

*На правах рукописи*

**СЕМЕНЧУК Александр Владимирович**



**УСЛОВИЯ ФОРМИРОВАНИЯ ПОДЗЕМНЫХ ВОД  
БАЛТИЙСКОЙ КОСЫ  
(КАЛИНИНГРАДСКАЯ ОБЛАСТЬ)**

**Специальность 25.00.07 – Гидрогеология**

**АВТОРЕФЕРАТ**  
**диссертации на соискание ученой степени**  
**кандидата геолого-минералогических наук**

**САНКТ-ПЕТЕРБУРГ – 2018**

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном учреждении «Всероссийский научно-исследовательский геологический институт им. А.П. Карпинского»

*Научный руководитель:*

кандидат геолого-минералогических наук

*Петров Владимир Викторович*

*Официальные оппоненты:*

*Абрамов Владимир Юрьевич*, доктор геолого-минералогических наук, закрытое акционерное общество «Гидрогеологическая и геоэкологическая компания «ГИДЭК», главный специалист

*Переверзева Светлана Анатольевна*, кандидат геолого-минералогических наук, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение «Санкт-Петербургский государственный университет» Институт наук о Земле, кафедра гидрогеологии, доцент

*Ведущая организация* – федеральное государственное бюджетное учреждение «Гидроспецгеология»

Защита диссертации состоится 10 октября 2018 г. в 16 часов на заседании диссертационного совета Д 212.224.01 при Санкт-Петербургском горном университете по адресу: 199106, г. Санкт-Петербург, 21-я линия, д.2, аудитория 1171а.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Санкт - Петербургского горного университета и на сайте [www.spmi.ru](http://www.spmi.ru).

Автореферат разослан 17 июля 2018 г.

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ  
диссертационного совета



Кирьякова  
Ирина Геннадьевна

### **Общая характеристика работы**

**Актуальность исследований.** В настоящее время в ряде прибрежных районов Калининградской области актуальной является проблема водоснабжения населения питьевой водой соответствующего качества. Наиболее остро эта проблема стоит в г. Балтийске, расположенном на Балтийской косе. Водоснабжается город исключительно за счет подземных источников. На протяжении длительного времени здесь фиксируется разрастание зоны некондиционных вод, послужившее причиной дефицита пресной воды питьевого качества, составившего 4 тыс. м<sup>3</sup>/сут при численности населения города 33,1 тыс. человек в 2014 г.

За 60-летний период исследования загрязнения подземных вод Балтийской косы выдвигались различные предположения, такие как: техногенный генезис (В.П. Бокин, 1956), естественная зональность (В.П. Бокин, 1956, Н.И. Чудинов, 1966, Ю.В. Казанов, 1967) и интрузия морских вод (В.И. Иодказис, 1977, Л.Ф. Труфанова, 1984, В.Ю. Тиунов, В.В. Антонов, 1991, И.В. Карпов, 2005). Однако, однозначных результатов, направленных на решение проблемы, получено не было. В частности, до конца не изучены источники формирования подземных вод Балтийской косы. Не производился анализ геофильтрационных и геомиграционных процессов в условиях перетекания, смещения естественной гидрохимической зональности и связи пресных подземных и соленых морских вод. За всю историю проблемы водоснабжения не оценены прогнозные сценарии развития загрязнения и его реабилитации. О серьезности проблемы говорит и тот факт, что за длительный период эксплуатации здесь так и не были утверждены запасы подземных вод, притом, что суточный водоотбор в разные годы превышал 15 тыс. м<sup>3</sup>/сут, а в планах было его увеличение до 47 тыс. м<sup>3</sup>/сут (Л.Ф. Труфанова, 1984). В связи с чем, изучение закономерностей формирования подземных вод Балтийской косы и оценка перспектив использования подземных вод для водоснабжения населения представляются весьма важными и актуальными.

**Целью работы** является изучение условий и закономерностей формирования подземных вод для обоснования их рационального использования и охраны от загрязнения при эксплуатации прибрежных водозаборов Балтийской косы.

***Основные задачи исследований:***

- Анализ гидрохимического режима подземных вод Балтийской косы и поверхностных вод Балтийского моря.
- Разработка и верификация математической модели сложного природного объекта.
- Изучение закономерностей движения некондиционных солоноватых вод в водоносных горизонтах Балтийской косы с использованием математического моделирования.
- Нахождение оптимального сценария эксплуатации водоносных горизонтов Балтийской косы в условиях взаимодействия солоноватых и пресных подземных вод.

***Фактический материал, методы исследований, личный вклад автора.*** Диссертационная работа является результатом научно-исследовательской и производственной деятельности автора в области изучения гидрогеологических условий Калининградского полуострова. Автор проанализировал большой объем материалов ранее выполненных здесь геологических и гидрогеологических исследований, а также выполнял полевые (опытно-фильтрационные работы и режимные наблюдения, эколого-гидрогеологическое обследование, отбор проб подземных и поверхностных вод) и камеральные (интерпретация результатов опытно-фильтрационных работ, разработка геофильтрационной и геомиграционной моделей, построение картографического материала и написание итогового отчета) работы, направленные на оценку эксплуатационных запасов Новобалтийского месторождения пресных подземных вод, проводимых АО «Северо-Западное ПГО» с 2014 по 2017 годы.

В процессе работы над диссертацией анализировались материалы, полученные следующими методами: 1. Сбором и обобщением опубликованной и фондовой литературы по геолого-гидрогеологическим условиям формирования подземных вод Калининградского полуострова; 2. Бурением разведочных скважин и анализом кернового материала; 3. Гидрохимическим опробованием поверхностных и подземных вод и анализом результатов лабораторных исследований проб воды; 4. Выполнением комплекса опытно-фильтрационных работ; 5. Режимными наблюдениями за уровнями и химическим составом подземных и поверхностных вод; 6. Математическим моделированием с использованием программного комплекса Processing Modflow 8.0; 7. Построением трехмерных

моделей, карт, схем и графиков с использованием программ ArcGIS 10.0, Seer3D 2 и Surfer 13.

**Научная новизна.** 1. Установлены закономерности распространения и формирования подземных вод Балтийской косы, а также их гидрохимических особенностей; 2. Определены причины ухудшения качественного состава подземных вод; 3. Построены и апробированы геофильтрационная и геомиграционная математические модели Балтийской косы и прилегающей акватории Балтийского моря; 4. При помощи математических моделей изучены закономерности движения некондиционных солоноватых вод в водоносных горизонтах Балтийской косы, а полученные результаты сопоставлены с их фактическим гидродинамическим и гидрохимическим режимом; 5. Предложена методика рациональной организации централизованного водоснабжения прибрежных населенных пунктов в условиях взаимодействия морских и пресных подземных вод.

**Защищаемые положения:**

1. Основной причиной ухудшения качества пресных подземных вод прибрежных водоносных горизонтов Балтийской косы является внедрение (интрузия) морских солоноватых вод Балтийского моря, развивающееся под действием интенсивного водоотбора. Роль других факторов, таких как естественная гидрохимическая зональность и техногенное загрязнение, незначительна.

2. Надежность прогнозных решений повышается при использовании единой схематизации гидрогеологических условий на всех этапах разработки математической модели: как на этапе обработки полевых материалов, в том числе интерпретации результатов опытно-фильтрационных работ методом математического моделирования, так и на этапе прогнозного моделирования.

3. В условиях, когда водопотребность населения превышает величину естественных ресурсов территории, разработанная математическая модель Балтийской косы позволяет определить оптимальный сценарий водоотбора из эксплуатационных скважин, при котором достигается минимизация влияния интрузии морских вод на качество подземных вод целевых водоносных горизонтов.

**Практическая значимость.** Результаты проведенного исследования являются опорной точкой решения проблемы устойчивого обеспечения качественными подземными водами, прежде всего г. Балтийска, а также могут использоваться при организации

водоснабжения других социально-значимых объектов, находящихся в аналогичных геолого-гидрохимических условиях не только в Калининградской области, но и в других регионах России: Краснодарский, Приморский и Хабаровский край, Ленинградская и Сахалинская области.

