

На правах рукописи



КРЕМЕНЧУЦКИЙ ДМИТРИЙ АЛЕКСАНДРОВИЧ

**ФОРМИРОВАНИЕ И ЭВОЛЮЦИЯ ПОЛЯ КОНЦЕНТРАЦИИ
БЕРИЛЛИЯ-7 (^7Be) В ПОВЕРХНОСТНОМ СЛОЕ ВОД
ЧЕРНОГО МОРЯ**

Специальность 25.00.28 – Океанология

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата географических наук

Севастополь – 2019

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки «Морской гидрофизический институт РАН»

Научный руководитель: **Коновалов Сергей Карпович**
доктор географических наук,
член-корреспондент РАН

Официальные оппоненты: **Маккавеев Петр Николаевич**
доктор географических наук,
Федеральное государственное бюджетное
учреждение науки Институт океанологии
им. П.П. Ширшова Российской академии наук,
г. Москва, руководитель лаборатории
биогеохимии, главный научный сотрудник

Архипкин Виктор Семенович
кандидат географических наук, доцент,
Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
образования «Московский государственный
университет имени М.В. Ломоносова», г. Москва,
доцент кафедры океанологии Географического
факультета

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт морских биологических исследований имени А.О. Ковалевского РАН»

Защита состоится **«20» сентября 2019** года в 13 ч. 00 мин. на заседании Диссертационного совета Д 900.010.01 при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки «Морской гидрофизический институт РАН» по адресу: **299011, г. Севастополь, ул. Капитанская, 2.**

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Морской гидрофизический институт РАН» и на сайте Института http://mhi-ras.ru/thesis_defenses.html

Автореферат разослан « » 2019 года

Ученый секретарь
диссертационного совета
кандидат географических наук

Харитоновна Людмила Викторовна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования и степень ее разработанности.

Актуальность работы обусловлена тем, что радиоактивные изотопы являются исключительно информативными трассерами процессов в окружающей среде. Одним из таких радионуклидов является ^7Be . Изучению поведения этого радионуклида в разных регионах Земли уделяется значительное внимание [Baskaran, 2012; Laguionie et al., 2014; Kusmierczyk-Michulec et al., 2015; Lee et al., 2015; Haskell et al., 2015a; Haskell et al., 2015b; Bas et al., 2016; Du et al., 2016; Taylor et al., 2016; Kadko et al., 2017; Kapala et al., 2018]. Его относительно небольшой период полураспада (53,3 суток) и достаточно высокие активности в морской воде, достигающие $1\text{--}12 \text{ Бк м}^{-3}$, способность адсорбироваться на взвешенном веществе и отсутствие источников радионуклида в морской среде делают ^7Be удобным трассером в исследовании физических и физико-химических процессов с участием взвешенного вещества на масштабах времени от синоптического до сезонного. В частности, характеристики пространственно-временной изменчивости концентрации ^7Be в морской среде используются для: исследования субдукции поверхностных вод [Kadko, Olson, 1996]; вычисления скоростей апвеллинга и коэффициентов вертикальной турбулентной диффузии [Kadko, Johns, 2011; Haskell et al., 2015; Haskell, Hammond, Prokopenko, 2015; Kadko, 2017]; оценки потоков биогенных элементов [Haskell et al., 2015a; Haskell et al., 2015b; Kadko, 2017]; изучения переноса взвешенного вещества и оценки скорости осадконакопления [Palinkas et al., 2005; Feng et al., 2010; Huang, Du, Zhang, 2011; Du et al., 2016].

В Черном море характеристики пространственно-временной изменчивости концентрации ^7Be в воде, а также характеристики источников ^7Be ранее не исследовались. Результаты такого исследования открывают возможность к использованию радионуклида в качестве трассера при изучении процессов, определяющих формирование и эволюцию состава и структуры поверхностных вод Черного моря.

