представлены глинами. В этом случае морские воды будут проникать в серравальско-мессинский водоносный горизонт путем продвижения по четвертичному водоносному горизонту. После выклинивания плиоценовых глин, в районе исследуемого водозабора соленые воды будут проникать в серравальско-мессинские известняки.

2. Плиоценовые отложения под морем представлены песками с галькой, и морские воды могут проникать в эксплуатационный водоносный горизонт не только путем продвижения по четвертичному

водоносному горизонту, но и путем фильтрации через пески непосредственно под морем.

Для уточнения состава плиоценовых отложений были построены профильные численные модели в программе FEFLOW [6] с разной степенью взаимосвязи моря и подземных горизонтов. Одна из моделей реализует прямую связь моря с подземными водами через пески, у другой связь затруднена глинами.

В обоих вариантах была принята 3-слойная схематизация: четвертичный водоносный комплекс, водоупорные в сухопутной части плиоценовые отложения и серравальско-мессинский водоносный горизонт. Коэффициенты фильтрации на моделях были заданы в соответствии с проведенными ранее опытно-фильтрационными работами в скважинах исследуемого водозабора. *Первый от поверхности слой* соответствует четвертичному водоносному горизонту, представленному переслаиванием песков, супесей и суглинков. Коэффициент фильтрации первого модельного слоя составил 4 м/сут. *Второй слой* — занкл-пьяченский относительно водоупорный горизонт, в сухопутной части представленный глинами. Отложения горизонта под морем в разных вариантах расчета задавались с коэффициентом фильтрации, соответствующим

хорошо проницаемым отложениям (4 м/сут) и глинам (0.0001 м/сут). *Третий модельный слой* соответствует серравальско-мессинскому водоносному горизонту, согласно проведенным опытно-фильтрационным работам, фильтрационные параметры которого на участке расположения скважин водозабора характеризуются более высокими значениями. Распределение коэффициентов фильтрации на профильных моделях представлено на рис. 4. В скважинах водозабора уровень подземных вод находится в пределах от  $-7.5$  м до  $-7.8$ , минерализация достигает до 1300 мг/л.

Результаты моделирования за 50 лет показали (рис. 5), что в случае наличия глин в плиоценовых отложениях под морем, существенного развития интрузии, наблюдаемой в виде увеличения минерализации на водозаборе, не отмечается, что не соответствует результатам мониторинга. Наличие песков в плиоценовых отложениях под морем позволяет объяснить наблюдаемое продвижение интрузии.

#### Расчет интрузии морских вод на трехмерной численной модели

Численные модели позволяют учесть больше факторов, определяющих миграцию (влияние дисперсии, диффузии и плотностной конвекции)

