

На правах рукописи

Фомин Юрий Владимирович

**НЕЛИНЕЙНЫЕ ЭФФЕКТЫ ВОЛНОВОЙ ИНТРУЗИИ
МОРСКИХ ВОД В БЕРЕГОВЫЕ ПОДЗЕМНЫЕ ГОРИЗОНТЫ
ПРИЛИВНОГО МОРЯ**

Специальность 25.00.27 - Гидрология суши, водные ресурсы, гидрохимия

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва, 2017

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки
Институте океанологии им. П.П. Ширшова Российской академии наук

Научный руководитель:

доктор физико-математических наук, профессор, заведующий лабораторией морских
течений Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Институт
океанологии им. П.П. Ширшова РАН»
Жмур Владимир Владимирович

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук, заведующая Отделом нелинейных геофизических
процессов Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Федеральный
исследовательский центр Институт прикладной физики РАН»
Троицкая Юлия Игоревна

кандидат физико-математических наук, доцент кафедры физики Земли физического
факультета Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения
высшего профессионального образования «Московский государственный университет
имени М.В. Ломоносова»
Исаева Анна Вячеславовна

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт водных проблем
Севера» Карельского научного центра Российской академии наук (г. Петрозаводск)

Защита состоится «12» октября 2017 года в 14 ч. 00 мин. на заседании Диссертационного
совета Д.002.040.01 при ИВП РАН по адресу: 119333, Москва, ул. Губкина, д. 3, к. 416

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ИВП РАН. Отзывы на
автореферат (в двух экземплярах, заверенные печатью) просим направлять по адресу:
119333, Москва, ул. Губкина, д. 3 Институт водных проблем РАН, ученому секретарю дис-
сертационного совета Д.002.040.01.

Автореферат разослан « » 2017 года.

Ученый секретарь Диссертационного совета,
д. г.-м. наук, профессор



Р.Г. Джамалов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Прибрежная зона моря является пограничной областью между морскими водами и сушей и обладает отличительными свойствами гидродинамических процессов протекающих в ней. Через подводную часть границы раздела сред морская вода фильтруется в водоносные горизонты сухопутной части берега и может распространяться на значительные расстояния от береговой линии, перемешиваясь с пресной подземной водой. В условиях вечной мерзлоты процессы фильтрации воды в береговые примыкания могут оказаться критическими для строительства нефтегазовых трубопроводов [Zhmur, Marchenko, Fomin 2014].

Современное производство, как и население Земли, растёт, поглощая все большее количество пресной воды. Водоёмы истощаются и, кроме того, загрязняются, поэтому всё более остро встает вопрос об альтернативных источниках пресной воды. На данный момент, согласно различным источникам, например, [Barlow 2003, Bear 1999] использование грунтовых вод составляет от 25% до 33% от общего объёма потребления пресной воды в мире. Основными проблемами, связанными с истощением запасов пресной воды в грунте, учитывая то, что около 70% населения Земли живет в прибрежных зонах, являются интенсивная добыча пресной воды и интрузия морской воды в водоносные пласты. В некоторых источниках, например в [Werner, Simmons 2009], проблема фильтрации морской воды в пресноводный пласт рассматривается как глобальная проблема, которая может привести к изменениям климата. В этой связи изучение механизмов интрузии или фильтрации морской воды в водоносный горизонт берега является задачей крайне острой, чрезвычайно важной и актуальной.

Формирование уровня грунтовой воды в водоносном горизонте прибрежной зоны моря происходит следующим образом. При вариациях уровня воды в море возникает горизонтальная компонента градиента давления, которая приводит к фильтрации морской воды из моря в проницаемый грунт и обратно. Однако из-за того, что просочившаяся вода не успевает разгрузиться обратно в море за период колебания уровня воды (прилива), возникает подъем среднего уровня грунтовой воды по сравнению со средним уровнем воды в море. Это - так называемый, эффект подъёма среднего уровня грунтовой воды, «pumping-effect» или эффект накачки [В.Н. Зырянов, М.Г. Хубларян, 2006]. Далее будем полагать, что каждое из приведенных названий эффекта равноправно.

Описанный процесс формирования уровня грунтовых вод в прибрежной зоне можно проиллюстрировать на примере плоского прямоугольного берега. Воздействие приливных волн на уровень грунтовой воды для данного случая рассматривался в работах В.Н. Зырянова [Зырянов 2006, 2009, 2013] или М.Г. Хубларяна [Хубларян 2008, 2009].

На рисунке 1 пунктирной линией изображен средний уровень воды в море. Если бы отсутствовали приливные волны, тогда средний уровень в море был бы на одном уровне со средним уровнем воды в водоносном горизонте прибрежной зоны водоёма. Прилив повышает уровень воды в море, тем самым увеличивая поверхность смачивания берега. На рисунке

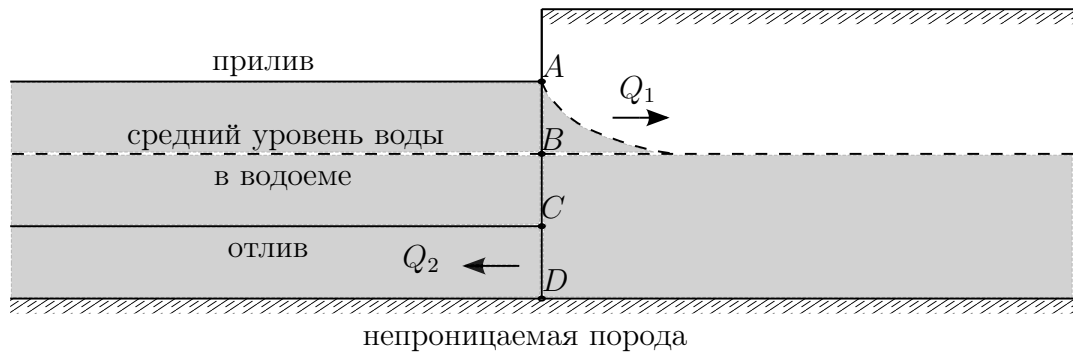


Рис. 1: Принципиальная схема процесса

видно, что отрезок AD больше, чем отрезок BD . Увеличение площади смачивания приводит к увеличению потока воды в водоносный горизонт Q_1 . При отливе поверхность смачивания уменьшается, отрезок CD меньше AD , поэтому отток жидкости из водоносного пласта обратно в водоем Q_2 меньше, чем Q_1 , т.е. $Q_1 > Q_2$. Это неравенство означает накопление дополнительного объёма жидкости в водоносном горизонте, что приводит к повышению среднего уровня грунтовой воды. Это «несоответствие» средних уровней в море и в грунте и создаёт эффект накачки или пампинг-эффект.