Цель и задачи исследования. Целью данного исследования являлось выявление особенностей и факторов формирования и эволюции поля концентрации ^7Be в поверхностном слое вод Черного моря.

Для достижения цели решались следующие задачи:

1. Получить экспериментальные данные о пространственно-временной изменчивости концентрации ^7Be в водах Черного моря. Исследовать влияние взвеси на трансформацию поля концентрации ^7Be .
2. Получить данные временной изменчивости содержания ^7Be в приземной атмосфере и в атмосферных выпадениях в Черноморском регионе, как граничного условия и единственного источника данного изотопа. Оценить и параметризовать поток ^7Be на поверхность Черного моря.
3. Изучить формирование и эволюцию поля концентрации ^7Be в водах Черного моря методами численного моделирования переноса пассивной примеси и физико-химических процессов с использованием региональной трехмерной термогидродинамической модели циркуляции Черного моря (модель МГИ) [Демышев, Коротаев, 1996; Чудиновских, Дымова, 2010].
4. Получить количественные оценки влияния факторов формирования и эволюции поля концентрации ^7Be в поверхностном слое вод Черного моря.

Научная новизна полученных результатов:

- впервые получены данные о среднесуточных значениях концентрации ^7Be в приземной атмосфере и величине его потока с влажными атмосферными выпадениями в Черноморском регионе;
- впервые рассчитаны величины и построены параметризации суточной величины потока ^7Be из атмосферы на поверхность Черного моря;
- впервые получены данные о концентрации ^7Be в водах Черного моря;
- впервые проведены исследования распределения ^7Be между растворенной и адсорбированной на взвеси формами в водах Черного моря, установлена функциональная связь с концентрацией взвеси;
- впервые проведены исследования внутригодовой изменчивости поля концентрации ^7Be в Черном море. Получены количественные оценки влияния адвективного и диффузионного переносов, радиоактивного распада и седиментации ^7Be со взвешенным веществом на эволюцию поля концентрации радионуклида.

Теоретическая и практическая значимость работы. В работе получены количественные оценки влияния различных физических процессов (поступления ^7Be из атмосферы на поверхность Черного моря, адвективного и диффузионного переносов в морской среде, радиоактивного распада и седиментации радионуклида со взвешенным веществом) на внутригодовую изменчивость поля концентрации ^7Be в поверхностном слое вод Черного моря. Эти оценки могут стать основой для дальнейшего использования ^7Be как трассера в исследованиях физико-химических процессов, влияющих на его содержание и распределение в морской среде. Полученные в работе параметризации коэффициента вымывания ^7Be атмосферными осадками и коэффициента распределения радионуклида между растворенной и взвешенной формами в морской воде позволяют провести оценки потока ^7Be из атмосферы на подстилающую поверхность и его концентрации на взвеси. Эти параметризации могут быть использованы при построении моделей переноса радионуклида в атмосфере и морской среде.

Методология и методы исследования. Выполнение данной работы предполагало получение и комплексный анализ разнородной информации: данных наблюдений (содержания ^7Be в морской воде, на атмосферных аэрозолях и в атмосферных выпадениях, концентрации взвеси, метеоданные) и результатов численных экспериментов.

Основным численным инструментом исследования было моделирование с использованием региональной трехмерной гидродинамической модели циркуляции Черного моря (модель МГИ) [Демьшев, Коротаев, 1996]. Исходная модель была дополнена блоком переноса пассивной примеси и параметризациями физико-химических процессов с участием ^7Be , а также параметризациями граничных условий поступления ^7Be с атмосферными выпадениями и его потока на морское дно. Параметризация потока ^7Be на подстилающую поверхность в Черноморском регионе проводилась с использованием массивов данных многолетних наблюдений за поступлением ^7Be с атмосферными выпадениями. Валидация результатов численного моделирования эволюции поля ^7Be в поверхностных водах Черного моря проводилась по натурным данным содержания и распределения ^7Be в водах моря.