**Структура и объем работы.** Диссертационная работа состоит из введения, 5 глав и заключения; изложена на 152 страницах, содержит 47 рисунков и 33 таблицы; список использованной литературы включает 129 наименований. Доказательная база защищаемого положения № 1 раскрыта во второй и третьей главах, положения № 2 – в четвертой главе, положения № 3 – в пятой главе.

В **первой главе** описано состояние изученности проблемы и методика исследования; во **второй главе** рассмотрены структурно-тектоническое строение и геолого-гидрогеологические условия исследуемой территории; в **третьей главе** приводится характеристика качественного состава подземных и поверхностных вод и делается анализ гидрохимических условий района; в **четвертой главе** описана методика обоснования параметрической базы математической модели Балтийской косы; **пятая глава** содержит сравнительную характеристику результатов прогнозов изменения качественного состава подземных вод.

**Апробация работы.** Результаты диссертации освещены в 5 публикациях, в том числе в 2 статьях, опубликованных в журналах, рекомендованных ВАК Минобрнауки России. Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях: «II Международная научно-практическая конференция «Современное состояние, тенденции и перспективы развития гидрогеологии и инженерной геологии» (Горный университет, 2017), «V Международная конференция молодых ученых и специалистов памяти академика А.П. Карпинского «Взаимодействие учреждений Роснедр, Минобрнауки России и РАН при региональном геологическом изучении территории Российской Федерации и ее континентального шельфа» (ВСЕГЕИ, 2017), «XV Всероссийская научная конференция «Вузовская наука – региону 2016» (Вологодский университет, 2017).

**Благодарности.** За научное сопровождение и методическую помощь на всем протяжении выполнения работы автор выражает глубокую признательность научному руководителю заведующему сектором гидрогеологии и гидрогеохимии ВСЕГЕИ, к.г.-

м.н. *В.В. Петрову*. За ценные советы, консультации и конструктивные замечания автор благодарен к.г.-м.н. *И.Л. Хархордину* (ООО «Геостройпроект»), к.г.-м.н. *П.К. Коносовскому* и *Р.А. Филину* (СПбГУ). За холодную критику и ценные дискуссии по улучшению работы, автор выражает благодарность *А.А. Потанову* (СПбГУ) и *Г.И. Смеловой* (Санкт-Петербургский филиал ФБУ «ГКЗ»). За вдохновение и моральную поддержку автор благодарит *А.А. Семенчук*.

#### **Защищаемые положения и их обоснование**

**1. Основной причиной ухудшения качества пресных подземных вод прибрежных водоносных горизонтов Балтийской косы является внедрение (интрузия) морских солоноватых вод Балтийского моря, развивающееся под действием интенсивного водоотбора. Роль других факторов, таких как естественная гидрохимическая зональность и техногенное загрязнение, незначительна.**

Площадь исследования охватывает северную часть Балтийской косы и протягивается примерно на 22 км от г. Приморска через г. Балтийск (рис. 1). Город Балтийск полностью расположен в пределах площади исследования и является административным центром и самым западным городом России, расположен в 40 километрах западнее Калининграда.

Основным источником хозяйственно-питьевого водоснабжения рассматриваемого района являются подземные воды Прибалтийского артезианского бассейна (ПАБ). Верхний гидрогеологический этаж ПАБ, выделяемый по литолого-гидродинамическим признакам, приурочен к зоне активного водообмена и связан с четвертичными, палеогеновыми и меловыми отложениями. Подземные воды этажа до глубины 100-150 м пресные, с глубиной переходящие в солоноватые с минерализацией до 20 г/дм<sup>3</sup>. Краткая характеристика основных гидрогеологических подразделений района исследования приведена в таблице 1.

Сложность геолого-гидрохимических условий исследуемой территории заключается в том, что Балтийскую косу пререзает погребенная долина, выполненная отложениями окско-вологодского горизонта. До развития водоснабжения города основным источником водоснабжения служил среднепалеогеновый алкский водоносный горизонт, который каптировался скважинами, размещенными по обе стороны палеодолины. К настоящему моменту подземные воды на территории, примыкающей к южному борту долины, имеют

преобладающую минерализацию 0,7-2,5 г/дм<sup>3</sup>. Со стороны северного борта долины воды палеогена сохранили свое первоначальное качество, что связано с поступлением вод со стороны материковой части (рис. 2). Вода горизонта на всей территории с севера от долины пресная с минерализацией 0,42-0,66 г/дм<sup>3</sup>. По всем компонентам отвечает требуемым нормативам, кроме мутности (до 6,3 ПДК), марганца (до 1,07 ПДК) и железа (до 17 ПДК).

Многолетняя неконтролируемая эксплуатация подземных вод привела к ухудшению гидрохимической обстановки в центральной части палеодолины. Данные режимных наблюдений на участке, где был сосредоточен самый высокий и бесконтрольный уровень водоотбора, свидетельствуют об увеличении минерализации подземных вод в различные годы до 1,3 и 2,8 г/дм<sup>3</sup> от первоначальной – 0,15 г/дм<sup>3</sup>. Разрастание зоны некондиционных вод в центре водозабора и, как следствие, к югу от него, вынудило систематически выводить из эксплуатации скважины с высокими гидрохимическими показателями или ограничивать их водоотбор.

Следует отметить ряд факторов, указывающий на причины ухудшения гидрохимической обстановки. Во-первых, анализ качественных показателей подземных вод района исследования, в том числе вологодско-московского, среднепалеогенового алкского и верхнемелового водоносных горизонтов в целом соответствуют требованиям, предъявляемым к питьевым водам, за исключением, высокого природного содержания железа, марганца и как следствие органолептических показателей (мутность). При этом важно отметить повсеместное отсутствие следов бактериального загрязнения и иных загрязнений (тяжелые металлы, нефтепродукты, пестициды и др.), имеющих техногенное происхождение.

Во-вторых, подземные воды верхнемелового водоносного горизонта на всем протяжении длительного периода эксплуатации с 1945 по 2016 годы не претерпели изменений химического состава воды, даже на участке отсутствия водоупорных средне-нижнепалеогеновых отложений в пределах распространения фронта некондиционных вод в вышележащих четвертичных отложениях погребенной долины. Этот факт исключает возможность нарушения профильной гидрохимической зональности, которая наблюдалась в смежных районах Калининградской области.

В-третьих, увеличение зоны некондиционных вод приходится на период максимального водоотбора, сосредоточенного в центральной части палеодолины и к югу от нее, когда понижения уровня подземных вод здесь достигали максимальных величин, а периферия депрессионной воронки значительно отодвигалась под акваторию Балтийского моря.

В-четвертых, вектор распространения фронта некондиционных вод в плане имеет четкую направленность с юго-запада на северо-восток от предполагаемого источника с областью большей концентрации хлорид-ионов, достигающей 2500-3500 мг/дм<sup>3</sup>, к области смещения фронта некондиционных вод с метеорными водами и водами подземного стока со стороны Самбийской возвышенности. В разрезе можно отметить тот факт, что воды с большей концентрацией хлоридов тяготеют к подошве пласта.

Все перечисленные факторы указывают на характерные особенности процесса интрузии морских вод, начавшегося в конце 70-х годов в результате многолетнего интенсивного водоотбора подземных вод в пределах Балтийской косы.

**2. Надежность прогнозных решений повышается при использовании единой схематизации гидрогеологических условий на всех этапах разработки математической модели: как на этапе обработки полевых материалов, в том числе интерпретации результатов опытно-фильтрационных работ методом математического моделирования, так и на этапе прогнозного моделирования.**

Разнообразие описанных выше гидрогеологических условий и сложный характер формирования гидродинамического режима подземных вод делает весьма затруднительным проведение качественной интерпретации результатов опытно-фильтрационных работ аналитическими методами, предполагающими сведение природных условий к сильно упрощенным расчетным схемам. Полученные таким образом эффективные параметры не всегда корректно применять для математического моделирования, предполагающего использование более гибкой геофильтрационной схематизации.