Данному эффекту посвящено большое количество исследований. Например, Гедеон Даган (Gedeon Dagan) в своих работах [Dagan 1964, 1966, 1967] изучает поведение свободной поверхности несжимаемой однородной жидкости в недеформируемой однородной изотропной пористой среде. Исследование сводится к поиску потенциала скорости ϕ , который рассматривается как гармоническая функция, удовлетворяющая нелинейному уравнению
$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + \left(\frac{\partial \phi}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial \phi}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial \phi}{\partial z}\right)^2 + \frac{\partial \phi}{\partial z} = 0.$$

В работе Парланга (Parlange) с соавторами [Parlange, Stagnitti, Starr, Braddock 1984] рассматривается течение в пористой среде с жидкой свободной поверхностью, полагая, что величина капиллярной каймы пренебрежимо мала в сравнении с любым другим линейным размером. Используя модель, которую предложил Даган в своих работах, авторы [Parlange, Stagnitti, Starr, Braddock 1984] сравнивают результаты с численными и лабораторными экспериментами, приходя к выводу, что приведённое решение нелинейного уравнения Буссинеска остаётся верными даже в случае, когда амплитуда колебаний свободной поверхности сравнима со средним уровнем жидкости.

В.Н. Зырянов в своих работах [Зырянов 2013, Зырянов 2006] рассматривает задачу воздействия периодического колебания на уровень свободной поверхности в грунте, как нелинейный процесс, который описывается нелинейным параболическим уравнением типа теплопроводности, в котором коэффициенты среды являются функцией искомой величины $\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(F(T) \frac{\partial T}{\partial x} \right)$. В этих работах отмечается, что существует большое количество работ, посвященных поиску автомодельных решений данного уравнения, в частности [Баренблатт 1952]. Однако поставленная в работах проблема исследуется как краевая задача для уравнения типа теплопроводности без начальных условий. Кроме того, получено аналитическое

решение, описывающее подъем среднего уровня грунтовой воды для ограниченного водоносного горизонта при условии, что отношение амплитуды возмущающего колебания воды к её среднему уровню мало $\epsilon = \frac{A}{T_0} \ll 1$.

Завершая обзор работ по тематике диссертации, следует отметить, что существующие математические модели, описывающие поведение свободной поверхности грунтовой воды в прибрежной зоне моря в зависимости от приливных вариаций, основываются на рассмотрении уравнения Буссинеска при различных граничных условиях и описывают два случая. Первый случай отвесного (вертикального) берега и второй - плоский наклонный берег.

Цель работы. Целью данной работы является изучение нелинейных эффектов волновой интрузии морских вод в береговые подземные горизонты приливного моря.

В работе ставились следующие задачи:

1. Развить гидродинамическую теорию нелинейных колебаний уровня грунтовых вод в изотропной проницаемой береговой среде с заданными фильтрационными свойствами и произвольным профилем берегового склона в пренебрежении капиллярностью;
2. Оценить волновые фильтрационные характеристики реальных грунтов по данным экспериментального полигона на побережье о. Шпицберген;
3. Выявить основные факторы в процессе нелинейной волновой интрузии вод и оценить их вклад в подъём среднего уровня грунтовой воды в водоносном горизонте прибрежной зоны приливного моря;
4. Провести лабораторное моделирование процесса волновой интрузии вод с целью экспериментальной проверки полученных в теории гидродинамических эффектов.

Научная новизна. Приведенная в диссертации математическая модель описывает поведение свободной поверхности грунтовой воды в прибрежной зоне приливного моря в двух случаях: бесконечный водоносный горизонт и конечный водоносный горизонт. При анализе решения модели для бесконечного водоносного горизонта выявлено два фактора, которые влияют на подъём среднего уровня грунтовой воды. Первым фактором является нелинейность процесса фильтрации морской воды в водоносный слой и разгрузки обратно (данное явление описано в научной литературе)-«нелинейный пампинг-эффект», вторым фактором влияния оказывается береговой профиль - «профильный пампинг-эффект», который также приводит к подъёму среднего уровня грунтовой воды. Этот фактор является новым и впервые описывается в данной работе.

В предложенной модели для конечного водоносного слоя приводится полное решение, которое показывает, что стационарная часть также зависит от профильного пампинг-эффекта.

В работе приводятся экспериментальные данные измерений порового давления с исследовательского полигона на о. Шпицберген (Норвегия). Исходя из этих данных, приводятся оценки фильтрационных свойств грунта под влиянием приливных колебаний уровня. Кроме того, для исследовательского полигона приводится оценка ширины пограничного слоя в

грунте, дальше которой можно использовать описанную в работе модель для бесконечного водоносного слоя.

Результаты математической модели, на которой строится работа, проверены в лабораторном эксперименте. Показано существование эффекта накачки и, главное, существование пампинг-эффекта, связанного с профилем берега.