Коэффициент  
фильтрации, м/сут

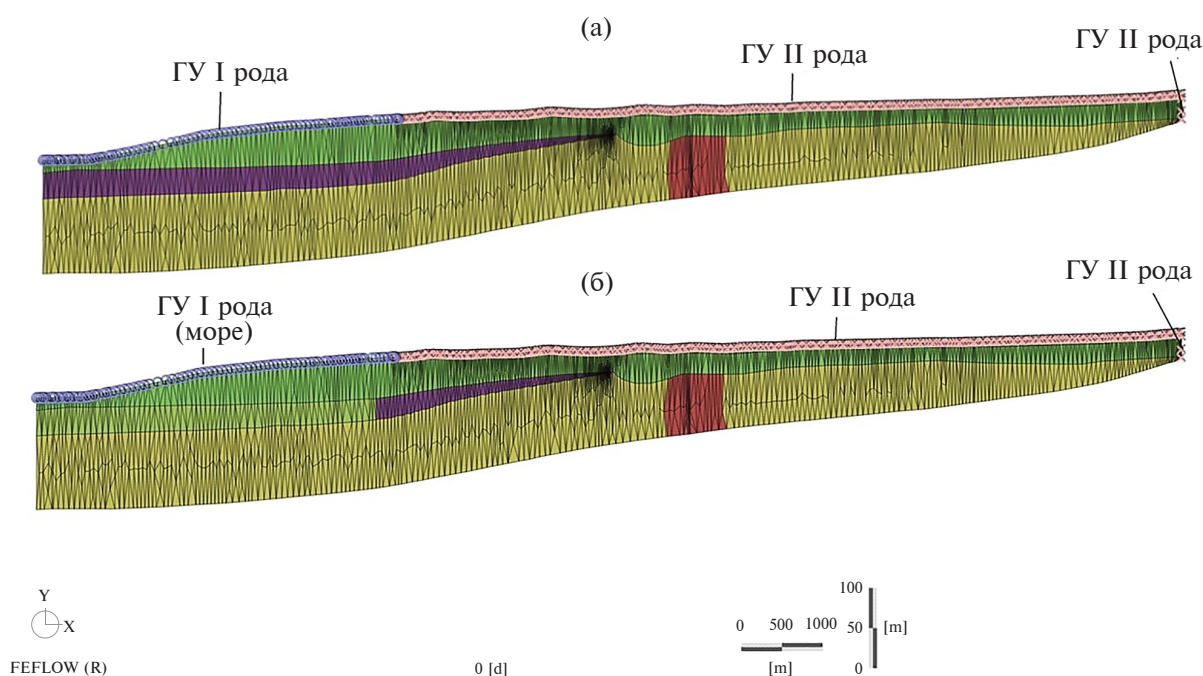
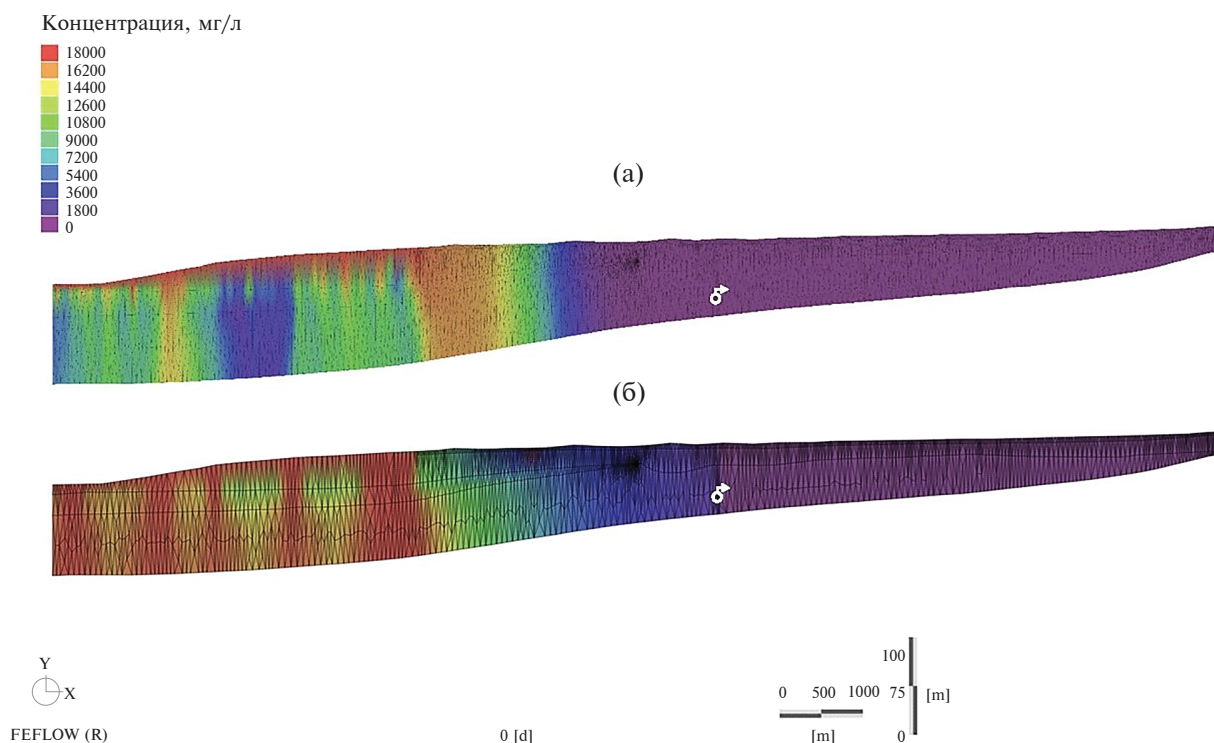


Рис. 4. Фильтрационная схема профильной модели. Плиоценовые отложения под морем представлены: а — глинами; б — песками.