В тех случаях, когда требуется получить более полный анализ геофильтрационного процесса, следует переходить к обработке откачек с использованием метода математического моделирования

(Ю.А. Норватов, 2015) Особенно это актуально для обоснования параметров в условиях перетекания из смежных водоносных горизонтов и связи пресных подземных вод с солеными водами морских заливов.

В рамках исследования был выполнен анализ всех опытно-фильтрационных работ, проведенных на территории исследования: начиная от рассмотрения места проведения и условий опыта, заканчивая детальным изучением результатов ОФР. В конечном итоге, для модельной интерпретации была выбрана кустовая откачка, проведенная сотрудниками Калининградской ГЭ в 1984 г. в осевой части палеодолины. Опытный куст состоял из 1-ой центральной и 5-ти наблюдательных скважин (рис. 3). Центральная скважина № 11 и наблюдательные скважины №№ 8, 12, 14 и 15 оборудованы на окско-вологодский водоносный горизонт, наблюдательная скважина № 16 оборудована на вологодско-московский водоносный горизонт. Дебит центральной скважины составлял 17,3 л/с при понижении 16,5 м в возмущающей скважине и 0,92-1,29 м – в наблюдательных. Продолжительность откачки 240 часов.

Результаты интерпретации, полученные по аналитическим зависимостям, подробно представлены в работе. Здесь же остановимся непосредственно на реализации опыта при помощи математической модели.

Моделируемая территория вписана в прямоугольную область размером 10600\*11600 м и покрыта неравномерной ортогональной сеткой, сгущающейся на участке проведения ОФР 1984 г. Размеры расчетных ячеек в плане находятся в диапазоне от 1,25 м в районе центральной скважины и до 50 м на периферии. Выбор подобной дискретизации позволяет качественно описать граничные условия, выделить основные зоны неоднородности и изучить структуру фильтрационного потока. Общая площадь модели составила 122,96 км<sup>2</sup>. Контур активной (рабочей) области (внешние границы) на большей части своего протяжения соответствует естественным гидродинамическим границам.

В качестве исходной базы данных для построения цифровой модели геологического пространства (рис. 4) использован каталог скважин, составленный по результатам сбора и анализа имеющихся материалов.

Воспроизведение откачки на численной модели заключалось в вариантном подборе фильтрационных характеристик многослойной толщи до достижения на модели фактических понижений уровня воды в наблюдательных скважинах, полученных в ходе опытно-фильтрационного опробования. При этом для модельных слоев, задавались значения горизонтального ( $k_x$ ) и вертикального ( $k_z$ ) коэффициентов фильтрации, коэффициенты упругоёмкости ( $\eta^*$ ) и гравитационной водоотдачи ( $\mu$ ).

Начальные коэффициенты фильтрации модельных слоев приняты как осредненные значения совокупности результатов ОФР, проведенных в районе г. Балтийска за 1977-2016 гг.

На основании этих данных в ходе моделирования определялось понижение в наблюдательных скважинах и если оно отличалось от действительного, то операция повторялась с другими фильтрационными параметрами. Таким образом, на модели итеративно подбирались основные характеристики водоносных и водоупорных горизонтов.

По результатам калибровки модели путем итерационного подбора параметров были получены расчетные кривые понижений в вологодско-московском и окско-вологодском водоносных горизонтах (рис. 5). При этом важно отметить, что если подобранные на модели значения (от 10,5 до 17,2 м/сут) коэффициента фильтрации опробуемого окско-вологодского водоносного горизонта в целом совпадают с диапазоном фактических определений аналитикой (от 10,75 до 15,18 м/сут), то параметр перетекания занижен примерно в 3 раза (расчетный 1650 м, фактический 561 м). Учитывая тот факт, что чем меньше величина параметра перетекания, тем интенсивнее, при прочих равных условиях, идет перетекание, это может привести к завышению привлекаемых ресурсов в эксплуатируемый пласт из смежного водоносного горизонта, и соответственно, к значительной погрешности при оценке эксплуатационных запасов.

Полученные в ходе модельных решений геофильтрационные параметры характеризуют непосредственно участок проведения опыта и косвенно прилегающую территорию. Для оценки пространственного распределения геофильтрационных параметров по всей площади произведена дополнительная калибровка модели с привлечением фактических данных по межнным уровням подземных вод в водоносных горизонтах изучаемой гидрогеологической системы.

Критериями точности при калибровке служили: степень совпадения модельных и натуральных напоров в плане и наилучшее совпадение модельных значений напоров в точках (блоках) расположения наблюдательных скважин с напорами, фактически полученными (замеренными) по этим скважинам в период летней межени (июль 2016 г.).

Важно отметить, что фильтрационные параметры вологодско-московского, окско-вологодского и среднепалеогенового алкского водоносных горизонтов, полученные на этапе интерпретации результатов ОФР, не претерпели изменений в рамках калибровки модели по уровням подземных вод. Уточнение коснулось только менее обоснованных параметров, таких как величина инфильтрационного питания, коэффициенты фильтрации четвертичного надморенного и верхнемелового водоносных комплексов и средне-нижнепалеогенового водоупорного горизонта.

В качестве исходной величины водоотбора ( $10486,5 \text{ м}^3/\text{сут}$ ) из эксплуатационных скважин приняты осредненные значения фактических дебитов за период проведения поисково-оценочных работ с ноября 2014 по август 2016 г.

После серии численных экспериментов удалось добиться удовлетворительного совпадения напоров во всех контрольных точках (рис. 6) при инфильтрационном питании в области распространения водоносных горизонтов в диапазоне от  $0,000247 \text{ м}/\text{сут}$  до  $0,000357 \text{ м}/\text{сут}$ .

Общая тенденция в изменчивости проницаемости среднепалеогенового алкского и окско-вологодского водоносных горизонтов, установленная по данным ОФР, а также полученная на стадии обоснования параметров, сохранилась. Проницаемость основного водоносного массива изменяется от 2,2 до  $17,2 \text{ м}/\text{сут}$ . Фильтрационные параметры отложений, принятые по результатам численной интерпретации данных ОФР и калибровки модели приведены в таблице 2.

Общие ресурсы модели составляют  $12564,3 \text{ м}^3/\text{сут}$ . Их формирование происходит за счет инфильтрации атмосферных осадков, питания со стороны Самбийской возвышенности и привлекаемых ресурсов из морских заливов.

Для оценки привлекаемых ресурсов со стороны Гданьского и Калининградского заливов был восстановлен естественный режим

путем отключения всех водозаборных скважин в пределах области моделирования. По результатам расчета, доля привлекаемых ресурсов составила 4733,2 м<sup>3</sup>/сут, перехват естественного потока составил 5753,3 м<sup>3</sup>/сут. Небаланс по суммарному расходу составил – 0 %.

По результатам переинтерпретации данных ОФР 1984 г. путем итерационного подбора параметров на математической модели и последующей ее калибровке, можно сделать следующие выводы:

1) использование метода математического моделирования позволило определить параметры не только вологодско-московского, окско-вологодского и среднепалеогенового водоносных горизонтов на участке проведения опытных работ, но и дало представление о пространственном распределении параметров в целом по площади;

2) установлено, что параметр перетекания определенный аналитически, занижен примерно в 3 раза. Это позволяет сделать вывод, что расчетная схема, выбранная для аналитической интерпретации откачки по скважине 11, не отражает реальных гидрогеологических условий, а полученные аналитикой эффективные параметры не корректно использовать для численного моделирования, предполагающего использование более гибкой геофильтрационной схематизации;

3) в результате модельной интерпретации кустовой откачки были получены расчетные кривые понижений в вологодско-московском и окско-вологодском водоносных горизонтах, отражающие хорошее совпадение фактического и расчетного хода изменения уровня в наблюдательных скважинах. Таким образом, фильтрационные параметры, полученные по результатам модельных решений, считаются обоснованными;

4) полученные на этапе обоснования параметрической базы параметры основных водоносных горизонтов не претерпели изменений на этапе калибровки и верификации модели по межженным уровням подземных вод. Жесткая привязка к ним позволила успешно произвести оценку пространственного распределения наименее достоверных параметров по всей моделируемой площади.

