

На правах рукописи



ГРИДАСОВ АЛЕКСАНДР ГЕННАДЬЕВИЧ

**ГИДРОГЕОДИНАМИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ ТУТУЯССКОЙ МУЛЬДЫ
КУЗНЕЦКОГО БАСЕЙНА В СВЯЗИ С ПЕРСПЕКТИВОЙ ДОБЫЧИ
МЕТАНА ИЗ УГОЛЬНЫХ ПЛАСТОВ**

25.00.07 – Гидрогеология

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата геолого-минералогических наук

Томск – 2018

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (ФГАОУ ВО НИ ТПУ)

Научный руководитель:

Кузеванов Константин Иванович,
кандидат геолого-минералогических наук, доцент

Официальные оппоненты:

Бешенцев Владимир Анатольевич,
доктор геолого-минералогических наук,
профессор кафедры геологии нефти и газа,
ФГБОУ ВО «Тюменский индустриальный институт»

Новиков Дмитрий Анатольевич,
кандидат геолого-минералогических наук,
заведующий лабораторией гидрогеологии осадочных
бассейнов Сибири ФГБУН «Институт нефтегазовой геологии
и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН»,

Ведущая организация:

ФГБОУ ВО «Иркутский национальный
исследовательский технический университет», г.Иркутск

Защита диссертации состоится "24" декабря 2018 г. в 16 ч. 30 мин. на заседании объединенного диссертационного совета Д 999.170.03 при ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», ФГБУН «Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН», ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский государственный университет», по адресу: 634034, г. Томск, проспект Ленина 2а, строение 5, корпус 20, аудитория 504.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке ФГАОУ ВО НИ ТПУ (634050, г. Томск, ул. Белинского, 55) и на сайте <http://portal.tpu.ru/council/2799/worklist>

Автореферат разослан "___" ноября 2018 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета
Д999.170.03, к.г.-м.н.
Евгеньевна



Лепокурова Олеся

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность. Научно-технический прогресс сопровождается неуклонным ростом энергопотребления, при этом существенную долю источников энергии составляют ископаемые виды топлива: уголь, нефть, газ. В последнее время всё большее внимание уделяется нетрадиционным источникам углеводородов, за счёт которых возможно расширение ресурсной базы энергетического сырья. Одним из перспективных видов ископаемых углеводородов является метан угольных пластов, прогнозные ресурсы которого на территории Российской Федерации сопоставимы с ресурсами традиционных источников природного газа. Метан является неизбежным спутником угленосных формаций, поскольку образуется на всём протяжении углефикации органических осадков и прочно сорбируется материнской породой под действием напора подземных вод. Нарушение гидродинамических условий при ведении горных работ вызывает десорбцию метана, который закономерно мигрирует в область пониженного давления, т.е. в горную выработку. Этим обусловлена метановая опасность закрытой разработки угольных месторождений. На данном свойстве основана и методика добычи метана из угольных пластов скважинным способом. Газоносный угольный пласт вскрывается скважинами с дневной поверхности, запускается откачка пластовых вод, вследствие чего метан десорбируется и по градиенту давления поступает в скважину. Таким образом, скважинная добыча метана из угольных пластов сопровождается извлечением пластовых вод на поверхность и последующей их утилизацией после дегазации, чем существенно влияет на подземную гидросферу региона газодобычи.

Первый в России проект по добыче угольного метана реализуется в Кузнецком угольном бассейне. Здесь уже ведётся опытно-промышленная добыча на Талдинской и Нарыкско-Осташкинской площадях, планируется освоение Тутуянской площади. Особенностью последней является наличие месторождений подземных вод на перспективной для добычи газа территории. Крупнейшее из разведанных в районе Тутуяское месторождение подземных вод уникально для Кузбасса как по качественным показателям воды, так и по величине утверждённых запасов.

Гидрогеологические условия Кузбасса изучали М.А. Кучин, Г.М. Рогов, Г.А. Плевако, Ж.Н. Савина, О.В. Постникова, В.Д. Покровский, В.К. Попов, Ю.В. Макушин, Н.М. Рассказов, С.Л. Шварцев, В.М. Людвиг, В.П. Дегтярёв, Е.В. Домрочева и другие.

Высокая значимость гидрогеологических аспектов угольнометанового промысла, который в районе Тутуянской мульды планируется развивать в непосредственной близости от месторождений подземных вод, определяет актуальность настоящего диссертационного исследования.

Объектом исследования является природно-техническая гидрогеологическая система, охватывающая разрез Тутуянской мульды от поверхности до глубины распространения угленосных отложений. **Предмет исследования** – воздействие эксплуатационного водоотбора из угольнометановых скважин на поле напоров подземных вод.

Цель исследования – выявить закономерности формирования водопритока к угольнометановым скважинам в гидрогеологических условиях Тутуянской мульды Кузбасса, установить формы и масштабы влияния добычи метана из угольных пластов на подземные воды региона, в частности на месторождения пресных подземных вод.

В соответствии с поставленной целью, решались следующие **задачи**:

1. Изучить данные о гидрогеологических условиях, определяющих характер водообмена в недрах Кузбасса от дневной поверхности до подошвы угленосной толщи.
2. Проанализировать закономерности в распределении проницаемости пород, выполнить геофильтрационную схематизацию объекта исследований.
3. Построить модель нарушенного режима фильтрации и выявить закономерности формирования водопритока к угольнометановым скважинам.
4. Оценить потенциал влияния угольнометанового промысла на подземные воды региона, в частности на Тутуяское месторождение пресных подземных вод.

Защищаемые положения:

1. Установлено, что гидродинамическая зональность Тутуянской мульды характеризуется вертикальной и плановой фильтрационной неоднородностью пород. В контексте решаемых задач область фильтрации правомерно схематизировать в виде двухслойной толщи, отражающей вертикальную гидродинамическую зональность. При этом структура природно-технической гидрогеологической системы сводится к перечню характерных показателей проницаемости, типовых начальных и граничных условий.

2. Гидрогеологические условия района определяют формирование водопритока к угольнометановым скважинам за счёт естественных запасов подземных вод зоны замедленного водообмена в интервале глубин 500-2000 м. Фильтрационная неоднородность угленосных пород в зоне замедленного водообмена определяет интенсивное затухание гидродинамических возмущений в разрезе, тем самым способствует локализации влияния угольнометановых скважин.

3. Ресурсы Тутуяского месторождения пресных подземных вод формируются на всей площади водосборного бассейна реки Тутуяс, следовательно, в процессе развёртывания и эксплуатации угольнометанового промысла на данной площади, необходимо принимать меры по защите природных вод от загрязнения.

Методика исследования. Достоверность результатов диссертационной работы обеспечена полнотой рассмотрения данных предшествующих исследований подземных вод Кузбасса, а также применением апробированного научно-методического аппарата. В работе использовались опубликованные данные научных исследований, фондовые материалы, карты и цифровые модели рельефа из официальных источников.