Полученные в работе результаты анализировались с привлечением методов математической статистики.

Положения, выносимые на защиту:

- метод оценки потока ^7Be из атмосферы на поверхность Черного моря;
- количественные оценки характеристик пространственно-временной изменчивости поступления ^7Be на подстилающую поверхность в Черноморском регионе, а также поля концентрации этого радионуклида в водах Черного моря;
- характеристики внутригодовой эволюции поля концентрации ^7Be в поверхностном слое вод Черного моря;
- количественные оценки влияния различных факторов (поступления ^7Be из атмосферы на поверхность Черного моря, адвективного и диффузионного переносов в морской среде, радиоактивного распада и седиментации радионуклида со взвешенным веществом) на внутригодовую изменчивость поля концентрации ^7Be в поверхностном слое вод Черного моря.

Степень достоверности результатов проведенных исследований. Натурные данные были получены с использованием методов, являющихся общепринятыми в области радиоэкологии. Калибровка оборудования, используемого для определения содержания ^7Be в отобранных пробах, осуществлялась с использованием сертифицированных источников ионизирующего излучения.

Валидация результатов численных экспериментов, полученных с использованием термогидродинамической модели циркуляции Черного моря (модель МГИ), дополненной блоком распространения пассивной примеси, проводилась на основе натуральных данных о концентрации ^7Be . Установлено, что модель корректно воспроизводит пространственно-временную изменчивость поля концентрации ^7Be в исследуемый период: полученные оценки содержания радионуклида согласуются с натурными данными в пределах погрешности определения его концентрации в пробах морской воды.

Связь с научными программами, планами, темами. Работа выполнена в соответствии с научными планами и программами исследований Морского гидрофизического института НАН Украины и Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Морской гидрофизический институт РАН» в рамках следующих научно-исследовательских проектов и грантов:

- проект «Исследование гидрофизических и биогеохимических процессов, определяющих устойчивость и ассимиляционную емкость большой черноморской экосистемы, в целях управления и создания методологии оценки качества морской среды» (шифр «Стабильная экосистема»), № госрегистрации 0106U001408 (2006–2010 гг.), исполнитель;
- проект «Комплексные междисциплинарные исследования океанологических процессов, определяющих функционирование и эволюцию экосистем Черного и Азовского морей на основе современных методов контроля состояния морской среды и гридтехнологий» (шифр «Фундаментальная океанография»), № госрегистрации 0111U001420 (2011–2015 гг.), исполнитель;
- проект «Комплексные междисциплинарные исследования океанологических процессов, определяющих функционирование и эволюцию экосистем Черного и Азовского морей на основе современных методов контроля состояния морской среды и гридтехнологий» (шифр «Фундаментальная океанология»), № госрегистрации 0827-2014-0010 (2015–2017 гг.) исполнитель;
- грант РФФИ «Поступление бериллия-7 с атмосферными осадками на подстилающую поверхность» № 14-45-01539 p_юг_a, исполнитель;

- грант РФФИ «Поле концентрации бериллия-7(^7Be) в Черном море: особенности формирования и временная изменчивость» № 16-05-00206 а, исполнитель.