**Рис. 5.** Результаты расчетов на профильной модели (концентрации). Плиоценовые отложения под морем представлены: а — глинами; б — песками.

[2, 6, 7], в отличие от рассмотренных выше численно-аналитических методов. Следовательно, численное моделирование позволяет точно оценить распространение интрузии морских вод.

Для расчета интрузии морских вод использовался компьютерный код SEAWAT [7], реализующий связанные уравнения фильтрации и миграции методом конечных разностей.

В процессе эксплуатации исследуемого водозабора отмечалось 6 периодов (см. табл. 1), в которых эксплуатация водозабора велась с различной интенсивностью, что было учтено при расчете модели.

При разработке модели расчетная область была разбита на блоки различного размера. Основной шаг дискретизации составляет  $500 \times 500$  м. По мере приближения к рекам шаг дискретизации уменьшается до  $15 \times 15$  м. Расчетная область была разделена на 69549 расчетных блоков, плановая дискретизация одинаковая для всех модельных слоев. Общий вид расчетной сетки приведен на рис. 6.

Внешние граничные условия (ГУ) были заданы в соответствии с геофильтрационной схематизацией: северная граница задана ГУ II рода с нулевым расходом. В качестве границы модели на востоке и юге была выбрана граница распространения серравальско-мессинского водоносного горизонта (ГУ II рода с нулевым расходом, в процессе калибровки величина потока будет уточняться). Западная граница — Черное море, которая задается ГУ

I рода в верхнем модельном слое в виде полосы шириной 2.5–4.5 км, где, согласно проводимым ранее исследованиям, принято, что морские донные отложения представлены песками. Связь моря с серравальско-мессинским водоносным горизонтом помимо четвертичных отложений происходит через плиоценовые отложения, что заложено в модель.

Внутренними границами модели являются реки (см. рис. 6), которые на модели задавались ГУ III рода (при значениях проводимости донных отложений равным единице).

С учетом плотности морской воды  $\rho_s = 1012$  кг/м<sup>3</sup>, пресной  $\rho_0 = 1000$  кг/м<sup>3</sup>, приведенный напор воды в граничных ячейках с отметками дна моря  $z$  задавался как

$$h = - \frac{(\rho_s - \rho_0)}{\rho_0} z, \quad (1)$$

где  $\rho_s$ ,  $\rho_0$  — плотность морской и пресной воды, соответственно, кг/м<sup>3</sup>;  $z$  — отметка дна моря, м.

Поскольку исследуемый водозабор оборудован для эксплуатации серравальско-мессинского водоносного горизонта, приуроченного к породам неогенового возраста, на модели были выделены модельные слои, соответствующие следующим горизонтам и комплексам:

— четвертичный водоносный комплекс, представленный переслаиванием супесей, суглинков и песков;

— занкл-пьяченцкий относительно водоупорный горизонт, выполненный преимущественно слабопроницаемыми породами плиоценовых отложений: глинами, суглинками, песками с прослоями гравийно-галечниковых отложений;

— серравальско-мессинский водоносный горизонт, представленный пористыми, трещиноватыми и закарстованными известняками с прослоями глин, песков и мергелей.

Серравальско-мессинский водоносный горизонт подстилается глинами серравальского относительно водоупорного горизонта, кровля которого была принята в качестве водоупора.

Особенностью строения водоносных горизонтов, представленных известняками, является чередование слабопроницаемых и высокопроницаемых зон. На модели это отразилось в разделении серравальско-мессинского водоносного горизонта на 3 модельных слоя:

- верхняя слабопроницаемая часть водоносного горизонта;
- средняя высокопроницаемая зона, полученная по данным резистивиметрии (мощность 4 м);
- нижняя предположительно высокопроницаемая зона (будет уточняться в процессе калибровки).