Следует подчеркнуть, что для решения дальнейших прогнозных задач будет использоваться та же геофильтрационная схематизация, в рамках которой определены параметры. Подобная верификация математической модели повышает степень надежности не только полученных параметров, но и дальнейших прогнозов.

**3. В условиях, когда водопотребность населения превышает величину естественных ресурсов территории, разработанная математическая модель Балтийской косы позволяет определить оптимальный сценарий водоотбора из эксплуатационных скважин, при котором достигается минимизация влияния интрузии морских вод на качество подземных вод целевых водоносных горизонтов.**

Непосредственная или косвенная взаимосвязь соленых морских вод и пресных подземных вод в прибрежных районах является одним из проявлений процесса взаимодействия поверхностных и подземных вод. В этом процессе наряду с подземным стоком вод суши в море распространено обратное явление, а именно внедрение или интрузия морских вод в прибрежные водоносные горизонты.

В естественных условиях интрузия морских вод происходит из-за разности плотностей пресных и соленых вод (В.М. Гольдберг, 1982). При этом более тяжелые морские воды продвигаются по подошве пласта, а граница раздела между морскими и подземными водами приобретает сложную форму – переходную область, в пределах которой отмечается постепенный переход от минерализации соленых вод морских вод к минерализации пресных подземных. Размеры переходной зоны в плане могут достигать сотен метров и даже километров. Учет переходной зоны от пресных вод к соленым имеет немаловажное значение при прогнозе качества воды на водозаборе. В этой зоне различие минерализации пресных и соленых вод обуславливает различие плотностей этих вод. При движении жидкостей с разными плотностями происходит деформация границы раздела, выражающаяся в формировании «языка» более тяжелой жидкости по подошве пласта. Если первоначальная граница раздела пресных и соленых вод была вертикальной, то в дальнейшем эта граница раздела становится наклонной вследствие того, что более тяжелая жидкость (соленая вода) подпирает более легкую (пресную воду), и в подошве пласта образуется «язык» соленых вод, связанных с интрузией морских вод в водоносные горизонты.

Для прогноза изменения качественного состава подземных вод в процессе эксплуатации использована программа MT3DMS, которая является расширением программы MODFLOW, представляя собой ее миграционное дополнение.

Геомиграционная модель была создана на основе геофильтрационной модели. Таким образом, она охватывает ту же

территорию и имеет геометрию, аналогичную геофильтрационной. Матрицы инфильтрации, проницаемости и мощности горизонтов, а также величина водоотбора остались неизменными. Граничные условия также не претерпели изменений, однако в модель были дополнительно заданы необходимые миграционные параметры: активная пористость ( $n_a$ ) и продольная гидродисперсия ( $D_L$ , м) и др. Учитывая размер области миграции порядка 5 км, параметр гидродисперсии может варьировать в диапазоне от 25 до 50 м. Отношение поперечной гидродисперсии к продольной ( $D_{Ty}/D_L$ ) и вертикальной гидродисперсии к продольной ( $D_{Tz}/D_L$ ) составили 1:10. Коэффициент молекулярной диффузии ( $D_m$ , м<sup>2</sup>/сут) принимается равным нулю. Величины активной пористости для модельных слоев приняты равными гравитационной водоотдаче.

Анализ гидрохимического режима подземных вод Балтийской косы показал, что их минерализация зависит в основном от концентрации хлоридов. Соответственно, при прогнозировании изменения качественного состава особое значение уделяется миграции именно этого компонента. В качестве начального распределения концентраций в заливах и в водоносных горизонтах приняты значения концентрации хлоридов и величины общей минерализации, полученные по результатам аналитических исследований проб поверхностных и подземных вод.

На основании анализа мирового опыта в вопросах реабилитации последствий морской интрузии в прибрежные водоносные горизонты, а также учитывая значительный фактурный материал, дающий хорошее представление о гидродинамических и гидрохимических особенностях рассматриваемой территории, в качестве основного решения существующей проблемы было выбрано достижение оптимальной величины водоотбора и при необходимости, изменение существующей схемы расположения скважин, при котором минимизируется влияние интрузии морских вод. При этом критерием оптимальности послужит обеспечение требований по качеству воды (содержанию хлоридов и величине минерализации).

Выбор данной стратегии основан не только на экономической рентабельности, при которой не потребуются дорогостоящих и не всегда эффективных методов очистки подземных вод от существующего загрязнения, но и на результатах анализа гидродинамического и гидрохимического режима подземных вод, в рамках которого было

установлено, что в ряде случаев снижение эксплуатационного дебита скважин и перераспределение нагрузок на скважины, способствуют снижению концентрации хлоридов в отбираемых подземных водах, а, следовательно, и снижению минерализации.

Перед определением оптимального сценария водоотбора, проиграны несколько дополнительных вариантов прогноза, анализ результатов которых помог получить общее представление о возможных вариантах продвижения и отступления «языка» интрузии морских вод при различных нагрузках на скважины:

- 1) сохранение существующей схемы и объемов водоотбора;
- 2) сохранение существующей схемы и объемов водоотбора с учетом работы участка «Восточная Грива» (Новобалтийское МППВ);
- 3) увеличение водоотбора на 25% с сохранением существующей схемы;
- 4) уменьшение водоотбора на 25% с сохранением существующей схемы;
- 5) увеличение водоотбора на 50% с сохранением существующей схемы;
- 6) уменьшение водоотбора на 50% с сохранением существующей схемы;

Подобная стратегия предоставила возможность получения не только значений концентрации хлоридов и минерализации в каждой точке рассматриваемого пространства, но и позволила произвести дополнительную проверку соответствия численной модели реальной гидрогеологической системе.

На основании полученных результатов при прогоне дополнительных сценариев было выделено несколько закономерностей, которые в конечном итоге позволили найти оптимальный сценарий водоотбора. Было установлено, что действительного уменьшения концентрации хлоридов подземных вод, извлекаемых определенными скважинами, можно достичь лишь индивидуальным изменением дебита каждой из них. Также было доказано, что ввиду устоявшегося загрязнения в центральной части палеодолины за период более полувековой бесконтрольной эксплуатации, полностью исключить превышения ПДК хлоридов и величины минерализации в подземных водах извлекаемых скважиной № 185 не представляется возможным. Воды, добываемые этой скважиной, перед подачей в сеть следует разбавлять согласно существующему регламенту водоочистки.

В конечном итоге минимизацию влияния морской интрузии на качество подземных вод водоносных удалось достичь при максимальной величине суммарного водоотбора 11670,0 м<sup>3</sup>/сут из всех водоносных горизонтов. При этом водоотбор из скважин, расположенных на южной окраине территории, не должен превышать 400,0 м<sup>3</sup>/сут, а количество извлекаемых запасов из окско-вологодского водоносного горизонта не должно быть менее 3900,0 м<sup>3</sup>/сут. Прогнозируемое распределение концентраций хлоридов в окско-вологодском и среднепалеогеновом алкском водоносных горизонтах на конец 25-летнего периода эксплуатации представлено на рисунке 7.

### **Заключение**

Основные результаты выполненного исследования заключаются в следующем:

1. На основании систематизации, анализа и обобщения полевых, фондовых и опубликованных материалов получено полное представление о природной гидрогеологической модели Балтийской косы и создан ее математический аналог.