Апробация работы. Результаты работы докладывались и обсуждались на следующих научных мероприятиях: Международная научная конференция «Функционирование и эволюция экосистем Азово-Черноморского бассейна в условиях глобального изменения климата» (пос. Кацивели, 2010 г.); Международный научно-технический семинар «Системы контроля окружающей среды» (Севастополь, 2009 г., 2011 г., 2012 г.); Международная научная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Ломоносовские чтения» (Севастополь, 2012 г., 2015 г.); IV научно-практической конференции ЕЛПТ-2012 «Электроника и информационные технологии» (Львов, 2012 г.); Научная конференция «Молодые ученые – географической науке» (Киев, 2012 г.); Международная научная конференция «Интегрированная система мониторинга Черного и Азовского морей» (Севастополь, 2013 г.); Семинар кафедры радиохимии МГУ (Москва, 2013 г.); V фестиваль науки (Севастополь, 2014 г.); Научная конференция с международным участием «Современные проблемы гидрохимии и мониторинга качества поверхностных вод» (Ростов-на-Дону, 2015 г.); Седьмая школа-семинар «Спутниковые методы и системы исследования Земли» (Таруса, 2016 г.); Международная научная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Ломоносов-2016» (Москва, 2016 г.); Молодежная научная конференция «Комплексные исследования морей России: оперативная океанография и экспедиционные исследования» (Севастополь, 2016 г.); Научная конференция «Мировой океан: модели, данные и оперативная океанология» (Севастополь, 2016 г.); Научно-практическая конференция с международным участием «Экологическая, промышленная и энергетическая безопасность – 2017» (Севастополь, 2017 г.); I Международный экологический форум в Крыму «Крым – эколого-экономический регион. Пространство ноосферного развития» (Севастополь, 2017 г.); VII Международный симпозиум «INSINUME 2017» (Охрид, Македония, 2017 г.); Всероссийская школа-конференция молодых ученых «Состав атмосферы. Атмосферное электричество. Климатические процессы» (Борок, 2017 г.); Международная конференция «Goldschmidt-2017» (Париж, Франция, 2017 г.); Российская конференция с международным участием «Радиохимия 2018» (Санкт-Петербург, 2018 г.).

Публикации по теме диссертации. Основные результаты диссертации представлены в 27 работах. Из них: статей в научных журналах – 3, статей в рецензируемых сборниках научных трудов – 8, главы в коллективной монографии – 1, материалы в сборниках научных конференций – 15.

Требованиям ВАК при Минобрнауки России удовлетворяют 9 работ в рецензируемых научных изданиях. В том числе: 3 работы в изданиях, входящих в наукометрические базы Web of Science и SCOPUS; 6 работ в изданиях, соответствующих п. 10 Постановления Правительства Российской Федерации от 30 июля 2014 г. № 723 «Об особенностях присуждения ученых степеней и присвоения ученых званий лицам, признанным гражданами Российской Федерации в связи с принятием в Российскую Федерацию Республики Крым и образования в составе Российской Федерации новых субъектов – Республики Крым и города федерального значения Севастополя».

Личный вклад соискателя. Соискателем совместно с научным руководителем проводились постановка задач, разработка стратегии численных экспериментов

и сбора натурных данных. Им лично осуществлялся выбор методов исследований и отбор проб морской воды в экспедициях. Соискатель принимал участие в мониторинге содержания радионуклида на атмосферных аэрозолях и в атмосферных выпадениях. Измерения и расчет концентраций ^{7}Be в отобранных пробах проводились соискателем лично. Соискатель принимал участие в проведении численных экспериментов. Обсуждение основных выводов и результатов исследований осуществлялось соискателем совместно с научным руководителем и соавторами научных публикаций.

Благодарности. Автор выражает искреннюю благодарность своему научному руководителю чл.-корр. РАН, д-ру геогр. наук С.К. Коновалову за неоценимую помощь и ценные советы при подготовке работы. Автор искренне признателен канд. физ.-мат. наук Г.Ф. Батракову (МГИ РАН), канд. физ.-мат. наук О.А. Дымовой (МГИ РАН), канд. физ.-мат. наук А.А. Кубрякову (МГИ РАН), канд. физ.-мат. наук С.В. Станичному (МГИ РАН), д-ру физ.-мат. наук С.Г. Демьшеву (МГИ РАН), д-ру хим. наук Ю.А. Сапожникову (химический факультет МГУ им. М. В. Ломоносова) за плодотворные дискуссии и поддержку на разных этапах выполнения работы.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех разделов, заключения и списка использованных источников. Рукопись содержит 142 страницы, 50 рисунков и 11 таблиц, список литературы из 203 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность темы диссертации, показывается ее связь с исследовательскими программами, планами, темами, раскрывается сущность и состояние научной проблемы. Формулируются цель и задачи работы, определяется объект и предмет исследования, приводятся методы исследования. Подчеркиваются результаты, несущие элементы научной новизны, описывается их практическая значимость. Приводится список научных семинаров, конференций, школ, на которых были апробированы основные положения диссертации. Прилагаются сведения о научных публикациях соискателя. Дается краткое описание структуры и содержания диссертационной работы.