Материалы и методы исследований. Для оценки фильтрационных параметров в диссертации использовались измерения в натурном эксперименте, который проводился на исследовательском полигоне на о. Шпицберген (Норвегия) в период с 02 февраля 2013 по 02 марта 2013 года. Для моделирования исследуемого эффекта на примере других изотропных грунтов использовались фильтрационные параметры, которые находятся в открытом доступе. Все необходимые математические расчеты и построения графиков, а также обработка экспериментальных данных (натурных и лабораторных), осуществлялись в среде Matlab и Mathematica.

Практическая значимость. В настоящий момент существующие математические модели описывают отклик уровня грунтовой воды прибрежной зоны на приливные воздействия либо для вертикального отвесного берега, либо для наклонного плоского берега.

В диссертации предлагается модель, которая применима для анализа поведения уровня грунтовой воды для произвольного профиля берега, что существенно расширяет область её применения.

Помимо бесконечного водоносного слоя в работе исследован эффект подъёма среднего уровня для ограниченного слоя, что соответствует случаю, когда непроницаемые породы на некотором удалении от берега выходят на поверхность.

Полученные результаты могут быть использованы на практике для оценки величины поднятия среднего уровня грунтовой воды в прибрежных зонах приливных морей.

На защиту выносятся. На защиту диссертации выносятся:

1. Математическая модель колебания уровня грунтовой воды в изотропной проницаемой среде с заданными фильтрационными параметрами при произвольном профиле береговой линии в случае бесконечного водоносного слоя при отсутствии капиллярности;
2. Новый гидродинамический эффект, влияющий на повышение среднего уровня грунтовой воды в прибрежной зоне - профильный пампинг-эффект;
3. Математическая модель колебания уровня грунтовой воды в изотропной проницаемой среде с заданными фильтрационными параметрами для конечного водоносного слоя в пренебрежении эффектом капиллярности;

Защищаемые положения. На защиту выносятся следующие положения:

- Подъём среднего уровня грунтовой воды в изотропной среде прибрежной зоны приливного моря в пренебрежении капиллярностью, обусловлен двумя факторами: нелинейностью процесса фильтрации и профилем береговой зоны;
- Пампинг-эффект в общем случае наклонного берега (нелинейная волновая накачка уровня грунтовых вод) складывается из базового и профильного пампинг-эффектов;
- Уменьшение угла уклона берега приводит к увеличению относительного вклада профильного пампинг-эффекта в общую накачку уровня. Увеличение частоты колебания уровня моря также ведет к увеличению относительного вклада профильного пампинг-эффекта;
- Волновые колебания уровня грунтовых вод практически затухают на расстоянии четырех длин волн, поэтому для случая ограниченного водоносного слоя при его протяженности более $4L$ применима модель с бесконечным водоносным слоем;
- Лабораторным моделированием экспериментально подтверждено существование пампинг-эффекта в динамике грунтовых вод. Кроме того, подтвержден основной результат развитой в диссертации теории – наличие профильного пампинг-эффекта.

Апробация работы. Основные результаты, изложенные в диссертации, докладывались на Международной школе-семинаре «3-rd International seminar «Dynamics of the coastal zone in the non-tidal seas» 30 June - 4 July 2014» (Геленджик, Россия, 2014), на 57-й научной конференции МФТИ с международным участием, посвященной 120 - летию со дня рождения П.Л. Капицы, Всероссийской молодежной научной конференции с международным участием «Актуальные проблемы фундаментальных и прикладных наук в современном информационном обществе» (Москва, 2014), на 58 -й научной конференции МФТИ (Москва, 2015) и на 59 -й научной конференции МФТИ с международным участием (Москва, 2016).

Результаты данной работы докладывались автором на научном семинаре физического сектора Института океанологии им. П.П. Ширшова под руководством члена-корреспондента РАН П.О.Завьялова.

Личный вклад автора. Автор работы участвовал в постановке натурального эксперимента, который проводился в университетском центре на Свальбарде (Unis, Норвегия) на экспериментальном полигоне на о. Шпицберген (Норвегия) в рамках международного проекта SMIDA 2012-2015 (Safety of Maritime operation and sustainable Industrial Development in the Arctic). Принимал участие в лабораторном эксперименте по моделированию эффекта накачки, который проводился в лаборатории гидродинамики ИВП РАН. При выполнении диссертации непосредственно участвовал в развитии теории, осуществлял обработку полученных экспериментальных данных (натурных и лабораторных), разработал методику оценки фильтрационных параметров среды, написал программный код в среде Matlab, который позво-

ляет визуализировать полученные результаты, выполнял необходимые вычисления в среде Mathematica и принимал активное участие в обсуждении и интерпретации результатов.

Благодарности. Автор выражает глубокую признательность и благодарность своему научному руководителю, д.ф.-м.н., профессору Жмуру Владимиру Владимировичу за постановку задачи и неоценимую поддержку в ходе подготовки статей и диссертации, за исключительный оптимизм в негативных ситуациях, складывавшихся иногда в ходе выполнения работы.

Автор также благодарит руководителя проекта SMIDA, д.ф.-м.н., профессора Марченко Алексея Валерьевича за предоставленную возможность участия в натурном эксперименте и конструктивные замечания в ходе выполнения работ и заведующего лабораторией гидродинамики ИВП РАН, д.ф.-м.н., профессора Зырянова Валерия Николаевича за предоставленную возможность участия в лабораторном эксперименте, обсуждение результатов диссертации и организационную поддержку.

Отдельно автор благодарит главного научного сотрудника лаборатории гидродинамики ИВП РАН, д.ф.-м.н. Михаила Абрамовича Соколовского за и замечания по тексту диссертации, особенно, касающихся пунктуации.

Исследования, изложенные в данной работе, проводились при поддержке гранта РФФИ №14-37-00053 под руководством д.ф.-м.н. Иванова В.В.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырёх глав, выводов и списка использованных источников, включающего в себя 80 источников из них 41 на иностранных языках. Полный объём диссертации составляет 96 страниц, включая 18 рисунков и 5 таблицы. Каждая глава, для удобства, снабжена отдельными выводами.