На первом этапе работы проводился сбор и обобщение данных о природных условиях региона и анализ технологических особенностей скважинной добычи метана из угольных пластов. Для определения пространственного положения элементов гидрогеодинамической структуры применялся морфоструктурно-гидрогеологический анализ региональной модели рельефа. В результате разработана геофильтрационная схема объекта исследований.

Второй этап включил в себя постановку модельных экспериментов, в ходе которых решались прогнозные задачи о гидродинамических условиях работы угольнометановых скважин и водозаборов подземных вод. Гидрогеологическое моделирование осуществлялось с помощью вычислительного модуля MODFLOW, реализующего конечно-разностную аппроксимацию уравнения фильтрации.

На заключительном этапе работы выполнена интерпретация результатов моделирования, анализ гидрогеодинамических условий добычи метана из угольных пластов и оценка потенциала влияния данного промысла на подземную гидросферу района, составление карт и схем, описание результатов, формулирование выводов. Картографические материалы оформлены с помощью геоинформационной системы ArcGIS.

Научная новизна работы:

1. Впервые осуществлена прогнозная оценка нарушенного режима фильтрации при эксплуатации угольнометановых скважин в гидрогеологических условиях Тутуяской мульды Кузбасса. Исследованы условия формирования водопритока к скважинам и потенциал влияния добычи угольного метана на подземную гидросферу района.

2. Разработана геофильтрационная схема, учитывающая гидрогеологические условия южной провинции Кузнецкого бассейна. Схематизация охватывает все актуальные элементы гидродинамической структуры от глубокозалегающих угленосных толщ до водных объектов на земной поверхности.

3. Проведены модельные эксперименты по оценке влияния угольнометановых скважин и водозаборных скважин Тутуяского месторождения подземных вод. Выявлен характер воздействия эксплуатации скважин на напорное гидродинамическое поле.

4. Определены принципы неконфликтного недропользования для обеспечения сохранности запасов пресных подземных вод в ходе добычи метана из угольных пластов.

Теоретическая значимость. Обоснованы численные модели нарушенного режима фильтрации при эксплуатации угольнометановых скважин, демонстрирующие гидравлическую обособленность коллекторов подземных вод зон замедленного и активного водообмена. Показано определяющее влияние закономерной фильтрационной неоднородности угленосных отложений Кузбасса на структуру фильтрационных потоков в зоне замедленного водообмена.

Практическая значимость. Результаты настоящей работы могут быть актуальны при выборе схемы дренирования угленосных толщ и способа утилизации попутных вод в районе Тутуяской мульды. Разработанную в процессе исследования геофильтрационную схему правомерно использовать также для структуризации и параметрического наполнения гидрогеологических моделей при решении широкого спектра гидрогеодинамических задач в пределах южного Кузбасса. Материалы диссертационного исследования применялись при составлении серии производственных отчётов ТФ ИНГГ СО РАН в период с 2014 по 2016 год.

Личный вклад автора состоит в сборе и обобщении фактического материала, разработке и оптимизации геофильтрационной схемы объекта, в проведении модельных экспериментов, графической интерпретации и анализе их результатов. В ходе работы над диссертацией автор неоднократно посещал район исследований для сбора гидрогеологических данных.

Апробация. Результаты исследований докладывались на тематических научных конференциях в период с 2014 по 2018 годы в Томске, Новосибирске и Санкт-Петербурге. В составе коллектива авторов были выполнены доклады на Коровинских чтениях в ТПУ в 2014 году и на Роговских чтениях в ТГАСУ в 2015 году. Индивидуальные доклады диссертанта состоялись на международных симпозиумах имени М.А. Усова в ТПУ с 2014 по 2018 годы, Трофимукловских чтениях в НГУ и всероссийской конференции по проблемам гидрогеологии Евразии в ТПУ в 2015 году, а также на международной конференции «Экологические проблемы недропользования» прошедшей в СПбГУ в 2016 году.

Благодарности. Автор благодарен С.Л. Шварцеву, под руководством которого поставлены цель и задачи исследования, а также определена структура диссертации. В ходе работы над диссертацией получены ценные консультации от В.К. Попова, Е.М. Дутовой, О.Г. Савичева, Е.В. Домрочевой, О.Е. Лепокуровой, которым автор выражает искреннюю благодарность. Автор признателен коллективу отделения геологии ТПУ за глубокий интерес к исследованию и постоянную поддержку. Автор особо благодарен научному руководителю К.И. Кузеванову за ценные наставления в процессе выполнения исследований.

Структура и объём работы. Диссертационная работа изложена на 127 страницах машинописного текста, включает введение, пять глав и заключение, содержит 7 таблиц и 42 рисунка. Список литературы состоит из 104 источников.

Во **введении** проведено общее описание проблемы влияния добычи угольного метана на подземные воды и обоснована актуальность диссертационного исследования.

В **первой главе** рассматривается история изучения природных условий региона, перечисляются виды исследований, характеризуется современная изученность применительно к проблематике исследования. Особое внимание уделено крупным исследователям Кузбасса и их вкладу в формирование изученности бассейна.

Во **второй главе** рассмотрена совокупность природных условий, которая формирует процессы водообмена в регионе и определяет гидрогеологические условия добычи угольного метана. Приводится физико-географическая характеристика района исследований и его геологическое строение.

В **третьей главе** приводится описание гидрогеологических условий района в контексте решаемых задач. Приведены гидрогеологическая стратификация и районирование, а также рассмотрены основные закономерности движения и формирования подземных вод района. Особое внимание уделено особенностям фильтрационной неоднородности и процессам формирования зон с повышенной проницаемостью.

Четвёртая глава посвящена разработке геофильтрационной схемы для исследования гидрогеологических аспектов планируемой добычи угольного метана. Проводится факторный анализ условий водообмена, выявляются ведущие факторы формирования режима подземных вод в пределах объекта исследований. Выполняется морфоструктурно-гидрогеологический анализ объекта. Описывается типизация и схематизация гидрогеодинамических условий района. Приводится перечень элементов области фильтрации и граничных условий, а также их параметры.

В **пятой главе** проводится разносторонний анализ гидрогеодинамических условий скважинной добычи метана из угольных пластов. Оцениваются закономерности формирования водопритока к газодобывающим скважинам. Рассматривается модель нарушенного режима фильтрации. Оцениваются условия взаимодействия скважин с гидродинамическими границами. Выполняется обоснование прогноза влияния добычи угольного метана на подземные воды региона. Определяется уязвимость пресных подземных вод к различным аспектам угольнометанового промысла.

В **заключении** обсуждаются результаты исследований, приводятся выводы и рекомендации по практической реализации полученных данных.