Таким образом, геофильтрационная модель исследуемого водозабора была разбита на 5 модельных слоев (табл. 2).

На имеющейся расчетной области море было задано в качестве зоны с постоянной минерализацией, в данном случае указана минерализация Черного моря, полученная по результатам химического опробования, проведенного летом 2021 г., — 18.4 г/л, которая была задана на модели в ячейках, расположенных под морем. Величина продольной дисперсивности составила 20 м, поперечной — 2 м.

Для моделирования потока переменной плотности в программе SEAWAT необходимо задать коэффициент  $DRHODC = \frac{\partial \rho}{\partial C}$ , который представляет отношение разности плотностей соленых и пресных вод к разности их концентраций и позволяет связать плотность и минерализацию:

$$\rho = \rho_0 + \frac{\partial \rho}{\partial C} C \quad (2)$$

В данной модели коэффициент DRHODC составил 0.691.

В процессе калибровки уточнялось распределение фильтрационных свойств гидрогеологических подразделений, соответствующих модельным

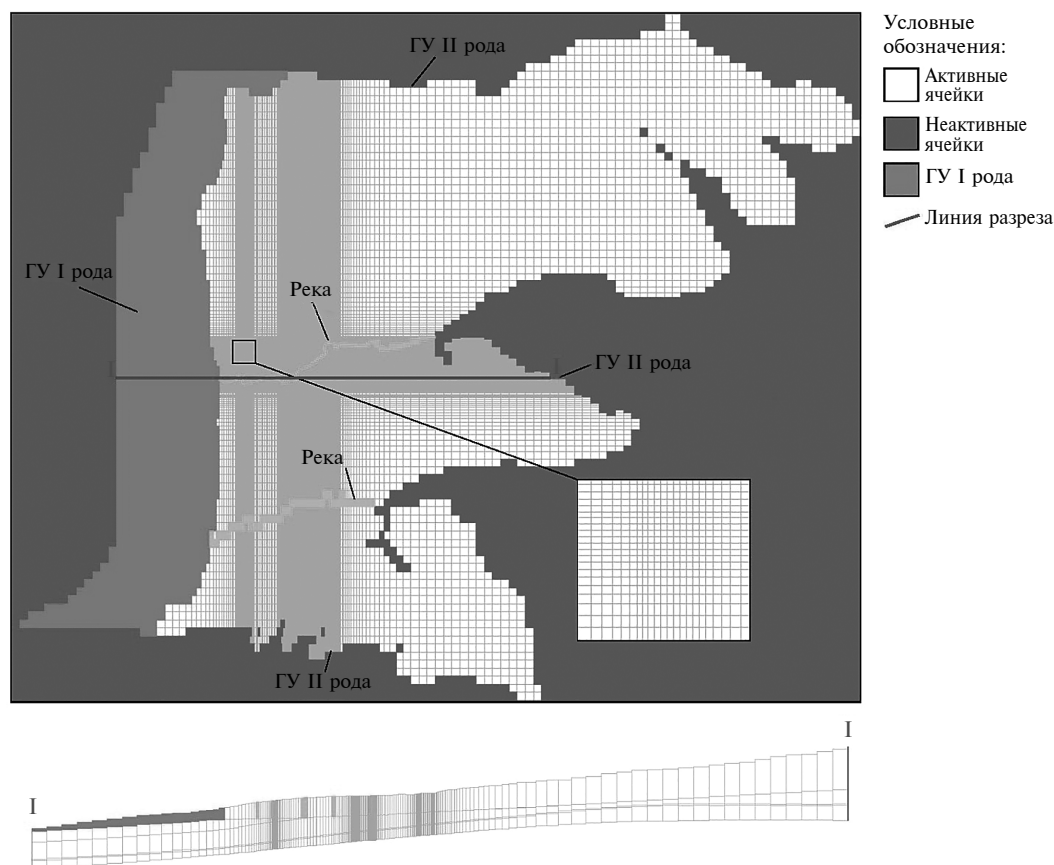


Рис. 6. Плановая дискретизация и граничные условия численной геофильтрационной модели и разрез по линии I—I по расчетной сетке.