В первом разделе дан краткий обзор современного состояния вопроса. Обсуждаются основные механизмы, управляющие пространственно-временной изменчивостью потока ^{7}Be на подстилающую поверхность и влияющие на эволюцию поля радионуклида в морской среде. Указывается на отсутствие сведений о содержании радионуклида в Черном море. Приводится анализ работ, посвященных моделированию ^{7}Be в водной среде, и указывается на отсутствие трехмерной модели переноса ^{7}Be .

Во втором разделе описаны методики, используемые в работе для получения данных о содержании радионуклида в окружающей среде, и фактический материал наблюдений. Приведено описание модели переноса ^{7}Be в морской среде и математическая постановка численных экспериментов.

В подразделе 2.1 приведены методики отбора проб морской воды, взвеси, атмосферных аэрозолей, атмосферных выпадений и определения содержания ^{7}Be в них.

Пробы морской воды отбирались с помощью погружного насоса. Объем единичной пробы морской воды изменялся от 1 до ~10 м³. Вода прокачивалась через систему колб, содержащих фильтр механической очистки воды от взвеси (размер пор 1 мкм) и картриджи с сорбентом. В качестве сорбента использовался гранулированный оксид алюминия (средний размер гранул 5 мм) или гидроксид железа (III). Фильтры и импрегнированные гидроксидом железа картриджи озолялись в муфеле при температуре 600°C. Зола упаковывалась в калиброванную геометрию. Гранулы сорбента упаковывались в иную калиброванную геометрию без обработки. Измерения активности ⁷Be в пробах проводились, преимущественно, на гамма-спектрометре со сцинтилляционным детектором NaI(Tl) (диаметр кристалла составлял 63 мм, высота – 63 мм, разрешение – 7% по пику ¹³⁷Cs с энергией 662 КэВ). Часть проб дополнительно измерялась на высокопрецизионном гамма-спектрометре с полупроводниковым детектором фирмы ORTEC (GMX-10, США) с разрешением 1,75 КэВ по пику ⁶⁰Co. Относительная величина погрешности определения концентрации ⁷Be в морской воде варьировалась от 15 до 90%, и составляла в среднем 25%.

Пробы атмосферных аэрозолей отбирались на высоте 3 м относительно уровня подстилающей поверхности крыши здания Морского гидрофизического института, с помощью высокопроизводительной воздухофильтрационной установки (объемная скорость прокачки воздуха 525 м³ час⁻¹), с использованием фильтровальной ткани марки ФПП-15-1,5 (эффективность этого волокна составляет 99% для частиц размером от 0,2 мкм). Время отбора единичной пробы составляло 24 часа. По окончании отбора с использованием гидравлического пресса фильтру предавалась эталонная геометрия. Измерения активности ⁷Be проводились на гамма-спектрометре со сцинтилляционным детектором, описанном выше. Относительная величина погрешности определения концентрации ⁷Be на атмосферных аэрозолях варьировалась от 7 до 25%, и составляла в среднем 10%.