ХАРАКТЕРИСТИКА ОБЪЕКТА

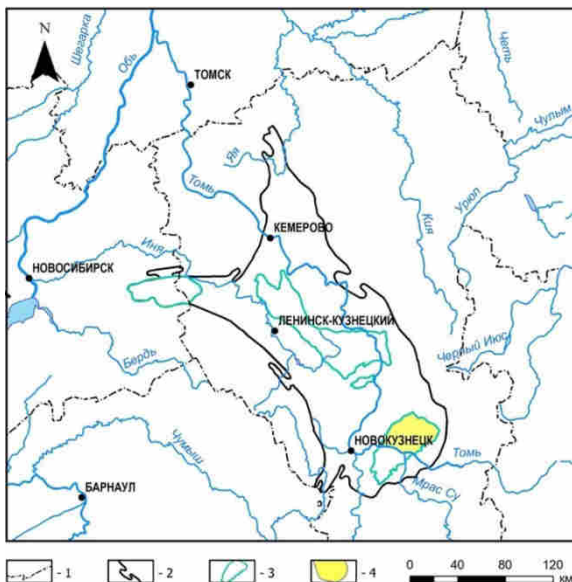


Рис. 1. Схема расположения района исследований

1 – административные границы субъектов РФ;
2 – контур Кузнецкого бассейна; 3 – крупные синклиории бассейна, выполненные мезозойскими отложениями; 4 – исследуемый район.

позднепалеозойской угленосной формации и девонско-раннекаменноугольного основания. Непосредственный интерес данного исследования представляет водоносные комплексы континентальных мезозойских и верхнепалеозойских угленосных отложений.

Ресурсы угольного метана в районе исследований приурочены к верхнепермским угленосным отложениям кольчугинской серии, которые залегают под толщей осадков юрского возраста. Условия водообмена угленосной толщи формируются в результате совокупного действия ряда факторов, определяющих градиент и структуру фильтрационных потоков, а также проницаемость основных коллекторных зон. По генетическому признаку выделены три группы факторов: физико-географические, геологические, гидрогеологические. Все факторы являются компонентами природных условий. Факторный анализ условий водообмена является необходимой процедурой при схематизации гидрогеологических условий объекта.

Природные условия района исследований обусловлены его положением в южной провинции Кузнецкого угольного бассейна, в непосредственной близости от сопряжения с горными системами Кузнецкого Алатау и Горной Шории. В структурном отношении бассейн расположен в северо-западной части Алтае-Саянской складчатой области, близко к границе Западно-Сибирской равнины и представляет собой межгорную

котловину. По условиям залегания подземных вод Кузнецкий бассейн является адартезианским и объединяет водоносные структуры мезозойских впадин,

Физико-географические факторы формирования водообмена включают климатические условия, особенности ландшафта и рельефа. Климат района резко континентальный, с продолжительной холодной зимой и коротким жарким летом. Интенсивность осадков достигает 750 мм, при среднем многолетнем значении 500 мм. Избыточно-увлажнённый климат обеспечивает благоприятные условия для питания и разгрузки подземных вод, что выражено в развитии плотной речной сети и высокой эрозионной расчленённости рельефа.

Горные системы Салаира и Кузнецкого Алатау, протяжённые меридианально вдоль границ котловины Кузнецкого бассейна, создают препятствия на пути атлантических и арктических воздушных масс, тем самым определяя особенности климата. Район исследований лежит в области расчленённого низкогогорного рельефа, перепад высот между водоразделами и водотоками достигает 400 м в диапазоне абсолютной высоты от 180 до 580 м. Линии водоразделов узкие, с ломаным профилем и широкими склонами. Долины рек нередко заложены субпараллельно горным обрамлениям бассейна, что свидетельствует об их тектонической природе. Формы рельефа и особенности ландшафта формируют весьма благоприятные условия для питания и разгрузки подземных вод.

Геологические факторы формирования водообмена включают литологическое строение, структурные особенности и тектонические условия района, определяющие фильтрационные свойства пород. В разрезе Кузнецкого бассейна выделяется три характерных структурных этажа: нижний – представленный морскими терригенными отложениями основания, средний – представленный угленосной толщей и верхний – представленный континентальными отложениями, которые перекрывают угленосные формации в ядрах крупнейших синклинальных структур.

Перспективными для добычи угольного метана являются верхнепермские (P_2) угленосные отложения кольчугинской серии, слагающие средний структурный этаж отложений бассейна. В свою очередь, кольчугинская серия подразделяется на ильинскую (P_{2il}) и ерунаковскую (P_{2er}) подсерии, а также свиты (рис.2). Общая мощность угленосной толщи превышает 2000 м, а суммарная мощность пластов угля достигает 320 м. Литологический состав кольчугинской серии представлен песчаниками, алевролитами, агриллитами и углями. Наибольшим распространением пользуются алевролиты (до 60%) и песчаники, занимающие до 24% разреза. Литологические разности непостоянны, их состав и мощности варьируются как в разрезе, так и по площади. Относительно выдержаны слои песчаников, мощности которых достигают 50 м. Угли слагают около 10% толщи при мощности отдельных пластов в пределах первых метров.

Отложения, слагающие верхний структурный этаж, не вмещают угольных пластов, пригодных для добычи метана. Тем не менее, в контексте настоящей работы они представляют практический интерес как элементы гидродинамической структуры, поскольку перекрывают угленосные формации мощным осадочным чехлом и являются областью формирования ресурсов пресных подземных вод регионального значения. Верхний структурный этаж бассейна в районе исследований представлен юрскими и четвертичными отложениями.

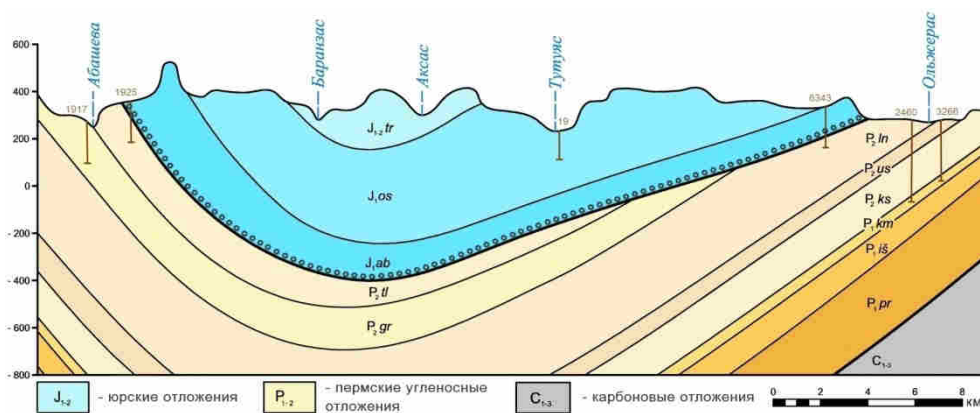


Рис. 2. Схематичный геологический разрез Тугуяской мульды

Юрские отложения тарбаганской серии (J_{1-2tb}) представлены конгломератами, песчаниками и алевролитами, в которых встречаются пласты бурых углей. Мощность отложений изменяется в широких пределах, достигая 800 м в наиболее погруженной части Тугуяской мульды. Породы юрского возраста имеют высокую активную пористость, поскольку подверглись уплотнению и диагенетизации в меньшей степени, чем нижележащие угленосные отложения.