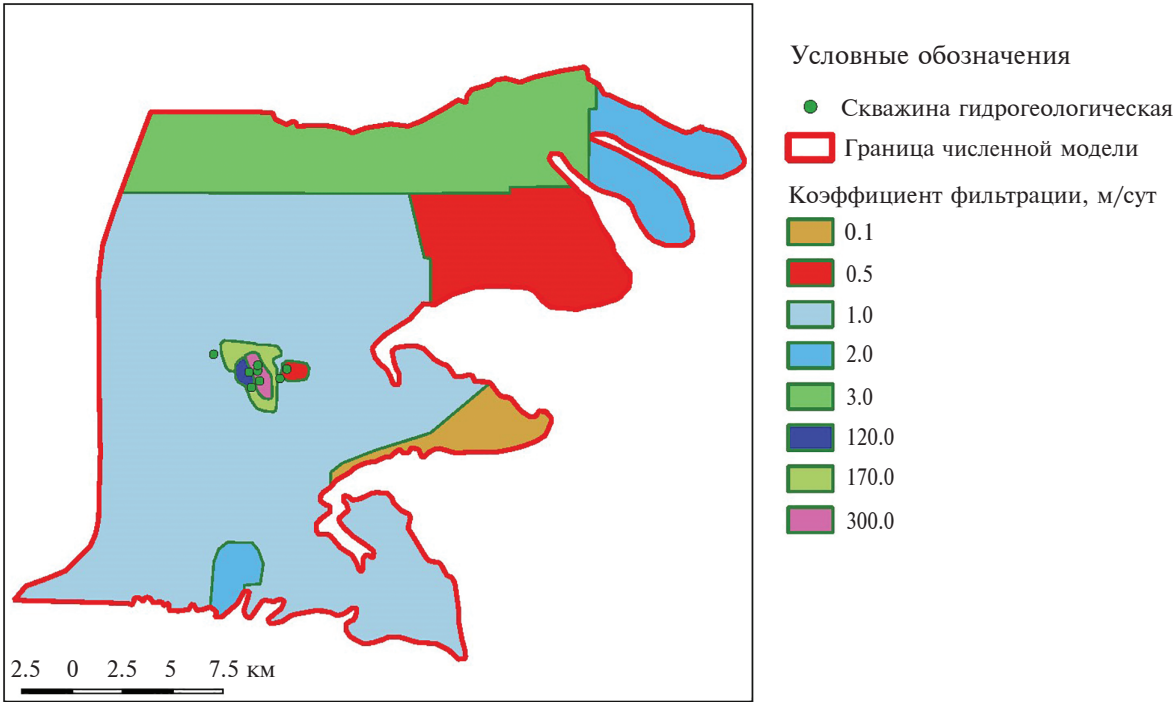


Рис. 7. Распределение коэффициентов фильтрации в четвертом и пятом модельных слоях.

слоям. Также было уточнено, что нижняя часть серравальско-мессинского водоносного горизонта (пятый от поверхности расчетный слой) характеризуется такими же высокими фильтрационными свойствами (рис. 7), как и его средняя часть (четвертый расчетный слой). Помимо фильтрационных свойств было получено, что величина потока подземных вод на восточной и южной границах модели равна нулю.

Полученные решения показывают разную интенсивность развития интрузии морских вод на разных этапах эксплуатации. Наибольшее продвижение интрузии морских вод к скважинам водозабора отмечается на втором и третьем этапах, до того как было принято решение о резком сокращении величины водоотбора с целью уменьшения влияния интрузии и уменьшения минерализации в скважинах (рис. 8).