Во **введении** приводится описание эффекта подъема среднего уровня грунтовой воды, которому посвящается исследование, изложенное в диссертации, дается обзор литературы, близкой к теме данной работы, кратко излагаются основные результаты работ.

Первая глава, состоящая из двух параграфов, описывает натурный эксперимент, который проводился на о. Шпицберген (Норвегия). В **параграфе 1.1** приводится описание натурального эксперимента, устройство экспериментального полигона и некоторые параметры исследовательского полигона, необходимые для дальнейших рассуждений. В **параграфе 1.2** приводятся экспериментальные данные и методика их обработки. В качестве альтернативных методов обработки данных выбраны методы скользящего среднего и полиномиальные методы регрессии. Приводятся результаты косвенных измерений, которые во второй главе используются для установления фильтрационных свойств исследовательского полигона.

Вторая глава работы полностью посвящается изложению используемой математической модели для полубесконечного водоносного горизонта и состоит из десяти параграфов. В первом параграфе приводится вывод определяющих уравнений, в частности, вывод одномерного нелинейного уравнения Буссинеска и все необходимые допущения модели, основываясь на

работах [Полубаринова-Кочина 1977, Самарский, Михайлов 2001]. Исследуемое уравнение записывается следующим образом:

$$\frac{\partial h}{\partial t} = \varkappa \frac{\partial}{\partial x} \left((H + h) \frac{\partial h}{\partial x} \right), \quad \varkappa = \frac{C}{m}, \quad (1)$$

где m - пористость грунта, безразмерная величина, C - коэффициент фильтрации имеющий размерность скорости $\left[\frac{M}{C}\right]$, H - глубина залегания непроницаемого для воды основания [м], отсчитанная от среднего уровня моря. Схема процесса фильтрации морской воды в грунт прибрежной зоны и все обозначения изображены на рисунке 2.

Для вывода используются уравнение Дарси записанное через пьезометрический напор жидкости и уравнение баланса массы для малого участка грунта.

Выписываются граничные условия: условие затухания возмущения на бесконечности ($x \rightarrow +\infty$):

$$\frac{\partial h}{\partial x}_{x \rightarrow +\infty} = 0 \quad (2)$$

и условие на подвижном границе (урез воды движет по плоскому наклонному берегу), данный случай рассматривался в работах [Parlange 1984, Li, Parlange 1997, Жмур, Фомин, Марченко 2014, Фомин 2015, Фомин 2016]:

$$h(x(t), t) = a \cdot \cos \omega t \quad x(t) = a \cdot ctg \alpha \cdot \cos \omega t \quad 0^\circ < \alpha \leq 90^\circ. \quad (3)$$

На основе [Тихонов, Самарский 2004] приводится стандартное решение линейного уравнения типа теплопроводности в полубесконечном стержне, которое необходимо для дальнейшего исследования. Формулируется математическая постановка, полученная независимо от других работ, для случая бесконечного водоносного горизонта с плоским наклонным берегом. В **параграфе 2.2**, основываясь на обработанных экспериментальных данных из первой главы, приводится методика вычислений необходимого фильтрационного параметра грунта \varkappa , а именно отношения коэффициента фильтрации к пористости грунта. Дана оценка параметра:

$$\varkappa = 34 \cdot 10^{-3} \frac{M}{C}.$$

В **параграфе 2.3** данной главы формулируется постановка задачи для случая произвольного профиля дна для бесконечного водоносного слоя и приводится преобразование координат, которое использовалось в работе [Jeng, Barry, Li, Parlange 2005] для того, чтобы перейти в подвижную систему координат. Итоговая система уравнений, получается из уравнений (1)-(3):

$$\frac{\partial h}{\partial t} - x(t) \frac{\partial h}{\partial \tilde{x}} = \varkappa \frac{\partial}{\partial \tilde{x}} \left((H + h) \frac{\partial h}{\partial \tilde{x}} \right). \quad (4)$$

И граничные условия в данном случае переписываются следующим образом:

$$h(0, t) = a \cdot \cos \omega t; \quad \frac{\partial h}{\partial \tilde{x}}_{\tilde{x} \rightarrow +\infty} = 0. \quad (5)$$

В качестве метода решения системы уравнений (4)-(5) применяется метод безразмерных величин. Преобразование уравнений (4)-(5) и полученные безразмерные параметры описываются в **параграфе 2.4**.

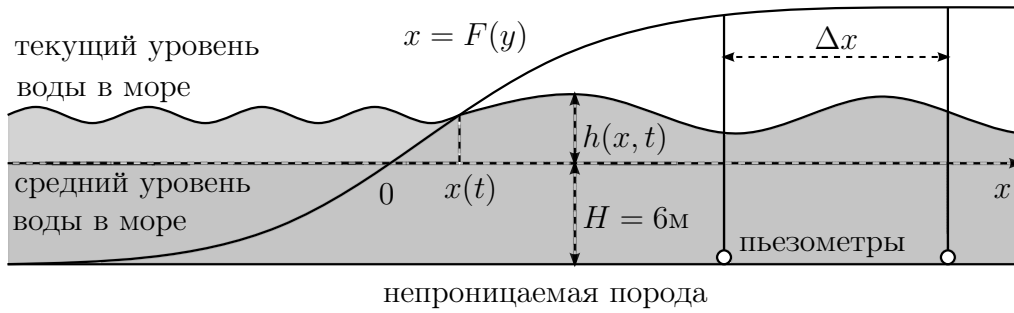


Рис. 2: Схема фильтрации морской воды в грунт прибрежной зоны. На рисунке $F(y)$ - профиль дна, $x(t)$ - горизонтальная координата движения уреза воды, Δx - расстояние между датчиками, $h(x, t)$ - уровень подземной воды, H - расстояние от среднего уровня воды до непроницаемого основания

Параграфы 2.5 - 2.8 посвящены поиску решения сформулированной математической модели. Приводится безразмерный параметр ε , который есть отношение амплитуды колебания к величине среднего уровня воды в водоносном горизонте (аналогично приведенным работам [Li, Barry, Parlange 2005, Parlange 1984, Тео, Jeng, Barry 2003]). Искомое решение h , т.е. функция свободной поверхности раскладывается в ряд по параметру ε , который в общем случае может оказаться любым, однако для конкретного случая исследовательского полигона на о. Шпицберген является малым.