Четвертичные отложения (Q), венчающие геологический разрез, распространены повсеместно и представлены покровными пылеватыми и лёссовидными и суглинками (р, рd Q), а также речными супесями, песками и гравийно-галечными отложениями (а Q). Мощность четвертичных отложений варьирует от нуля до нескольких десятков метров. Отложения речных долин высокопроницаемы и обеспечивают гидравлическую связь нижележащих мезозойских отложений с гидрографической сетью. Покровные отложения характеризуются невысокой проницаемостью, обеспечивая распределение метеорных вод в пользу поверхностного стока, сглаживая сезонные пики интенсивности инфильтрационного питания подземных вод.

Гидрогеологическими факторами формирования условий водообмена являются гидродинамическая зональность и фильтрационная неоднородность, которые чётко прослеживаются как в разрезе, так и в плане. Существенное влияние на формирование фильтрационных потоков оказывает гидрогеологическая стратификация массива пород. В пределах объекта исследований, по литолого-стратиграфическим и гидродинамическим признакам выделено три гидрогеологических стратона:

Водоносный комплекс четвертичных аллювиальных отложений. Является первым от поверхности постоянно действующим водоносным горизонтом, приурочен к отложениям речных долин, мощность которых изменяется от 0 до 10 метров. Воды порово-пластовые, имеют свободную поверхность. Проницаемость комплекса определяется гранулометрическим составом слагающих пород и характеризуется широким диапазоном значений. В руслах крупных водотоков преобладают гравийно-галечниковые фации с величиной k_f 10-50 м/сут, но на заболоченных пойменных участках значение k_f в разрезе комплекса не превышает 1 м/сут.

Водоносный комплекс юрских отложений (J_{1-2}). Распространён на площади синклинальных структур, имеет мощность от 0 до 800 м. По характеру движения воды являются трещинными и трещинно-пластовыми, в зоне выветривания – трещинно-поровыми. Отложения обладают повышенной проницаемостью относительно палеозойских пород, которая особенно выражена в зоне активного водообмена, где формируются крупные запасы пресных подземных вод. Проницаемость пород закономерно затухает с глубиной, а также изменяется по площади. Продуктивность скважин в долинах рек существенно выше, чем на склонах и водоразделах. В нижнем течении реки Тутуяс разведан участок, на котором величины k_f в зоне активного водообмена достигают 70 м/сут, тогда как характерные значения k_f под долинами рек в районе варьируют от 1 до 10 м/сут. По направлению к линиям водоразделов затухание проницаемости достигает двух порядков.

Водоносный комплекс пермских отложений (P_{1-2}). Распространён повсеместно, мощность превышает 2000 м. На площади района исследований перекрыт толщей юрских отложений неоднородной мощности. Фильтрационные свойства пород комплекса весьма неравномерны, воды трещинно-пластовые и трещинно-жильные. Наиболее проницаемы зоны, в разрезе которых преобладают песчаники, менее – алевролиты и аргиллиты. Проницаемость пластов угля значительно выше, чем смежных пород. Значения k_f по данным опробований глубоких скважин варьирует в пределах 0,001-0,04 м/сут, иногда ниже. Ритмичное переслаивание отложений с весьма различной проницаемостью определяет слоистую фильтрационную неоднородность массива угленосных отложений.

ЗАЩИЩАЕМЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Первое положение. Установлено, что гидродинамическая зональность Тутуянской мульды характеризуется вертикальной и плановой фильтрационной неоднородностью пород. В контексте решаемых задач область фильтрации правомерно схематизировать в виде двухслойной толщи, отражающей вертикальную гидродинамическую зональность. При этом структура природно-технической гидрогеологической системы сводится к перечню характерных показателей проницаемости, типовых начальных и граничных условий.

Схематизация природно-техногенных условий для целей гидродинамического моделирования представляет самостоятельную научную задачу и состоит в выявлении пространственной структуры области фильтрации и изменчивости фильтрационных характеристик, типизации граничных и начальных условий, а также в определении режима техногенной нагрузки. Теоретические основы гидрогеологической схематизации разрабатывались И.К. Гавич, В.А. Мироненко, В.М. Шестаковым и другими учёными.

В основе схематизации лежит факторный анализ условий водообмена в толще отложений Тутуянской мульды. Схематизация выполнена с учётом данных регионального изучения геологического строения и гидрогеологических условий, материалов опытно-фильтрационных работ, результатов изыскания источников водоснабжения и оценки гидрогеологических условий подземной отработки угольных пластов. Проанализированы результаты разведочных работ на уголь, угольный метан и подземные воды в Ерунаковском, Тутуяском и Томь-Усинском промышленных районах.

Декомпозиция области фильтрации до совокупности типовых элементов гидродинамической схемы выполнена в следующей последовательности:

1. Выделение основных элементов области фильтрации;
2. Определение граничных и начальных условий для каждого элемента;
3. Оценка обобщённых характеристик элементов, определение диапазона и средних значений фильтрационных параметров.

При составлении геофильтрационной схемы рассмотрены факторы, формирующие фильтрационную неоднородность недр объекта исследований. Проницаемость блока пород в разрезе Кузнецкого бассейна определяется одновременно его геологическим строением и трещиноватостью различного генезиса, а также открытостью системы трещин. Закономерное затухание трещиноватости с глубиной обуславливает вертикальную гидродинамическую зональность, при этом в разрезе отчётливо выделяются зоны активного и замедленного водообмена, а также зона весьма замедленного водообмена (таблица 1).

Таблица 1. Вертикальная гидродинамическая зональность

Зона водообмена	Мощность, м	Глубина распространения, м	Открытая пористость пород, %	Коэф. фильтрации Кф, м/сут	Минерализация, г/л	Тип вод
Активного	50-150	до 150	до 40	до 70	0,4-1	HCO ₃ -Ca
Замедленного	≈2000	до 2000	2-10	0,001-0,4	0,7-8	HCO ₃ -Na
Весьма замедленного	н.д.	более 2000	1,5-3	н.д.	> 10	Cl-Na

Литологическое строение определяет характер развития трещин в массиве, а также изменение проницаемости пород в результате расцементации по трещинам. Так, аргиллиты и алевролиты обладают большей удельной трещиноватостью, чем песчаники или конгломераты. При этом, в ходе расцементации аргиллитов, пространство трещин заполняется тонкодисперсным материалом, что затрудняет фильтрацию, тогда как трещины песчаников и конгломератов выполнены более грубым материалом, вследствие чего проницаемы в большей степени. Проницаемость пластов угля обусловлена увеличенной открытой пористостью, тектонической и диагенетической трещиноватостью и характеризуется повышенными значениями на фоне смежных пород. Литологический состав пород в сочетании с возрастом, генезисом и фильтрационными свойствами, обуславливает гидрогеологическую стратификацию разреза, представленную в таблице 2.