Модельная интрузия морских вод во 2-м и 3-м периодах эксплуатации достигает скважин водозабора

(см. рис. 8а). Следствием предшествующей интенсивной эксплуатации водозабора в течение 28 лет стало сокращение его производительности в 4-й и 5-й периоды (до 1 тыс. м<sup>3</sup>/сут), что привело к сокращению интрузии морских вод. И на 6-м периоде эксплуатации водоотбор постепенно увеличивался, поэтому средняя величина водоотбора была задана 16 тыс. м<sup>3</sup>/сут. Согласно расчетам, отмечается сокращение интрузии морских вод, однако сохраняется риск засоления скв. 5574 (см. рис. 8б).

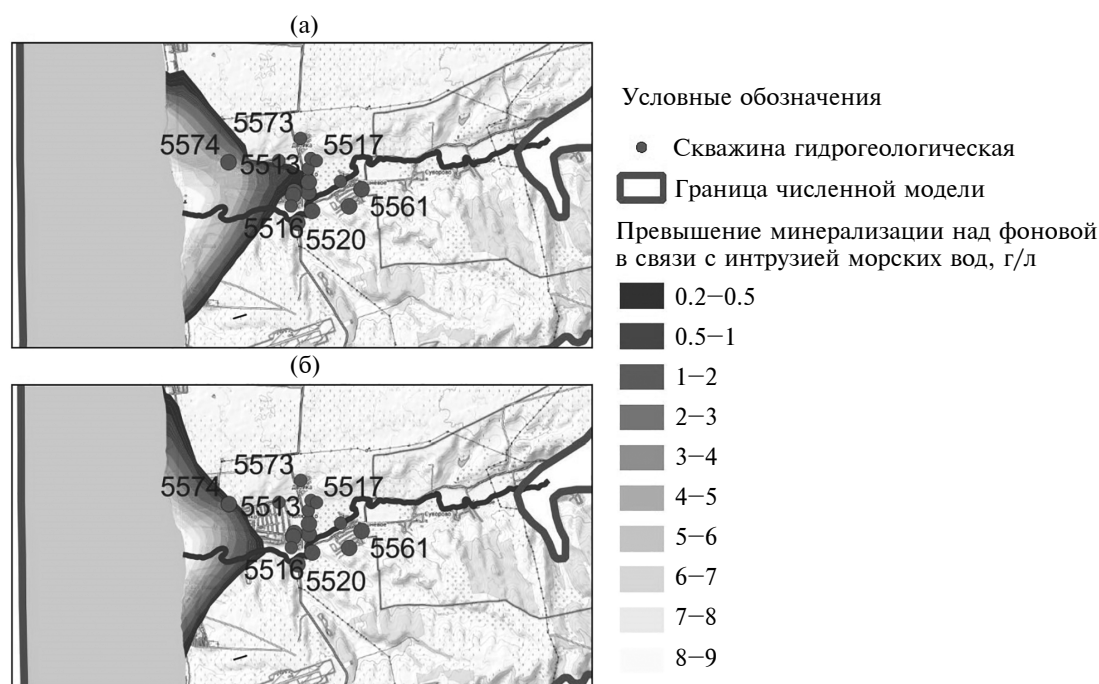
Результаты моделирования и их обсуждение

Причиной интрузии морских вод в районе исследуемого водозабора стала чрезмерно интенсивная эксплуатация водозабора, что привело к перехвату потока подземных вод и продвижению морских вод к скважинам.

Интрузия морских вод была оценена численно-аналитическим методом с использованием кода GFLOW, показавшая завышенные результаты

Таблица 2. Модельные геофильтрационные параметры

| Номер слоя | Название горизонта                                                          | Коэффициент фильтрации, м/сут |
|------------|-----------------------------------------------------------------------------|-------------------------------|
| 1          | Четвертичный водоносный комплекс (Q)                                        | 0.001–3.5                     |
| 2          | Занкл-пьяченцкий относительно водоупорный горизонт (N <sub>2</sub> zan-pia) | 0.0001–3.5                    |
| 3          | Серравальско-мессинский в.г. (N <sub>1</sub> srv-mes)                       | 0.1–3.0                       |
| 4          | Серравальско-мессинский в.г. (N <sub>1</sub> srv-mes)                       | 0.1–300                       |
| 5          | Серравальско-мессинский в.г. (N <sub>1</sub> srv-mes)                       | 0.1–300                       |



**Рис. 8.** Плановое распределение превышения минерализации над фоновой в связи с интрузией морских вод на конец третьего (а) и шестого (б) периода эксплуатации водозабора.