2. Изучение закономерностей формирования подземных вод Балтийской косы позволило установить, что эксплуатационные запасы пресных вод питьевого назначения ограничены. В условиях нарушенного режима наблюдается сложная корреляционная зависимость между показателями водоотбора в каждой конкретной скважине, величиной содержания в ней химических некондиционных показателей (хлоридов и минерализации) и уровнями подземных вод во временном разрезе.

3. Доказано, что основной причиной ухудшения качества пресных подземных вод водоносных горизонтов Балтийской косы является внедрение (интрузия) морских солоноватых вод Балтийского моря, начавшаяся из-за неконтролируемого водоотбора в центральной части палеодолины и к югу от нее. Роль других факторов, таких как естественная гидрохимическая зональность и техногенное загрязнение, незначительна.

4. Результаты модельных решений, направленные на обоснование параметрической базы модели и воспроизведения существующей гидродинамической обстановки, свидетельствуют о функциональном соответствии модели и достоверности ее расчетных гидрогеологических параметров. В результате решения обратных задач

охарактеризованы балансовые составляющие системы гидравлически связанных водоносных горизонтов и комплексов, условия их питания и разгрузки.

5. На основании сравнения результатов интерпретации ОФР аналитическими и численными методами установлено, что использование метода математического моделирования для обоснования параметрической базы численной модели сложного природного объекта позволяет повысить достоверность получаемых геофильтрационных параметров.

6. По результатам решения серии численных экспериментов, направленных на поиск оптимального сценария водоотбора подземных вод с целью обоснования их рационального использования и охраны от загрязнения, установлено, что действительного уменьшения концентрации хлоридов подземных вод, извлекаемых определенными скважинами, можно достичь лишь индивидуальным изменением дебита каждой из них, при этом водоотбор из скважин, расположенных на южной окраине территории, не должен превышать  $400,0 \text{ м}^3/\text{сут}$ , а количество извлекаемых запасов в пределах палеодолины не должно быть менее  $3900,0 \text{ м}^3/\text{сут}$ . Суммарное же количество отбираемой воды в пределах Балтийской косы не должно превышать  $11670,0 \text{ м}^3/\text{сут}$ .

7. Перспективным направлением дальнейшего исследования является работа над созданием постоянно действующей математической модели западной части Калининградской области. Выполненная в рамках настоящего исследования работа будет являться в итоге основой для постоянно действующей модели, а собранный обширный материал по данному району обеспечит ее надежность.

## СПИСОК ОСНОВНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в периодических изданиях, входящих в перечень ВАК Минобрнауки России:

1. **Семенчук А.В.** Условия формирования эксплуатационных запасов подземных вод юго-западной части Калининградского полуострова / А.В. Семенчук // Региональная геология и металлогения. – СПб. – 2017. – № 69. – С. 61-68.
2. **Семенчук А.В.** Интерпретация результатов опытно-фильтрационных работ с применением метода математического моделирования для обоснования параметрической базы численной геофильтрационной модели / А.В. Семенчук // Региональная геология и металлогения. – СПб. – 2017. – Т. 1. – № 71. – С. 75-83.

В других изданиях:

3. **Семенчук А.В.** Изучение условий формирования эксплуатационных запасов подземных вод юго-западной части Калининградского полуострова / А.В. Семенчук // Материалы V международной конференции молодых ученых и специалистов памяти академика А.П. Карпинского. – СПб. – ВСЕГЕИ, – 2017. – С. 911-914.
4. **Семенчук А.В.** Применение метода математического моделирования для интерпретации результатов опытно-фильтрационных работ (на примере Новобалтийского месторождения подземных вод) / А.В. Семенчук // Сборник научных трудов. II Международная научно-методическая конференция. – СПб. – Санкт-Петербургский горный университет. – 2017. – С. 179-185.
5. **Семенчук А.В.** Изучение закономерности формирования подземных вод юго-западной части Калининградского полуострова в условиях их эксплуатации водозаборами подземных вод / А.В. Семенчук // Материалы XV Всероссийской научной конференции с международным участием «Вузовская наука – региону». – Вологда. – ВоГУ. – 2017. – С. 317-319.

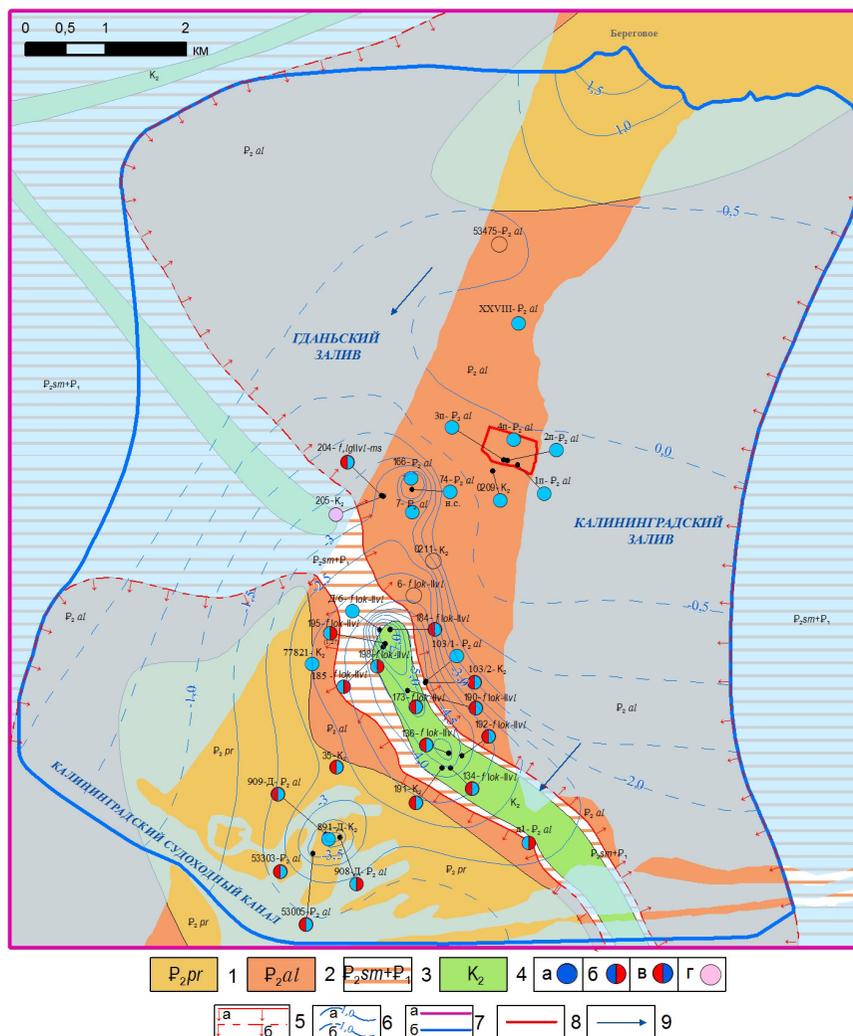


Рисунок 1. Гидрогеологическая карта дочетвертичных отложений. Составлено по (Тиунов В.Ю. и др., 1991; Семенчук А.В. и др., 2017, с изменениями). 1 – среднепалеогеновый прусский ВГ; 2 – среднепалеогеновый алкский ВГ; 3 – средне-нижнепалеогеновый ВУГ; 4 – верхнемеловой ВГ; 5 – химический тип воды в водопунктах: гидрокарбонатный (а), гидрокарбонатно-хлоридный (б), хлоридно-гидрокарбонатный (в), смешанный (г); 6 – контуры распространения среднепалеогенового алкского ВГ: достоверные (а), предполагаемые (б); 7 – гидроизопьезы среднепалеогенового алкского ВГ: достоверные (а), предполагаемые (б); 8 – область моделирования: внешний контур (а), активная область (б); 8 – участок Восточная Грива; 9 – направление движения подземных вод