Таблица 2. Гидрогеологическая стратификация

Водовмещающие отложения	Индекс	Мощность, м	Литологическое описание	Коэф. фильтрации Кф, м/сут.
Четвертичные	Q _{I-IV}	до 10	Гравийно-галечные отложения, пески	1 – 50
Юрские	J ₁₋₂	до 800	Конгломераты с прослоями песчаников и пропластками углей	0,01 – 70
Пермские	P ₁₋₂	более 2000	Чередование песчаников, алевролитов, аргиллитов с угольными пластами	0,001 – 1

Фильтрационная неоднородность пород в зоне активного водообмена характеризуется латеральной изменчивостью, которая коррелирует с формой рельефа. Об этом убедительно свидетельствуют данные гидрогеологических исследований района, опубликованные в работах Сухопольского О.В., Савиной Ж.Н. Обратная зависимость проницаемости отложений Кузбасса от абсолютной высоты устья скважины отмечается в работах Рогова Г.М., Макушина Ю.В. На основании морфоструктурно-гидрогеологического анализа составлена схема районирования объекта по проницаемости пород водоносного комплекса юрских отложений в зоне активного водообмена, отраженная в таблице 3.

Таблица 3. Обобщённые параметры области фильтрации

Зона водообмена	Элемент	Коэффициент фильтрации $Kф$. От – до (в среднем), м/сут.	
		J_{1-2}	P_{1-2}
Активного	Нижнетутуясская площадь	10-70 (50)	-
	Долины	1-10 (5)	0,3-1 (0,5)
	Склоны	0,1-1 (0,5)	0,1-0,3 (0,2)
	Водоразделы	0,01-0,1 (0,05)	0,01-0,1 (0,05)
Замедленного	Эксплуатируемый пласт	-	0,001-0,04 (0,01)
	Толща смежных пород	0,01 по латерали	0,01 по латерали
		0,001 в разрезе	0,001 в разрезе

В результате морфоструктурно-гидрогеологического анализа получена также модель пространственного положения гидродинамических границ, соответствующих областям питания и разгрузки подземных вод и определяющих направление фильтрационных потоков в зоне активного водообмена. Параметры граничных условий приведены в таблице 4.

Таблица 4. Элементы гидродинамической схематизации

Зона водообмена	Элемент	Граничные условия: род, функция
Активного	Рельеф (верхняя граница)	II, $W = f(t)$
	Водоразделы (периметр модели)	II, $Q = 0$
	Водотоки	I или III, $H = f(t)$
	Скважины водозаборные	II, $Q(t) = \text{const}$
	Нижняя граница	II, $Q = 0$
Замедленного	Верхняя граница	I или III, $H(t) = \text{const}$
	Водоразделы региональные	II, $Q = 0$
	Тектонические нарушения	II, $Q = 0$ или III, $H(t) = \text{const}$
	Скважины угольнометановые	II, $H(t) = \text{const}$
	Нижняя граница	II, $Q = 0$
	Периметр модели	I, $H(t) = \text{const}$

Второе положение. Гидрогеологические условия района определяют формирование водопритока к угольнометановым скважинам за счёт естественных запасов подземных вод зоны замедленного водообмена в интервале глубин 500-2000 м. Фильтрационная неоднородность угленосных отложений в зоне замедленного водообмена определяет интенсивное затухание гидродинамических возмущений в разрезе, тем самым способствует локализации влияния угольнометановых скважин.

Структурное положение угольных пластов, перспективных для добычи метана, определено на основании анализа геолого-гидрогеологических условий Тутуяской мульды (рис. 3). Глубина кровли газоносной толщи пермских отложений на площади изучаемой структуры неодинакова и определяется положением нижней границы зоны газового выветривания, а также мощностью вышележащих отложений юрского возраста. На крыльях мульды глубина залегания газоносных угольных пластов отсчитывается от 500 м, возрастая до 800 м по направлению к осевой части структуры. С глубиной условия извлечения угольного метана усложняются, в этой связи, технологические и экономические факторы ограничивают глубину угольнометановых скважин ориентировочно до 2000 м. Таким образом, скважины на угольный метан будут откачивать подземные из интервала глубин 500-2000 м. Данный интервал принадлежит зоне замедленного водообмена, что определяет гидрогеологические условия работы скважин угольно-метанового промысла.

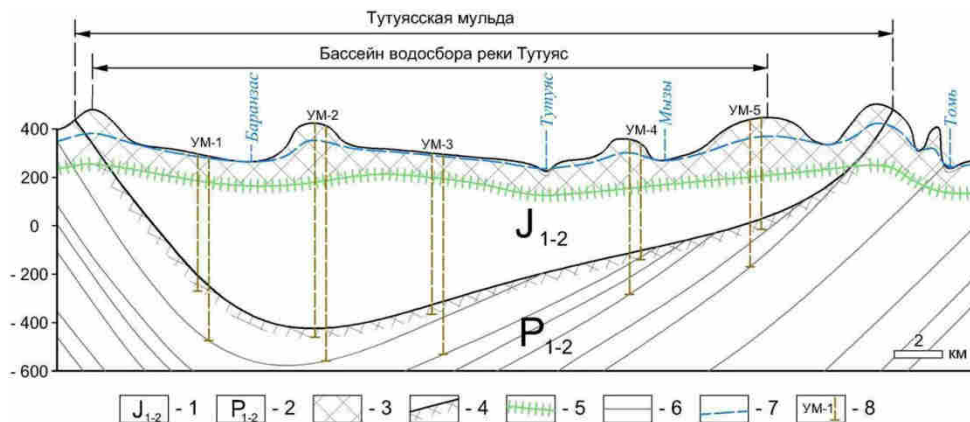


Рис. 3. Гидрогеологический разрез Тутуяской мульды

1 – водоносный комплекс юрских отложений; 2 – водоносный комплекс пермских отложений; 3 – зона активного водообмена; 4 – погребённая кора выветривания; 5 – зона вторичного минералообразования; 6 – угольные пласты; 7 – уровень подземных вод; 8 – проектируемые угольнометановые скважины.

Существенную проблему при оценке фильтрационной неоднородности глубоко залегающих отложений Кузбасса представляет особенность методики гидродинамических опробований. При проведении опытно-фильтрационных работ в зоне замедленного водообмена, как правило, опробованию подвергают интервалы глубин до нескольких сотен метров, которые охватывают серию литологических разностей с различной проницаемостью. Полученные данные позволяют судить о водопроводимости вскрытого интервала пород в целом и не дают оснований для детального расчленения разреза зоны, замедленного водообмена по проницаемости, что необходимо в рамках настоящего исследования. В этой связи, для выяснения фильтрационной неоднородности в толще угленосных пород использованы данные определения открытой пористости, полученные при опробовании скважины «Томская Глубокая» в Томь-Усинском районе Кузбасса.