продвижения морских вод к водозаборным скважинам. Подобное завышение может быть связано с тем, что в методе используется предпосылка о резкой границе пресных и соленых вод и не учитывается влияние дисперсии. Также расчеты МАЭ дают предельную стационарную оценку развития интрузии.

Для наиболее точного расчета интрузии морских вод было проведено численное трехмерное моделирование, учитывающее влияние дисперсии, диффузии и плотностной конвекции. Также была учтена различная интенсивность эксплуатации водозабора в разные годы, что позволило показать изменение продвижения интрузии морских вод к водозаборным скважинам.

С помощью расчета профильных численных моделей в программе FEFLOW была доказана прямая связь саравальско-мессинского водоносного горизонта с морем, что увеличило интенсивность интрузии морских вод к скважинам водозабора. Данная связь также была учтена при создании трехмерной численной модели.

Моделирование показало, что наибольшее влияние интрузии морских вод отмечалось во 2-м и 3-м периодах эксплуатации водозабора. Решение о значительном уменьшении величины водоотбора привело к уменьшению интрузии морских вод, однако согласно численному моделированию, скв. 5574 все еще находится в зоне распространения интрузии морских вод.

На данный момент, согласно численной модели, превышение минерализации над фоновой в связи с интрузией морских вод составляет порядка

0.3–0.5 г/л. При фоновом значении минерализации 0.6 г/л минерализация в скважине будет составлять 0.9–1.1 г/л (что подтверждается результатами химического опробования, проведенного в июле 2021 г., — минерализация воды в скважине составила 0.95 г/л, концентрация хлоридов превысила ПДК и составила 396 мг/л). Минерализация в данной скважине значительно зависит от величины водоотбора, поскольку в случаях, когда морские воды уже находятся у водозаборных скважин, увеличение водоотбора приводит к быстрому росту минерализации. Скважины 5521 и 5518 также относятся к скважинам, которые могут оказаться в зоне соленых вод, поскольку интрузия морских вод расположена неподалеку от них, а интенсивный водоотбор приведет к росту минерализации добываемых вод.

Продвижение морских вод к водозаборным скважинам было подтверждено рассчитанными значениями хлор-бромного коэффициента, являющегося маркером для выявления морских интрузий, близкие к значению хлор-бромного коэффициента Черного моря в скв. 5516, 5520, 5561, 5574. Значение хлор-бромного коэффициента воды из скв. 5574 было наиболее близким к показателю для морских вод, что объясняется результатами моделирования.

*Работа была выполнена в рамках Государственного задания ИВП РАН (тема 0126-2021-0001, государственная регистрация 121040700170-9).*

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Де Уист, Р.Д.* Гидрогеология с основами гидрологии суши. М.: Изд-во Мир, 1965. 312 с.
2. *Капырин И.В.* Расчетные коды для гидрогеологического моделирования в задачах оценки безопасности ОИАЭ // Радиоактивные отходы. 2022. № 2(19). С. 105–115.
3. *Ксензенко В.И., Стасиневич Д.С.* Химия и технология брома, йода и их соединений. М.: Химия, 1995. 432 с.
4. *Румынин В.Г.* Теория и методы изучения загрязнения подземных вод: учеб. для вузов. СПб.: Наука, 2020. 559 с.
5. *Шнюков Е.Ф., Мельник В.И.* Геология шельфа УССР. Литология. Киев: Наук. Думка, 1985. 190 с.
6. *Diersch, H.-J.G.* FEFLOW Software — Finite Element Subsurface Flow and Transport Simulation System — Reference Manual. WASY GmbH, Berlin, 2005. 292 p.
7. *Guo Weixing, Langevin C.D.* User's guide to SEAWAT: A computer program for simulation of three-dimensional variable-density ground-water flow. U. S. Geological Survey Techniques of Water-Resources Investigations, book 6, chap. A7, 2002. 77 p.
8. *Haitjema H.M.* Analytic Element Modeling of Ground-water Flow. Academic Press, Inc. 1995. 395 p.