Пробы атмосферных осадков отбирались в открытую эмалированную кювету площадью 0,67 м², расположенную на подставке высотой 1,5 м относительно уровня подстилающей поверхности крыши здания МГИ и соединенную с пластиковой емкостью объемом 50 л. В процессе мониторинга отбирались индивидуальные случаи выпадения осадков. Концентрирование ⁷Be в пробе проводилось с использованием сильнокислотной ионообменной смолы (Dowex 88). Смола упаковывалась в калиброванную геометрию. Измерения активности ⁷Be проводились на гамма-спектрометре со сцинтилляционным детектором, описанном выше.

Пробы суммарных атмосферных выпадений отбирались с использованием эмалированной кюветы площадью 0,67 м². Пробоотборник располагался совместно с пробоотборником для влажных атмосферных выпадений. В кювете постоянно поддерживался уровень воды не ниже 1,5 см, а ее pH не превышал 3. Время экспозиции составляло 10–15 суток. Концентрирование и измерение ⁷Be в пробах суммарных атмосферных выпадений проводилось аналогично пробам влажных атмосферных выпадений. Относительная величина погрешности определения потока ⁷Be на подстилающую поверхность варьировалась от 10 до 30%, и составляла в среднем 15%.

В *подразделе 2.2* представлены натурные данные, полученные в работе, и дано их описание.

В период с мая 2012 г. по июль 2017 г. отобраны и обработаны 80 проб морской воды. По результатам измерений величина концентрации ⁷Be в растворенной форме

в верхнем квазигомогенном слое Черного моря изменялась от 0,6 до 8,7 Бк м⁻³, средняя величина за весь период наблюдений составляет $(5,2 \pm 1,8)$ Бк м⁻³, относительное содержание на взвеси изменялось от 6 до 50%, средняя величина – $(10 \pm 4)\%$.

В период с июля 2011 г. по декабрь 2016 г. отобраны и обработаны 960 среднесуточных проб атмосферных аэрозолей. За период наблюдений концентрация ⁷Ве в приземной атмосфере изменялась от 0,2 до 10,2 мБк м⁻³, средняя величина составила $(3,5 \pm 1,7)$ мБк м⁻³.

В период с марта 2011 г. по декабрь 2016 г. отобраны и обработаны 231 проба дождевых осадков. Величина потока ⁷Ве с дождевыми осадками изменялась в интервале от 1,0 до 72,4 Бк м⁻² сутки⁻¹, средняя величина составила $(11,4 \pm 9,7)$ Бк м⁻² сутки⁻¹. Величина концентрации ⁷Ве в осадках изменялась в интервале 0,3 до 16 Бк л⁻¹, средняя величина – $(3,1 \pm 2,6)$ Бк л⁻¹.

В период с марта 2011 г. по декабрь 2013 г. отобраны и обработаны 64 пробы суммарных атмосферных выпадений. Величина суммарного потока ⁷Ве из атмосферы за период наблюдений изменялась в широком интервале от 0,3 до 11,3 Бк м⁻² сутки⁻¹, средняя составила $(2,5 \pm 2,1)$ Бк м⁻² сутки⁻¹.

В подразделе 2.3 дано описание трехмерной термогидродинамической модели (модель МГИ) [Демьшев, Коротаев, 1992, 1996; Демьшев, 2011, 2012], дополненной блоком переноса пассивной примеси [Демьшев и др., 2001, 2003; Чудиновских, Дымова, 2010].

Уравнение переноса радионуклида в декартовой системе координат x, y, z (оси x и y направлены на восток и север соответственно, а ось z – вертикально вниз) может быть записано в следующем виде [Шмельков, Степанец, 2010; Kremenchutskii et al., 2018]:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial(UC)}{\partial x} + \frac{\partial(VC)}{\partial y} + \frac{\partial((W + pw_s)C)}{\partial z} = A^H \nabla^2 C + \frac{\partial}{\partial z} A_V \frac{\partial C}{\partial z} - \lambda C, \quad (1)$$