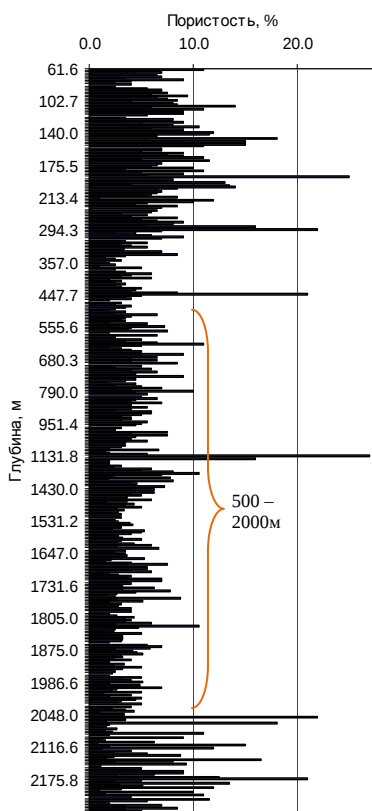


Рис. 4. Изменение пористости с глубиной по стволу скважины «Томская Глубокая» (по данным ИНГГ СО РАН).

На графике изменения пористости с глубиной, представленном на рисунке 4, выделен участок 500-2000 м, характеризующий угленосную толщу в интервале глубин планируемой добычи угольного метана на Тутуясской площади. На основании анализа распределения значений пористости и их сопоставлении с результатами фильтрационных опробований, уточнён характер изменения проницаемости в угленосной толще и определён диапазон изменения значений. Обобщённые результаты оценки фильтрационной неоднородности приведены в таблице 3.

Для определения характера возмущения гидродинамического поля при эксплуатации угольно-метановых скважин, построена модель угленосной толщи с гидродинамическими параметрами, присущими зоне замедленного водообмена. Геометрические характеристики модели определены с таким расчётом, чтобы контуры области фильтрации были отдалены от зоны влияния скважины на расстояние, исключающее их воздействие на форму депрессионной воронки. Верхний слой модели соответствует толще мезозойских отложений и

обладает повышенным значением проницаемости. В соответствии с разработанными схемами (таблицы 3 и 4), заданы граничные условия и фильтрационные параметры элементов модели. Имитация эксплуатационного водоотбора выполнена при максимально допустимом динамическом уровне, который соответствует глубине залегания кровли дренируемого угольного пласта.

Счёт модели осуществлялся в стационарной постановке, таким образом, упругие свойства пород и флюида не учитывались. В результате имитации дренирующего воздействия угольнометановой скважины получена объёмная модель нарушенного поля напоров подземных вод. Основной интерес настоящего исследования представляет распространение дренирующего влияния скважины, поэтому данные моделирования интерпретированы в виде профильной схемы распределения напоров в разрезе угленосных пород, представленной на рисунке 5.

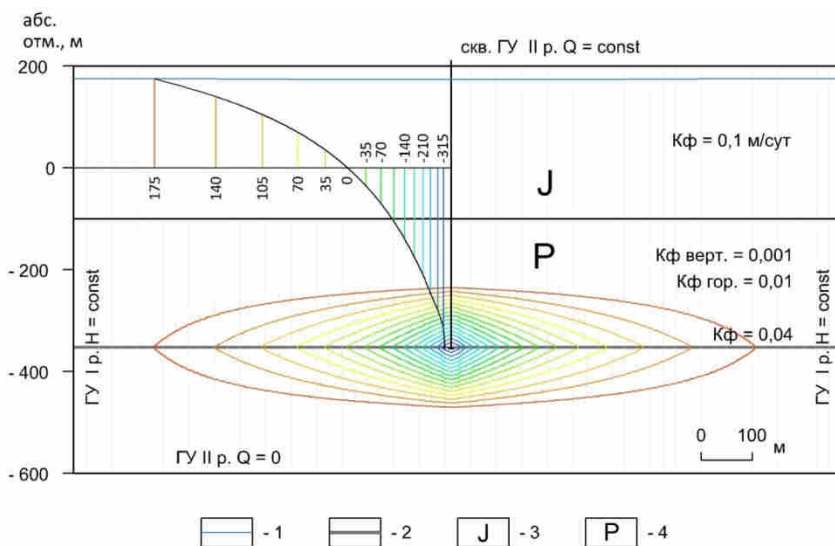


Рис. 5. Модель дренирующего влияния угольнометановой скважины

1 – уровень подземных вод угленосной толщи; 2 – дренируемый угольный пласт; 3 – толща отложений юрского возраста; 4 – угленосная толща пермского возраста.

Результаты тестового моделирования (рис. 5) наглядно продемонстрировали, что влияние точечного водоотбора в толще угленосных пород в гидродинамических условиях зоны замедленного водообмена активно распространяется по наиболее проницаемым пластам углей, но затухает в относительно водоупорных смежных породах. Таким образом, субгоризонтальное чередование литологических разностей с различной проницаемостью обеспечивает локализацию гидродинамического возмущения в пределах угленосной толщи.

Третье положение. *Ресурсы Тутуяского месторождения пресных подземных вод формируются на всей площади водосборного бассейна реки Тутуяс, следовательно, в процессе развёртывания и эксплуатации угольно-метанового промысла на данной площади, необходимо принимать меры по защите природных вод от загрязнения.*

Тутуяское месторождение подземных вод разведано в центральной части Тутуяской мульды и приурочено к долине реки Тутуяс в её нижнем течении (рис.6). Суммарные запасы месторождения составляют 101 000 м³/сут. Водозаборные скважины расположены на нижнетутуяской площади вдоль берега реки.

В пределах нижнетутуяской площади мезозойские отложения обладают аномально высокой проницаемостью, при этом открытый характер их залегания обеспечивает благоприятные условия для восполнения запасов подземных вод. В совокупности с низкой антропогенной нагрузкой на площади водосбора, особенности нижнетутуяской площади способствуют формированию крупных ресурсов пресных вод высокого качества.

В связи с планированием добычи метана из угольных пластов необходимо учитывать уязвимость подземных вод Тутуяского месторождения к воздействию данного промысла, поскольку высокоминерализованные растворы из зоны замедленного водообмена и технологические жидкости при извлечении их на поверхность являются потенциальным источником загрязнения пресных подземных вод. Для определения уязвимости Тутуяского месторождения подземных вод к техногенным воздействиям, проведено исследование условий формирования его ресурсов на гидрогеологической модели.