Основой данных параграфов является анализ стационарной части решения уравнения (4) при граничных условиях (5), которая связана с подъёмом среднего уровня грунтовой воды в прибрежной зоне моря. Решение можно разделить на две составляющие, а именно «базовую составляющую» h_1^b (эта часть связана с нелинейностью процесса) и «профильную составляющую» h_1^p (эта часть зависит от профиля берега). В безразмерном виде стационарная часть решения выглядит следующим образом:

$$\frac{h_1^s}{\frac{a^2}{H}} = \frac{Hkm_1}{2} \left(1 + \frac{3}{4}a^2 \frac{m_3}{m_1} + \frac{5}{8}a^4 \frac{m_5}{m_1} \dots\right) (1 - e^{-k\tilde{x}} (\sin(k\tilde{x}) + \cos(k\tilde{x}))) + \frac{1}{4}(1 - e^{-2k\tilde{x}}). \quad (6)$$

Соответственно, базовая составляющая представлена членом:

$$\frac{h_1^b}{\frac{a^2}{H}} = \frac{1}{4}(1 - e^{-2k\tilde{x}}),$$

профильная составляющая представлена членом:

$$\frac{h_1^p}{\frac{a^2}{H}} = \frac{Hkm_1}{2} \left(1 + \frac{3}{4}a^2 \frac{m_3}{m_1} + \frac{5}{8}a^4 \frac{m_5}{m_1} \dots\right) (1 - e^{-k\tilde{x}} (\sin(k\tilde{x}) + \cos(k\tilde{x}))).$$

На ряде примеров демонстрируется вклад каждой из составляющих. Например, для профиля берега в виде кубической параболы:

$$y = (px)^{\frac{1}{3}},$$

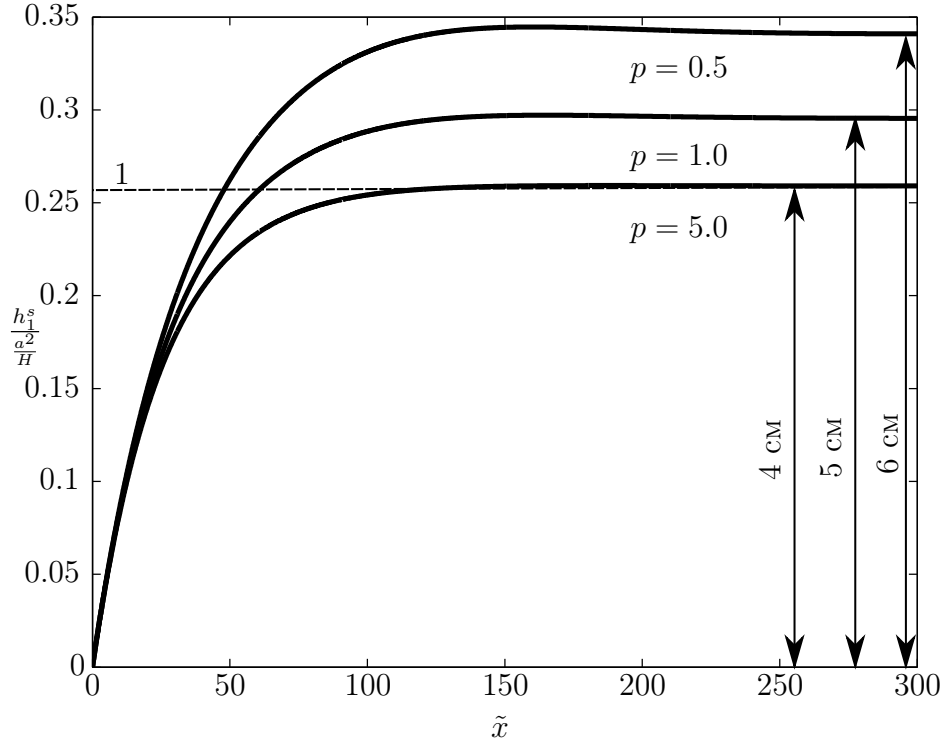


Рис. 3: Зависимость безразмерной стационарной части эффекта накачки от расстояния при различных профилях береговой зоны. В качестве варьируемого профиля, выбран профиль $y = (px)^{\frac{1}{3}}$ при $p = 0.5, 1.0, 5.0$. Линия 1 обозначает вклад базовой компоненты пампинг-эффекта.

где параметр p определяет пологость (кривизну) профиля берега. Чем меньше p , тем более пологий профиль берега. Суммарный пампинг-эффект для данного случая можно получить из (6):

$$\frac{h_1^s}{\frac{a^2}{H}} = \frac{3}{8} a^2 \frac{Hk}{p} (1 - e^{-k\tilde{x}} (\sin(k\tilde{x}) + \cos(k\tilde{x}))) + \frac{1}{4} (1 - e^{-2k\tilde{x}}),$$

а отсюда следует, что

$$\frac{h_1^s(\infty)}{\frac{a^2}{H}} = \frac{3}{8} a^2 \frac{Hk}{p} + \frac{1}{4}.$$

На рисунке 3 представлена зависимость пампинг-эффекта в безразмерном виде от координаты, при вариации пологости профиля берега $y = (px)^{\frac{1}{3}}$ (все остальные характеристики фиксированы).