Таблица 1. Характеристика гидрогеологических подразделений

Горизонт (комплекс)	Гидрогеологический индекс	Литологическое описание пород	Примечание
Четвертичный надморенный водоносный комплекс	III-N	Мелко- и тонкозернистые пески с прослоями суглинков и глин	Воды комплекса не пригодны для водоснабжения
Московский относительно водоупорный ледниковый горизонт	gIIms	Валунные суглинки с прослоями и линзами разнозернистых песков и ленточных глин	Локально распространен в центральной части района исследования
Вологодско-московский межморенный водоносный горизонт	f.lgIvl-III-IV	Разнозернистые пески, супеси с суглинком	Горизонт имеет повсеместное распространение. Воды горизонта не пригодны для водоснабжения
Вологодский относительно водоупорный горизонт	gIvl	Суглинки, глины и супеси с содержанием до 20-30 % гравия	Выклинивается в акватории Гданьского залива
Окско-вологодский межморенный водоносный горизонт	f.lgIok-IIvl	Разнозернистые пески с гравием и галькой, локализовано суглинки и глины	Слагает погребенную долину. Воды горизонта используются для централизованного водоснабжения г. Балтийск
Среднепалеогеновый прусский водоносный горизонт	P2pr	Разнозернистые глинистые пески и алевриты, в подошве плотные глинистые алевриты	Локально распространен на севере района и отдельными участками на юге. Для водоснабжения не используется
Среднепалеогеновый алкский водоносный горизонт	P2al	Мелко- и среднезернистые пески, алевриты	Выклинивается в пределах погребенной долины и в акватории Гданьского и Калининградского заливов. Воды горизонта используются для централизованного водоснабжения г. Балтийск
Средне-нижнепалеогеновый водоупорный горизонт	P2sm+P1	Глины, алевриты и алевриты	Выклинивается на участках максимального врез погребенной долины
Верхне-меловой водоносный горизонт	K2	Трещиноватые мергели и алевриты	Имеет повсеместное распространение. Воды горизонта используются для централизованного водоснабжения г. Балтийск

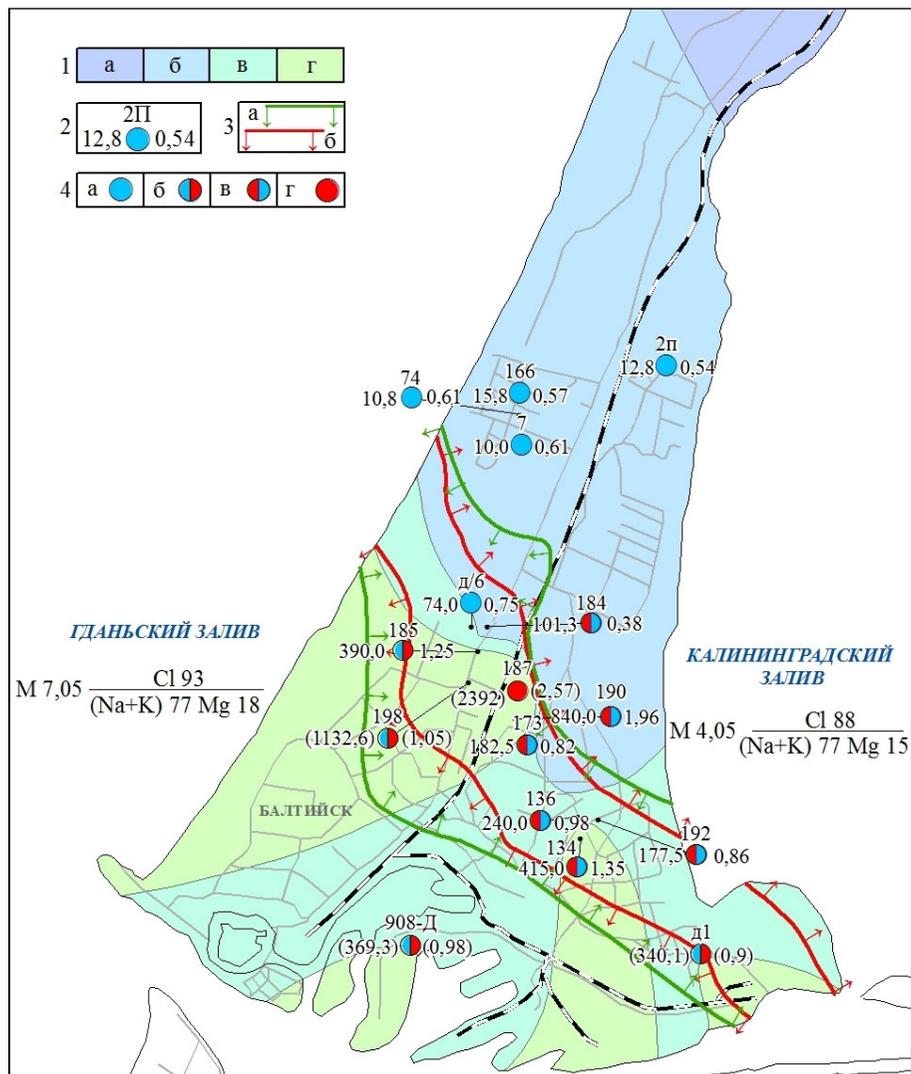


Рисунок 2. Карта-схема гидрохимической обстановки водозабора г. Балтийска по состоянию на март 2016 г. 1 – минерализация подземных вод в окско-вологодском и среднепалеогеновом алкском водоносных горизонтах: < 0,5 (а), 0,5-0,7 (б), 0,7-1,0 (в), >1,5 (г); 2 – гидрогеологическая скважина. Вверху – номер, слева – содержание хлоридов, мл/дм<sup>3</sup>, справа – минерализация, г/дм<sup>3</sup> по состоянию на март 2016 г. В скобках – по данным разновременных замеров; 3 – контур распространения водоносного горизонта: окско-вологодского (а), среднепалеогенового алкского (б); 4 – химический тип воды в водоупунктах: гидрокарбонатный (а), гидрокарбонатно-хлоридный (б), хлоридно-гидрокарбонатный (в), хлоридный (г)