На первом этапе работы выполнена схематизация гидрогеологических условий зоны активного водообмена в пределах водосборного бассейна реки Тутуяс, результаты которой представлены в таблицах 3 и 4. На основании морфоструктурно-гидрогеологического

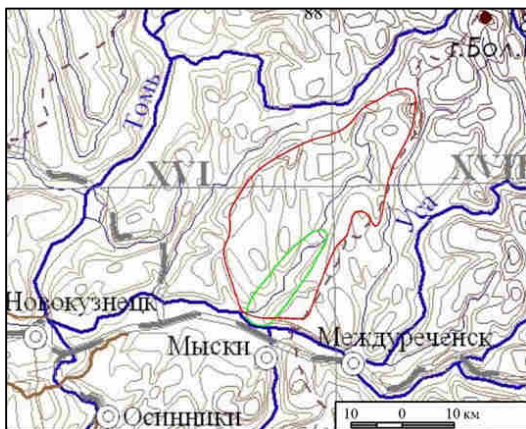


Рис. 6. Схема расположения Тутуяского месторождения подземных вод

Красный контур – границы водосборного бассейна реки Тутуяс; зелёный контур – нижнетутуяская площадь.

анализа составлена схема фильтрационной неоднородности отложений юрского возраста в верхней гидродинамической зоне, которая приведена к кусочно-однородному районированию, представленному на рисунке 7.

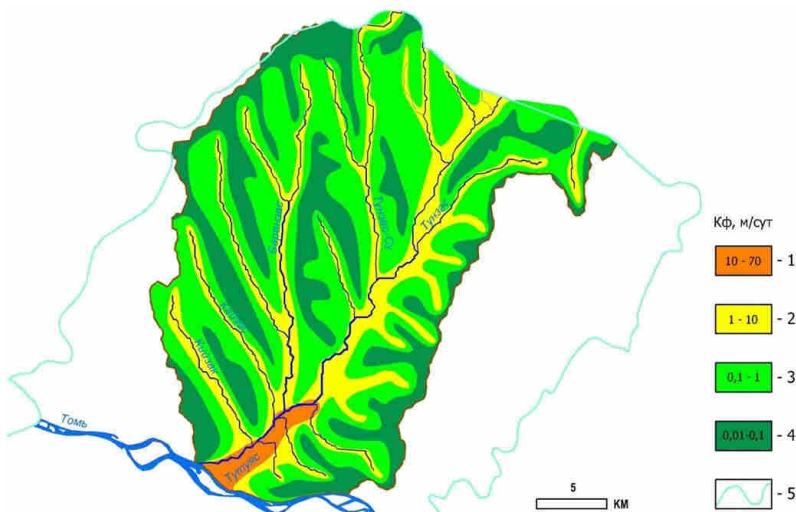


Рис. 7. Фильтрационная неоднородность водоносного комплекса юрских отложений.

1 – нижнетутуясская площадь; 2 – долины основных водотоков; 3 – склоны водоразделов; 4 – водораздельные площади; 5 – контур распространения юрских отложений.

На основании разработанных схем построена гидрогеологическая модель бассейна реки Тутуяс. Площадь бассейна представлена равномерной конечно-разностной сеткой, в ячейках которой заданы значения абсолютной высоты рельефа, коэффициента фильтрации и интенсивности инфильтрационного питания. В ячейках, соответствующих положению поверхностных водотоков, заданы параметры русла: абсолютные высоты уровня воды и дна. Значение коэффициента фильтрации варьируется от 0,01 м/сут для водораздельных площадей до 70 м/сут для нижнетутуясской площади. Интенсивность инфильтрационного питания соответствует средней величине для района исследований и задана во всех ячейках одинаковой: 0,0002 м/сут. Южная граница области фильтрации, проходящая по реке Томь, задана граничными условиями I-го рода с постоянным значением напора. Остальной периметр модели, определяемый водоразделами речных бассейнов, задан границами II-го рода с нулевым расходом. Русло реки Тутуяс и его притоки определяют положение внутренних границ области фильтрации с условиями III-го рода. Нижняя граница модели, соответствующая подошве зоны активного водообмена, задана граничным условием с нулевым расходом, поскольку влияние нижележащих слабопроницаемых коллекторов на фильтрационный поток незначительно.

На следующем этапе выполнена имитация эксплуатации месторождения подземных вод на нижнетутуясской площади. В ячейке модели, имитирующей водозаборную скважину, задано значение дебита водоотбора, соответствующее величине запасов Тутуяского месторождения, т.е. $101\,000\text{ м}^3/\text{сут.}$ Водопримьная часть задана в интервале глубин 100-120 м, что соответствует нижней части зоны активного водообмена. Результаты моделирования представлены на рисунке 8 в виде плановой характеристики зоны влияния.

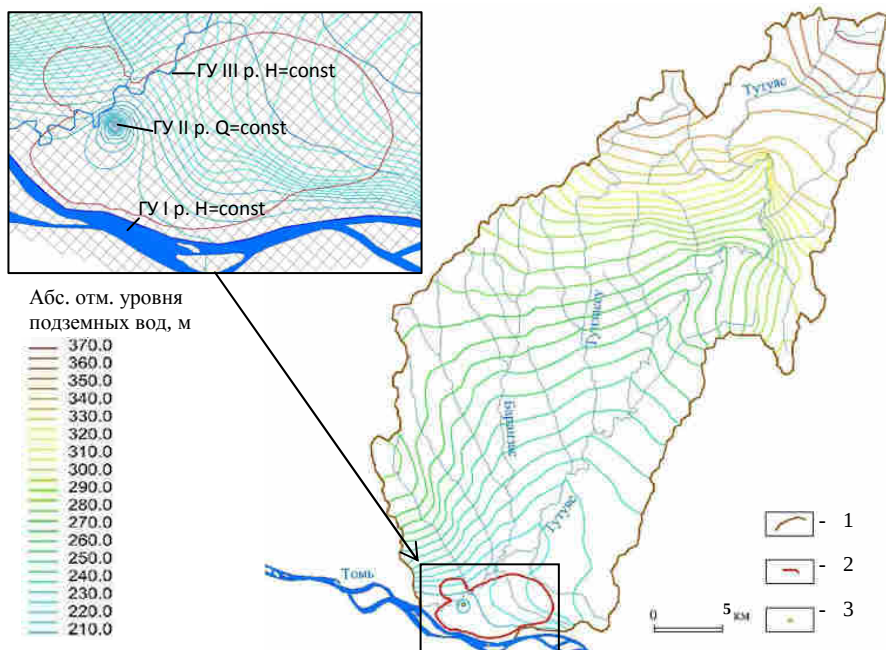


Рис. 8. Имитация эксплуатации Тутуяского МПВ на гидродинамической модели водосборного бассейна реки Тутуяс

1 – граница водосборного бассейна; 2 – зона влияния водозабора; 3 – точка имитации водоотбора.