В параграфе 2.8 подробно описывается волновая часть решения (4)-(5):

$$h_1^w = -\frac{a^2}{2H} e^{-2k\tilde{x}} \cos(2\omega t - 2k\tilde{x}) - \frac{a^2 k m_1}{2} (e^{-k\tilde{x}} \cos(2\omega t - k\tilde{x}) - e^{-k\tilde{x}} \sin(2\omega t - k\tilde{x})) + \frac{1}{2} \frac{a}{H} e^{-\sqrt{x}k\tilde{x}} ((1 + Hk m_1) \cos(2\omega t - \sqrt{k}\tilde{x}) - Hk m_1 \sin(2\omega t - \sqrt{2k}\tilde{x})). \quad (7)$$

Два последних параграфа данной главы описывают условия применимости описанной модели и решений. В частности, параграф 2.9 посвящается критическому значению угла наклона плоского наклонного берега, при котором возможно пользоваться результатами

модели. Критическое значение:

$$\alpha_{cr} = 2^\circ.$$

В параграфе 2.10 приводится ограничение на период волн, которые допускает описываемая модель:

$$T \gg 10 \text{ мин.}$$

Третья глава состоит из трёх параграфов. В главе приводится математическая модель, которая описывает поведение свободной поверхности грунтовой воды прибрежной зоны в случае ограниченного водоносного слоя:

$$\frac{\partial h}{\partial t} = \varkappa \frac{\partial}{\partial x} \left\{ (H + h) \frac{\partial h}{\partial x} \right\}, \quad x(t) \leq x \leq L_0, \quad \varkappa = \frac{C}{m}, \quad (8)$$

$$\frac{\partial h}{\partial x} \Big|_{x=L_0} = 0; \quad h(x(t), t) = h_w(t), \quad x(t) = h_w(t) \operatorname{ctg} \alpha. \quad (9)$$

Приводятся необходимые преобразования координат, существенно отличающиеся от преобразований из второй главы. Действие преобразования на систему (8)-(9) таково, что вводится новая безразмерная величина. Дальнейшая методика поиска функции свободной поверхности аналогична той, которая описана во второй главе. Приводится стационарная компонента общего решения и сравнение итогового эффекта подъема среднего уровня для различных удалений дальней стенки ограниченного водоносного слоя (L_0).

Стационарная часть, которая обуславливает подъём среднего уровня грунтовой воды в этом случае, записывается в виде выражения:

$$h_1^s = CX + S - \frac{a^2}{4H} I_1 - \frac{a^2 \operatorname{ctg} \alpha}{2L} \left(1 - \frac{X}{L_0}\right) I_2,$$

где

$$I_1(X) = \bar{A}^2 e^{-2kX} + \bar{B}^2 e^{2kX} + \bar{M}^2 (e^{-2kX} + e^{2kX}) + 2(\bar{A}\bar{B} - \bar{M}^2) \cos 2kX - 2\bar{M} \sin 2kX,$$

$$I_2(X) = (\bar{A} + \bar{M}) e^{-kX} \cos kX + (\bar{M} - \bar{B}) e^{kX} \cos kX + (\bar{A} - \bar{M}) e^{-kX} \sin kX + \\ + (\bar{B} + \bar{M}) e^{kX} \sin kX,$$

$$C = \frac{a^2}{2H} (\bar{A}^2 e^{-2kL_0} + \bar{B}^2 e^{2kL_0} + \bar{M}^2 (e^{-2kL_0} + e^{2kL_0}) + 2(\bar{A}\bar{B} - \bar{M}^2) \cos 2kL_0 - 2\bar{M} \sin 2kL_0) k -$$

$$- \frac{a^2}{2L_0} ((\bar{A} + \bar{M}) e^{-kL_0} \cos kL_0 + (\bar{M} - \bar{B}) e^{kL_0} \cos kL_0 + (\bar{A} - \bar{M}) e^{-kL_0} \sin kL_0 +$$

$$+ (\bar{B} + \bar{M}) e^{kL_0} \sin kL_0) k$$

$$S = \frac{a^2}{4H} + \frac{a^2 \operatorname{ctg} \alpha}{2L} (\bar{A} - \bar{B} + 2\bar{M}).$$

На рисунке 4 представлена зависимость безразмерного пампинг-эффекта $\frac{h_1^s}{\frac{a^2}{2H}}$ от безразмерной координаты ξ для различной ширины водоносного слоя (L_0).

Четвёртая глава состоит из двух параграфов и в ней представлены результаты лабораторного моделирования эффекта накачки. В параграфе 4.1 описывается лабораторная