где C – суммарная концентрация ⁷Ве в растворенной и адсорбированной на взвеси формах, Бк см⁻³; U, V, W – компоненты скорости течений, см с⁻¹, рассчитываемые в термогидродинамическом блоке модели; A^H – коэффициент при бигармоническом операторе, $A^H = -5 \cdot 10^{17}$ см⁴ с⁻¹ [Чудиновских, Дымова, 2010]; A_V – коэффициент диффузии по вертикали, рассчитываемый согласно теории турбулентного замыкания Меллора-Ямады 2.5 [Mellor, Yamada, 1982; Демьшев, 2011]; λ – постоянная распада, $\lambda = \ln 2/\tau$, с⁻¹; τ период полураспада ⁷Ве; w_s – скорость седиментации взвеси, $w_s = 0,001$ см с⁻¹ [Багаев, 2012]; p – доля ⁷Ве на взвеси, относительно его общего содержания в воде.

Граничные условия. В качестве граничного условия на свободной поверхности ($z = 0$) задавался поток ⁷Ве из атмосферы:

$$-A_V \frac{\partial C}{\partial z} = F, \quad (2)$$

где F – это поток ⁷Ве с сухими (F_{dry}) и влажными (F_{wet}) атмосферными выпадениями на морскую поверхность, оценки которого были получены в подразделе 3.2.

В качестве граничного условия на дне $z = H(x, y)$ задавался поток ${}^7\text{Be}$, оседающего на взвеси:

$$-A_v \frac{\partial C}{\partial z} = p w_s C. \quad (3)$$

На твердых границах:

$$\partial C / \partial n = 0, \quad \partial(\nabla^2 C) / \partial n = 0, \quad (4)$$

где n – нормаль к границе области.

На жидких границах рек и проливов:

$$C = \nabla^2 C = 0. \quad (5)$$

Начальные условия. В начальный момент времени задавались климатические поля температуры, солености, горизонтальных скоростей и уровня моря, представленные в работе [Demyshev et al., 2009]. Концентрация ${}^7\text{Be}$ во всем бассейне моря предполагалась равной $0,01 \text{ Бк м}^{-3}$.

Схема проведения численных экспериментов. Численные эксперименты были проведены на регулярной сетке размером $4,8 \times 4,8 \text{ км}$. По вертикали использовалось 27 z-горизонтов с глубинами 2,5, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 40, 50, 62,5, 75, 87,5, 100, 112,5, 150, 200, далее через каждые 100 м до глубины 500 м, затем через 200 м до 1700 и 2100 м. Шаг по времени составлял 300 сек.

При проведении численных экспериментов в термогидродинамическом блоке модели использовались поля касательного напряжения-трения ветра, потоков тепла, осадков и испарений, полученные по данным атмосферного реанализа SKIRON [Архив SKIRON]. В блоке переноса примеси использовались поля потока ${}^7\text{Be}$, рассчитанные с использованием параметризации, полученной в подразделе 3.2, и поля взвеси, рассчитанные с использованием регионального алгоритма [Кременчуцкий и др., 2014] по данным сканера MODIS [Архив MODIS]. Упомянутые выше поля задавались каждые сутки и линейно интерполировались на каждый шаг по времени на регулярную сетку.

Было выполнено два численных эксперимента: первый, охватывающий период с января 2015 г. по декабрь 2016 г., и второй – с января 2011 г. по декабрь 2012 г. Материалы первого численного эксперимента были использованы при валидации модели (см. подраздел 4.1), анализе пространственно-временной изменчивости поля концентрации ${}^7\text{Be}$ в водах Черного моря (см. подраздел 4.2) и факторов ее определяющих (см. подраздел 4.3). Материалы второго численного эксперимента позволили провести сопоставление динамик концентраций радионуклида в поверхностном слое вод в районе океанографической платформы в пос. Кацивели, полученных по натурным и модельным данным (см. подраздел 4.1).