Модель водоотбора на нижнетутуясской площади свидетельствует о тесной связи подземных вод с поверхностными водотоками. Анализ баланса модели показал, что только 10% водопритока формируется за счёт инфильтрации на площади влияния месторождения, а 90% обеспечивается привлечением речных вод. Следовательно, ресурсы Тутуяского месторождения подземных вод формируются на всей площади водосбора реки Тутуяс, из чего следует необходимость соответствующих природоохранных мер на данной территории. Расположенные на площади Тутуяской мульды месторождения подземных вод Узунцовское, Сиенское, Баланзасское и Глуховское характеризуются схожими условиями формирования ресурсов при меньших площадях водосборных бассейнов, поэтому данное положение правомерно и для них.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате исследования гидрогеодинамических условий объекта решены поставленные задачи по выявлению закономерностей формирования водопритока к угольнометановым скважинам. В ходе работы выполнена геофильтрационная схематизация условий объекта, обоснованы модели воздействий, сформулированы выводы о форме и масштабах влияния планируемой добычи метана на подземные воды:

1. В процессе эксплуатационного водоотбора сформируются концентрические зоны пониженного давления в радиусе до 500 м вокруг угольнометановых скважин. Возмущение будет распространяться по площади угольных пластов и интенсивно затухать в разрезе смежных пород. Идентичный характер развития репрессии правомерно ожидать при обратном закачивании попутных вод, поскольку закономерности развития нарушенного режима фильтрации обусловлены фильтрационной неоднородностью угленосных отложений Кузбасса в зоне замедленного водообмена.

2. Нарушенный режим фильтрации при эксплуатации угольнометановых скважин будет развиваться в пределах толщи угленосных отложений. Закачивание попутных вод в смежные коллекторы будет способствовать локализации возмущения поля напоров подземных вод в зоне замедленного водообмена. Гидродинамическому взаимодействию угольнометановых скважин с вышележащими коллекторами и водными объектами на поверхности препятствует фильтрационное сопротивление слабопроницаемых толщ.

3. Условия формирования ресурсов Тутуяского месторождения подземных вод требуют соблюдения природоохранных мер на всей площади бассейна реки Тутуя, следовательно, захоронение минерализованных попутных вод в зоне замедленного водообмена будет оптимальным способом их утилизации.

В результате проделанной работы определён вероятный характер влияния углеметанового промысла на подземные воды Тутуяской мульды. Подтверждение либо опровержение выявленных закономерностей является одной из задач изысканий для обоснования технологической схемы добычи угольного метана и утилизации попутно извлекаемых подземных вод. Для этого необходимо проведение дополнительных геофильтрационных исследований по оценке вертикальной составляющей водообмена в толще угленосных отложений.

Минимизация нежелательного влияния добычи метана на Тутуяское месторождение подземных вод возможна в результате разработки рациональной схемы дренирования угленосной толщи и утилизации попутных вод, при оптимизации режима эксплуатации скважин на основе численного гидродинамического моделирования.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в изданиях из перечня ВАК или входящих в базы Web of Science и Scopus:

1. Гридасов, А.Г. Гидрогеологические условия Нарыкско-Осташкинской площади Ерунаковского района Кузбасса / Е.В. Домрочева, К.И. Кузеванов, А.Г. Гридасов, Д.А. Сизиков // Известия ТПУ. Инжиниринг георесурсов – 2018. – Т.329. – №9. – С.134-142.

2. Гридасов, А.Г. Схематизация гидрогеологических условий на участках добычи угольного метана в Кузбассе для обоснования прогнозных гидродинамических расчётов / А.Г. Гридасов, К.И. Кузеванов // Вестник КузГТУ – 2017. - №3 С.12-21.

3. Gridasov, A.G. Hydrogeological condition patterns of Kuznetsk Basin coalbed methane fields for estimating hydrodynamic calculations / A.G. Gridasov, K.I. Kuzevanov, A.G. Bogdanova // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, doi:10.1088/1755-1315/43/1/012022, V. 43 - 2016.

Публикации в материалах конференций:

1. Гридасов, А.Г. Прогнозирование влияния добычи метана из угольных пластов на подземные воды Тутуяского района Кузнецкого бассейна // Проблемы геологии и освоения недр: Труды XXII Международного симпозиума им. академика М.А. Усова. - Томск: Изд-во ТПУ, 2018. - С. 480-482.

2. Гридасов, А.Г. Модель формирования водопритока к угольнометановым скважинам в природных условиях юга Кузнецкого бассейна // Проблемы геологии и освоения недр: Труды XXI Международного симпозиума им. академика М.А. Усова. - Томск: Изд-во ТПУ, 2017. - С. 450-452.

3. Гридасов, А.Г. Прогноз влияния добычи угольного метана на Тутуяское месторождение подземных вод в Кузбассе // Экологические проблемы недропользования: Материалы XVI международной молодежной научной конференции. - СПб: Изд-во СПбГУ, 2016. - С. 219-220.

4. Гридасов, А.Г. Схематизация гидродинамических условий на месторождениях угольного метана в Кузнецком бассейне // Проблемы геологии и освоения недр: Труды XX Международного симпозиума им. академика М.А. Усова. Том I. - Томск: Изд-во ТПУ, 2016. - С. 536-538.

5. Гридасов, А.Г. Гидрогеология юга Кузбасса / Е.В. Домрочева, О.Е. Лепокурова, С.Л. Шварцев, Д.А. Сизиков, К.И. Кузеванов, А.Г. Гридасов // Проблемы инженерной геологии, гидрогеологии и геоэкологии урбанизированных территорий: материалы Всероссийской конференции с международным участием, посвященной 85-летию со дня рождения профессора Г.М. Рогова. - Томск: Изд-во ТГАСУ, 2015. - С. 32-36.

6. Гридасов, А.Г. Условия формирования запасов подземных вод Тутуяского месторождения (Южный Кузбасс) // Современные проблемы гидрогеологии, инженерной геологии и гидрогеоэкологии Евразии: Материалы Всероссийской конференции с международным участием. - Томск: Изд-во ТПУ, 2015. - С. 688-692.

7. Гридасов, А.Г. Гидрогеологические условия добычи угольного метана на примере перспективных площадей Южного Кузбасса // Трофимукровские чтения / СО РАН, Институт нефтегазовой геологии и геофизики. - Новосибирск: РИЦ НГУ, 2015. - С.101-104.

8. Гридасов, А.Г. Гидрогеологические условия Подобасско-Тутуяской депрессии в связи с перспективой добычи метана из угольных пластов (Южный Кузбасс) // Проблемы геологии и освоения недр: Труды XIX Международного симпозиума им. академика М.А. Усова. Том I. - Томск: Изд-во ТПУ, 2015. - С. 372-374.

9. Гридасов, А.Г. Изученность гидрогеологических условий добычи угольного метана на Чалтокском участке (Кузбасс) / А.Г. Гридасов, М.С. Воротынцев // Материалы VII Всероссийской научной студенческой конференции им. профессора М.К. Коровина. - Томск: Изд-во ТПУ, 2014. - С.38-40.

10. Гридасов, А.Г. Результаты гидродинамических исследований структурной скважины №СН15 на Чалтокском участке работ по поиску угольного метана (Кузбасс) // Проблемы геологии и освоения недр: Труды XVIII Международного симпозиума им. академика М.А. Усова. Том I. - Томск: Изд-во ТПУ, 2014. - С. 442-444.