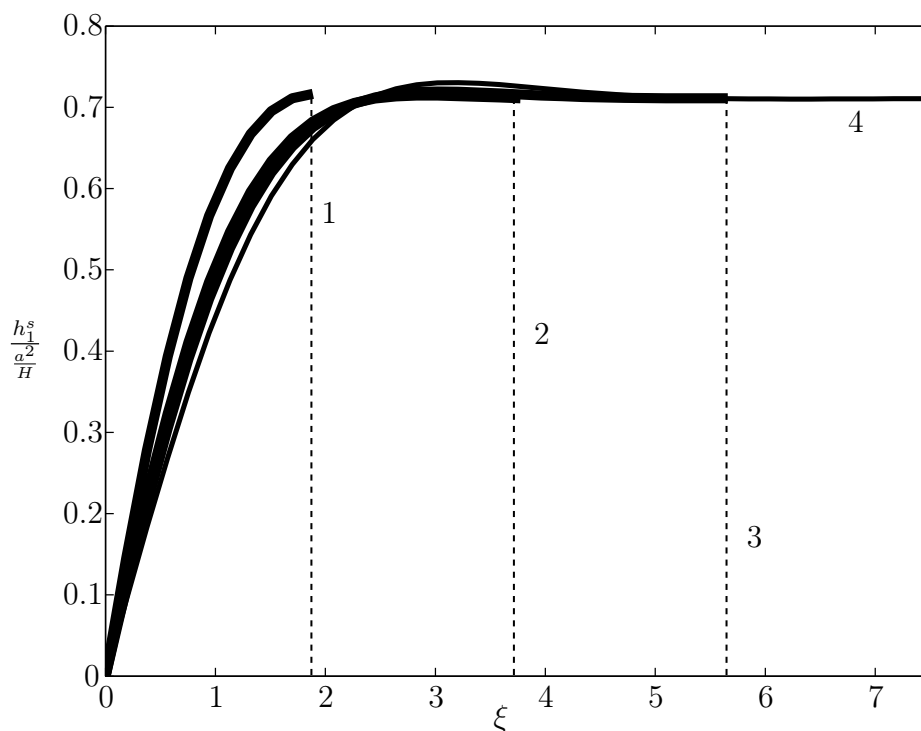


Рис. 4: Значение безразмерного пампинг-эффекта при различной ширине водоносного слоя. На рисунке цифра 1 соответствует пампинг-эффекту для ширины водоносного слоя $L_0 = 100$ м , 2 - $L_0 = 200$ м, 3 - $L_0 = 300$ м, 4 - $L_0 = 400$ м

установка и её основные характеристики. Кроме того, приводятся результаты эксперимента по определению пористости лабораторного материала, который моделировал грунт прибрежной зоны (в качестве модельного материала были выбраны полиэтиленовые гранулы диаметром ~ 3.7 мм). Средняя пористость m лабораторного материала оценивалась величиной:

$$m = 0.28.$$

Приводятся для сравнения два способа оценки коэффициента проницаемости - на основе теории фиктивных грунтов Козени-Кармана и через декремент затухания волны в грунте. В расчётах использовалась оценка коэффициента фильтрации, полученная через декремент затухания:

$$C = 96 \frac{\text{см}}{\text{с}}.$$

В параграфе 4.2 приводятся экспериментальные данные для прямоугольного (отвесного) профиля берега и для наклонного берега (угол наклона профиля берега составлял $\alpha \approx 45^\circ$), которые сравнивались с теоретическими выводами. Основной результат экспериментов представлен на рисунке 5. Пунктирными линиями показан уровень воды в модельном материале, который был зафиксирован в соответствующей точке измерения. Точка на линии 1.1 соответствует измерению в середине насыпи. На линиях 1.2, 2.1 точки соответствуют измерениям в конце кюветы. На рисунке кривые 1 и 2 - это теоретические кривые подъёма

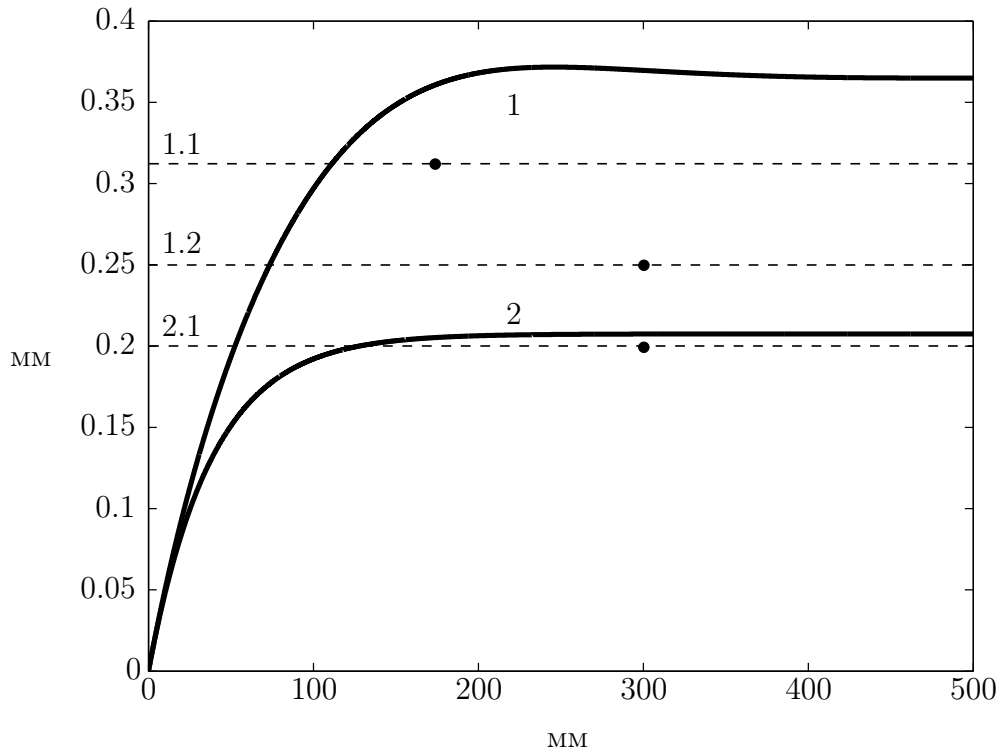


Рис. 5: Результаты лабораторного эксперимента

среднего уровня воды в модельном грунте, построенные по формуле (6). Соответственно, кривая 1 построена для прямого берега (в (6) $m_1 = 0$), кривая 2 - для наклонного берега ($\alpha \approx 45^\circ$, в (6) $m_1 = 1$).

Как видно из рисунка 5, эксперимент подтверждает теоретические результаты. Для отвесного берега уровень, зафиксированный в соответствующей точке измерения, очень близко лежит от теоретической кривой, для наклонного берега соответствие несколько хуже. Это, по-видимому, связано с неточностью определения коэффициента фильтрации и угла наклона берега в зоне наката волны. Таким образом, можно считать, что лабораторное моделирование подтверждает существование эффекта накачки в прибрежной зоне, а главное, существование профильной составляющей пампинг-эффекта.

В **выводах** сформулированы основные результаты диссертации:

Эффект подъема уровня грунтовой воды в изотропной среде прибрежной зоны приливного моря при отсутствии капиллярного эффекта является производной двух факторов. Первым фактором является нелинейность процесса фильтрации морской воды в водоносный горизонт и этот эффект известен и описан. Вторым же фактором является «профильная накачка», т.е. подъем уровня воды связанный с профилем береговой зоны. Открытие и описание этого фактора является одним из основных результатов проделанной работы.