## MODELING SEAWATER INTRUSION UPON WATER WITHDRAWAL FROM COASTAL AQUIFERS

E. V. Drobyazko<sup>a, #</sup>, A. V. Rastorguev<sup>a</sup>

<sup>a</sup>*Lomonosov Moscow State University, Leninskie gory 1, Moscow, 119991 Russia*

<sup>#</sup>*E-mail: levic.kate@gmail.com*

Seawater intrusions into coastal aquifers have been the object of study by hydrogeologists since long ago. A wide range of methods are used to predict the development of intrusions: analytical, numerical analytical and numerical. The purpose of this paper is to identify and evaluate seawater intrusion using a coastal groundwater intake as an example. The paper considers a coastal groundwater intake, where mineralization, total hardness and chlorides have increased due to intensive exploitation. Seawater intrusion is assumed to be the main reason for the groundwater quality deterioration. To prove the seawater intrusion motion, chemical sampling of water from the intake wells was carried out, which resulted in chlorine-bromine coefficient values indicating the presence of seawater admixture in fresh groundwater. The seawater intrusion was evaluated using numerical-analytical and numerical modelling. The estimation obtained by the analytical element method (GFLOW code) indicates the presence of seawater intrusion at the studied water intake. However, the analytical element method calculations provide the ultimate steady-state estimate of the intrusion development. Also, the method uses the assumption of a sharp freshwater-saltwater boundary. Numerical modelling provides a more realistic assessment. In building the three-dimensional numerical model, special attention was paid to the nature of the connection between the exploited aquifer and the sea. In the onshore part, the Quaternary aquifer is separated from the exploited aquifer by a clay layer with interbedded gravel and sand, but there is no data on the composition of sediments beneath the sea. To clarify their composition, profile numerical models were built in the FEFLOW program with different degrees of connection between the sea and the exploited aquifer. One of the models suggests a direct connection between the sea and groundwater through sand, while the other one is complicated by clay. According to the results of the profile models, the direct connection between the exploited aquifer and the sea was proved, which was taken into account in the construction of the three-dimensional numerical model. On the numerical model in the SEAWAT program, the change in the seawater intrusion position in different periods of water intake operation with different water withdrawal values was obtained, after which the calculation results according to numerical-analytical and numerical models were compared.

**Keywords:** *water intake, sea water, intrusion, mineralization, numerical and numerical-analytical modelling*

## REFERENCES

1. Dewhurst, R.D. [Hydrogeology with the basics of terrestrial hydrology]. Moscow, Mir Publ., 1965. (in Russian)
2. Капырин, И.В. [Calculation codes for hydrogeological modeling in the tasks of NPF safety assessment]. *Radioactive waste*, 2022, no. 2(19), pp. 105–115. (in Russian)
3. Ksenzenko, V.I., Stasinevich, D.S. [Chemistry and technology of bromine, iodine and their compounds]. Moscow, Khimiya Publ., 1960, 432 p. (in Russian)
4. Rumynin, V.G. [Theory and methods of studying groundwater pollution: textbook for universities]. St. Petersburg, Nauka Publ., 2020, 559 p. (in Russian)
5. Shnyukov, E.F. Mel'nik, V. I. [Geology of the shelf in the Ukrainian SSR. Lithology]. Kiev, Nauk. Dumka Publ., 1985. (in Russian)
6. Diersch, H.-J.G. FEFLOW software — finite element subsurface flow and transport simulation system — reference manual. WASY GmbH, Berlin, 2005.
7. Guo Weixing, Langevin, C.D. User's guide to SEAWAT: A computer program for simulation of three-dimensional variable-density ground-water flow: U. S. Geological Survey techniques of water-resources investigations, book 6, chapter A7, 2002, 77 p.
8. Haitjema, H.M. Analytic element modeling of ground-water flow. Academic Press, Inc. 1995. 395 p.