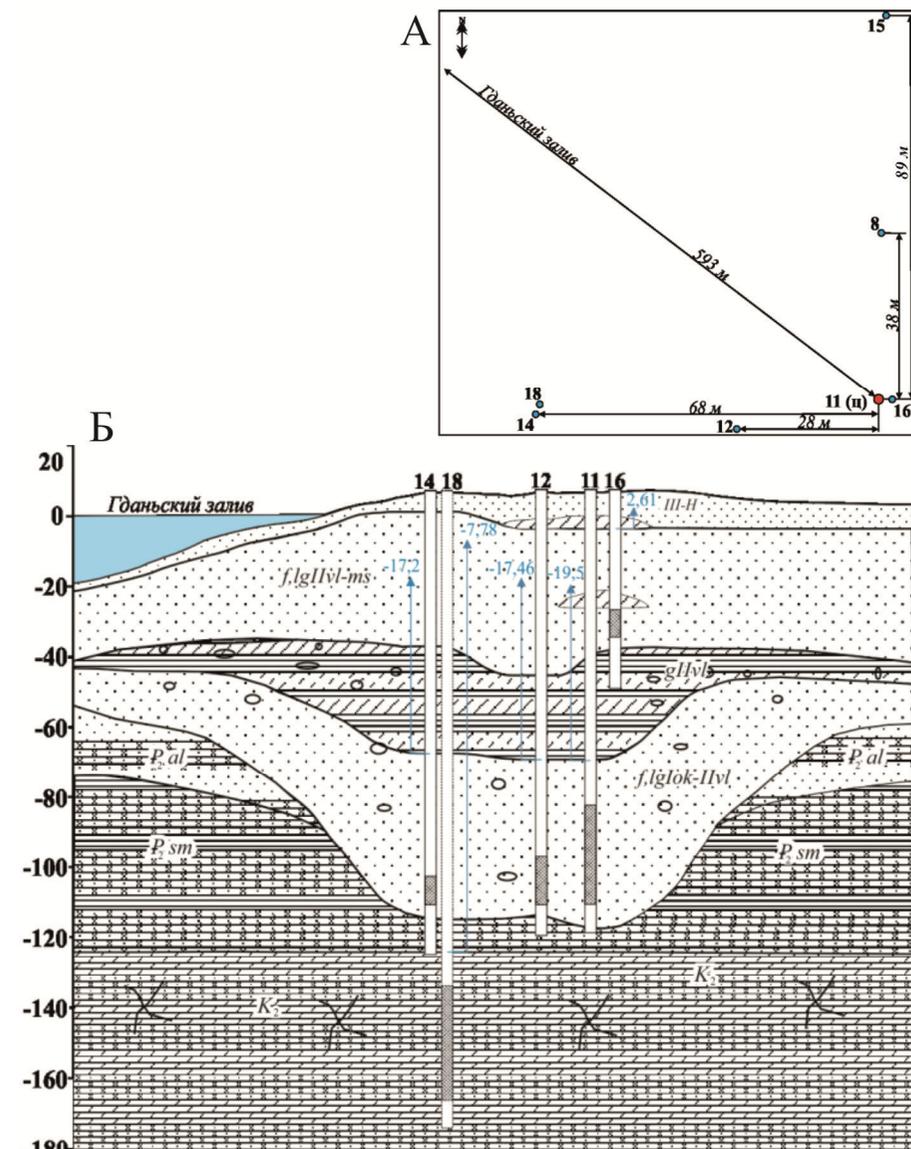


Рисунок 3. Схема опытного куста скважин (А) и схематический разрез участка работ (Б)

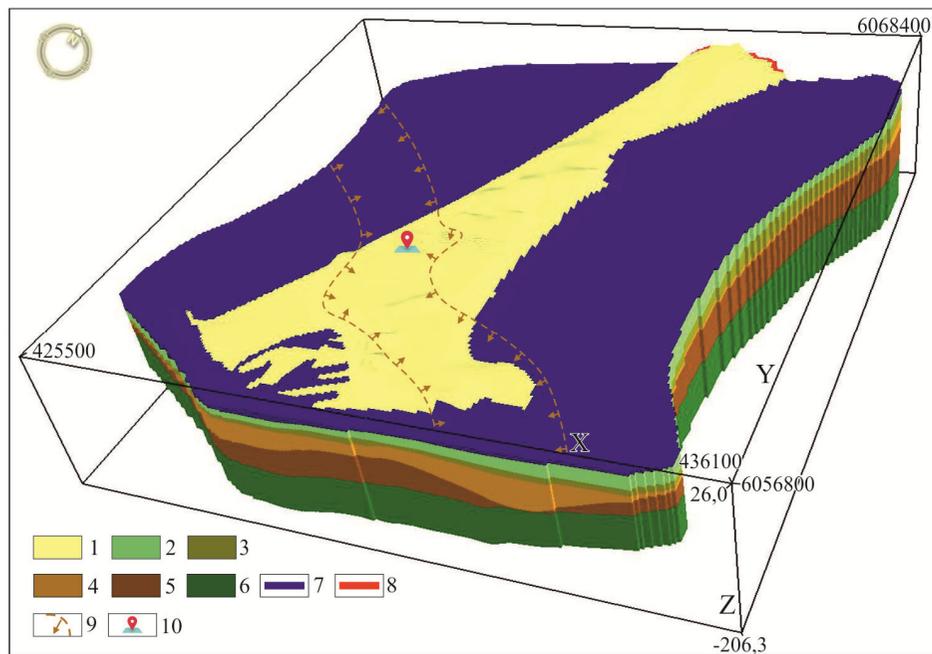


Рисунок 4. Цифровая трехмерная модель геологического пространства.  
 1-6 – модельные слои: 1 – 1-й, 2 – 2-й, 3 – 3-й, 4 – 4-й, 5 – 5-й, 6 – 6-й; 7 –  
 граничное условие I рода ( $H = const$ ); 8 – граничное условие II рода ( $Q = const$ ); 9 –  
 контур распространения окско-вологодского водоносного горизонта; 10 –  
 участок проведения опытно-фильтрационных работ в 1984 году

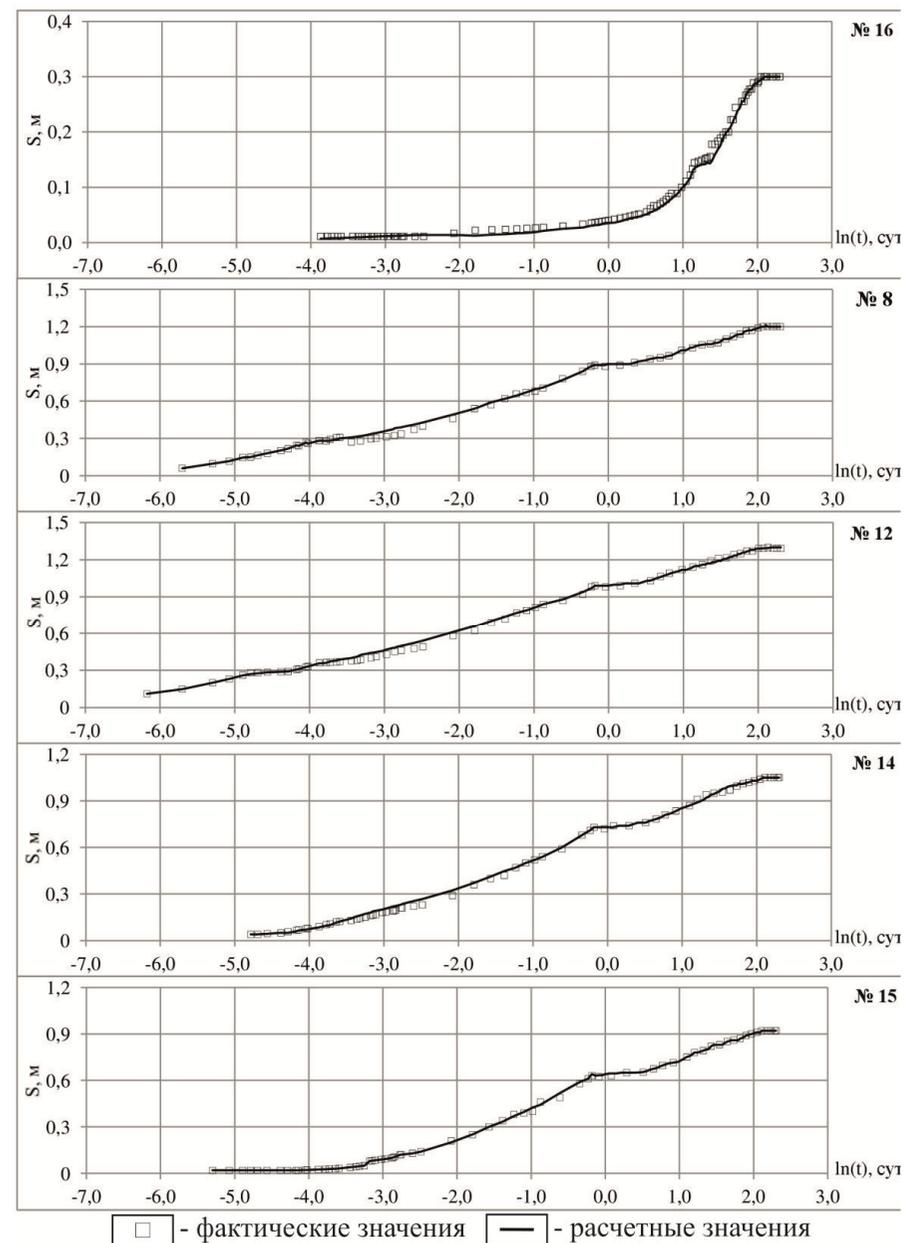


Рисунок 5. Сравнительные графики фактических и модельных понижений в  
 наблюдательных скважинах.