Таким образом, установлено, что на подъем среднего уровня грунтовой воды влияют «базовый пампинг-эффект» и «профильный пампинг-эффект». Показано, что в ряде случаев обе компоненты одинаковых порядков.

На основе развитой в работе гидродинамической теории нелинейных колебаний уровня грунтовых вод в изотропной проницаемой береговой среде с заданными фильтрационными свойствами и произвольным профилем берегового склона показано, что, как и в случае плоского наклонного берега, суммарный пампинг-эффект формируют базовый, связанный с нелинейностью процесса и профильный, связанный с профилем дна. В случае аппроксимации профиля дна некоторой нелинейной функцией приведена зависимость профильного пампинга от коэффициентов разложения функции.

Показано, что общая накачка на исследовательском полигоне на о. Шпицберген происходит, в основном, из-за профильного пампинг-эффекта.

Показано, что для условий исследовательского полигона уменьшение угла уклона α приводит к тому, что относительный вклад профильного пампинг-эффекта будет увеличиваться.

Увеличение частоты колебания уровня моря при сохранении фильтрационных свойств грунта и угла наклона дна α приводит к тому, что вклад профильного пампинг-эффекта увеличивается.

Приведены ограничения на типы волн, которые рассматриваются в рамках описываемой математической модели для исследовательского полигона на о. Шпицберген. Получено, что указанными методами можно исследовать влияние волн, период которых превышает 10 минут.

Для случая конечной ширины водоносного слоя, показано, что и в этом случае суммарный пампинг - эффект формируют базовая и профильная составляющие.

Установлено, что для конкретных условий исследовательского полигона на о. Шпицберген ширину водоносного слоя $L_0 \approx 4L$ можно заменить на $L_0 = \infty$ и пользоваться результатами для модели с бесконечной шириной водоносного слоя.

Лабораторным моделированием экспериментально подтверждено существование пампинг-эффекта в динамике грунтовых вод. Кроме того, экспериментально подтвержден основной теоретический результат, полученный диссертации - наличие профильного пампинг-эффекта.

Список основных публикаций автора по теме диссертации По теме диссертации опубликовано 6 работ, в том числе, 2 статьи в рецензируемых журналах из списка ВАК, 4 тезисов докладов. Так же у автора 2 статьи в рецензируемых журналах из списка ВАК, которые не относятся к теме диссертации и 1 тезисы докладов.

Статьи, опубликованные в журналах из перечня ВАК:

1. **Жмур В. В., Марченко А. В., Фомин Ю. В.** Нестационарная фильтрация морских вод в водоносные слои прибрежной зоны моря // Водные ресурсы. 2017. Т. 44 № 1. С. 19-27.

2. **Фомин Ю. В.** Природа пампинг-эффекта в прибрежной зоне // Труды гидрометеорологического научно-исследовательского центра Российской Федерации. 2016. Вып. 361. С. 203 - 231.

3. **Жмур В. В., Марченко А.В., Фомин Ю.В.** Особенности формирования уровня

грунтовой воды в прибрежной зоне, в случае произвольной формы дна // Водные ресурсы (в печати)

Другие публикации:

1. **Жмур В. В., Марченко А. В., Фомин Ю. В.** Фильтрация морской воды в прибрежную зону моря // Труды 57-й научной конференции МФТИ с международным участием, посвященной 120 - летию со дня рождения П.Л. Капицы. Всероссийской молодежной научной конференции с международным участием «Актуальные проблемы фундаментальных и прикладных наук в современном информационном обществе». 24 - 29 ноября 2014. Москва, Долгопрудный, Жуковский, МФТИ.

2. **Фомин Ю. В.** О некоторых факторах влияния на формирование уровня грунтовых вод в прибрежной зоне моря // Труды 58-й научной конференции МФТИ. Аэрофизика и космические исследования - М.: МФТИ. 2015. 257 С. ISBN 978-5-7417-0583-4.

3. **Фомин Ю. В.** Эффект накачки в прибрежной зоне моря и некоторые его свойства // Труды 59-й научной конференции МФТИ. Аэрофизика и космические исследования - М.: МФТИ. 2016. 266 С. ISBN 978-5-7417-0611-4.

4. **Zhmur V. V., Marchenko A. V., Fomin Y. V.** Unsteady marine water intrusion into aquifer layers of the sea coast // Perseus training coastal waters and 3-rd International seminar. «Dynamics of the coastal zone in the non-tidal seas». Materials of the school-seminar. 30 June - 4 July 2014. Gelendzhik, Russia.

5. **Зырянов В. Н., Жмур В. В., Фомин Ю. В.** Нелинейная волновая интрузия вод в береговые подземные горизонты: теория, эксперимент // Сборник трудов конференции "Водные ресурсы: Новые вызовы и пути решения Сочи, 2 - 7 октября 2017 г. 7 С. (в печати)

Статьи, опубликованные в журналах из перечня ВАК, не относящиеся к теме диссертации:

1. **Сафронов А. В., Фомин Ю. В.** Методы численного решения уравнений газодинамики с помощью соотношений на разрывах // Труды МФТИ, 2009, Т. 2. С. 137-148.

2. **Морозов Е. Г., Марченко А. В., Фомин Ю. В.** Переохлажденная вода около ледника на Шпицбергене // Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана. 2015. Т. 51 №2, С. 230.

Другие публикации:

1. **Fomin Y.V., Zhmur V.V., Marchenko A.V., Onishenko D.A.** Heat flow and filtration of seawater in the coastal zone of the Arctic Shelf // SPE Arctic and Extreme Environments Conference and Exhibition. 2013. ISBN 978-1-61399-284-5 DOI 10.2118/166940-RU.