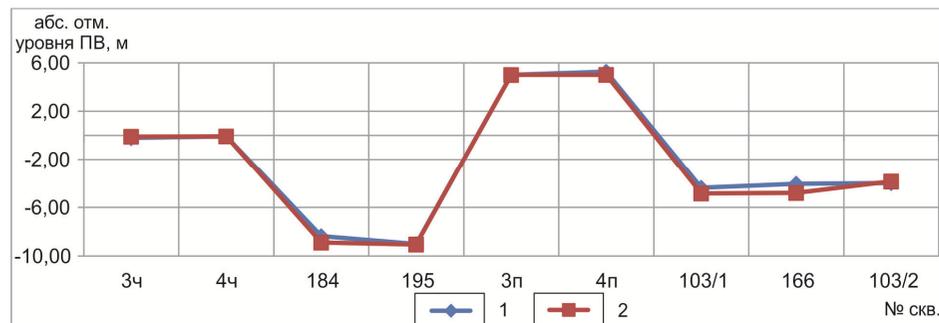


Рисунок 6. Сопоставление модельных и фактических уровней подземных вод в наблюдательных скважинах. 1 – расчетные значения; 2 – фактические значения

Таблица 2. Гидрогеологические параметры

№	Индекс	Параметр	Результаты аналитической интерпретации 1984 г.	Результаты численной интерпретации 2016 г.	Результаты калибровки модели по напорам
1.	III-H	$k_x$ , м/сут	-	1,4	0,5-2,1
		$k_z$ , м/сут	-	0,3-1,1	0,3-1,5
		$\eta^*$	-	$4,5 \cdot 10^{-4} - 6,4 \cdot 10^{-5}$	$4,5 \cdot 10^{-4} - 6,4 \cdot 10^{-5}$
		$\mu$	-	0,1	0,1
	gIIms	$k_x$ , м/сут	-	0,1	0,1
2.	f,lgIIvl-ms	$k_x$ , м/сут	1,37	0,95 - 2,1	0,95 - 2,1
		$k_z$ , м/сут	-	0,68 - 0,95	0,68 - 0,95
		$\eta^*$	-	$3,1 \cdot 10^{-5}$	$3,1 \cdot 10^{-5}$
3.	gIIvl	$k_x$ , м/сут	-	0,013 - 0,38	0,013 - 0,38
		$k_z$ , м/сут	$3,27 \cdot 10^{-2}$	$1,2 \cdot 10^{-3} - 3,5 \cdot 10^{-3}$	$1,2 \cdot 10^{-3} - 3,5 \cdot 10^{-3}$
		$\eta^*$	-	$1,0 \cdot 10^{-4}$	$1,0 \cdot 10^{-4}$
4.	f, lgIok-IIvl	$k_x$ , м/сут	10,75-15,18	10,5 - 17,2	10,5 - 17,2
		$k_z$ , м/сут	-	6,57	6,57
		$\eta^*$	-	$3,2 \cdot 10^{-5}$	$3,2 \cdot 10^{-5}$
	$P_{2pr} / P_{2al}$	$k_x$ , м/сут	5,26	2,2 - 8,3	2,2 - 8,3
$k_z$ , м/сут		-	0,9 - 1,3	0,9 - 1,3	
$\eta^*$		-	$3,75 \cdot 10^{-5}$	$3,75 \cdot 10^{-5}$	
5.	$P_{2sm} + P_1$	$k_x$ , м/сут	-	0,012 - 1,43	0,01 - 1,35
		$k_z$ , м/сут	-	$k_z = k_x$	$k_z = k_x$
		$\eta^*$	-	$1,0 \cdot 10^{-5}$	$1,0 \cdot 10^{-5}$
6.	$K_2$	$k_x$ , м/сут	1,45	1,43	1,35
		$k_z$ , м/сут	-	1,43	1,35
		$\eta^*$	-	$1,3 \cdot 10^{-5}$	$1,3 \cdot 10^{-5}$

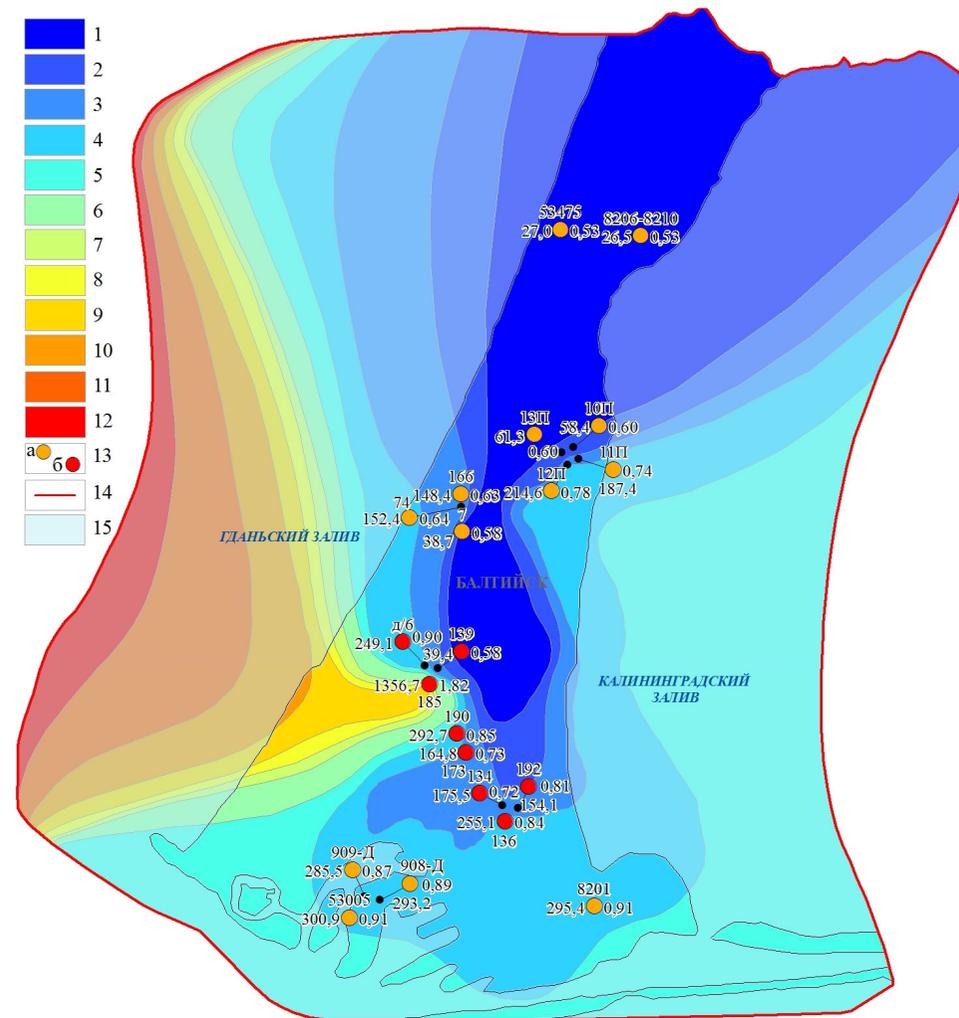


Рисунок 7. Распространение хлоридов в окско-вологодском и среднепалеогеновом алкском водоносных горизонтах на конец 9125 сут (оптимальный сценарий). 1-12 – концентрация хлоридов, мг/дм<sup>3</sup>: 1 – < 50, 2 – 50-100, 3 – 100-200, 4 – 200-350, 5 – 350-500, 6 – 500-1000, 7 – 1000-1500, 8 – 1500-2000, 9 – 2000-2500, 10 – 2500-3000, 11 – 3000-3500, 12 – > 3500; 13 – эксплуатационные скважины оборудованные на: среднепалеогеновый алкский водоносный горизонт (а), окско-вологодский водоносный горизонт (б); 14 – активная область модели, 15 – акватория Балтийского моря.