В третьем разделе приведен анализ и обобщение натурных данных концентрации ${}^7\text{Be}$ в Черном море по материалам экспедиционных исследований, полученным на океанографической платформе в пос. Кацивели и в рейсах НИС «Профессор Водяницкий». Выделены основные особенности пространственно-временной

изменчивости содержания ^7Be в морской воде, установлена функциональная зависимость коэффициента распределения концентрации ^7Be между растворенной и адсорбированной на взвеси формами. По результатам мониторинга содержания ^7Be на атмосферных аэрозолях и в выпадениях получена параметризация коэффициента вымывания радионуклида из атмосферы с осадками на подстилающую поверхность, проведена ее валидация.

В *подразделе 3.1* дан анализ пространственно-временной изменчивости поля концентрации ^7Be , полученной по данным наблюдений. Установлено, что вертикальное распределение концентрации ^7Be в водах Черного моря подобно вертикальному распределению температуры. В открытых районах моря радионуклид обнаруживается до глубин 60–70 м.

Получено, что общее содержание ^7Be в верхнем квазиоднородном слое (ВКС) Черного моря изменяется по пространству и во времени от 1,2 до 9,5 Бк м⁻³ (Рисунок 1, *а*), средняя величина составляет $(5,7 \pm 1,9)$ Бк м⁻³. Повышенные величины концентрации ^7Be отмечаются в глубоководной части моря, пониженные – в прибрежной. Используя данные о вертикальном распределении концентрации ^7Be и боксовую модель [Ipoue et al., 2013] проведены оценки резидентного времени нахождения радионуклида в верхнем квазиоднородном слое Черного моря и получено, что оно изменяется от 6 до 155 суток. Минимальные величины времени наблюдаются в районах наименьших глубин залегания границы верхнего квазиоднородного слоя, максимальные – в районах с наибольшими глубинами залегания границы слоя.

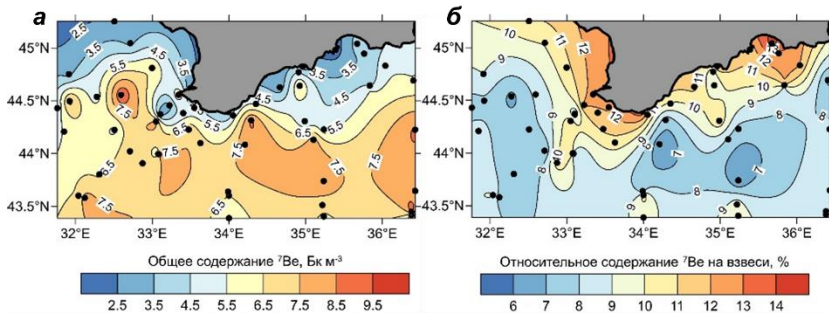


Рисунок 1 – Пространственное распределение общего содержания ^7Be (*а*) и относительного содержания на взвеси (*б*) в верхнем квазиоднородном слое вод Черного моря. Точками показано расположение станций отбора проб морской воды

Установлено, что в Черном море ^7Be распределен между растворенной и адсорбированной на взвеси формами. На взвеси содержится в среднем $(10 \pm 4)\%$ от общего содержания ^7Be (Рисунок 1, *б*). В абсолютных величинах концентрация ^7Be на взвеси составляет в среднем $(0,5 \pm 0,2)$ Бк м⁻³ или (980 ± 423) Бк кг⁻¹. Максимальные величины относительного содержания ^7Be на взвеси наблюдаются в прибрежной части моря, минимальные – в глубоководной. Коэффициент распределения (K_d) ^7Be между растворенной и адсорбированной на взвеси формами изменяется

от $0,7 \cdot 10^5$ до $3,4 \cdot 10^5$ л кг⁻¹, средняя величина составляет $(1,7 \pm 0,3) \cdot 10^5$ л кг⁻¹. Установлена функциональная зависимость величины коэффициента распределения ⁷Be от концентрации взвеси для вод Черного моря (Рисунок 2).

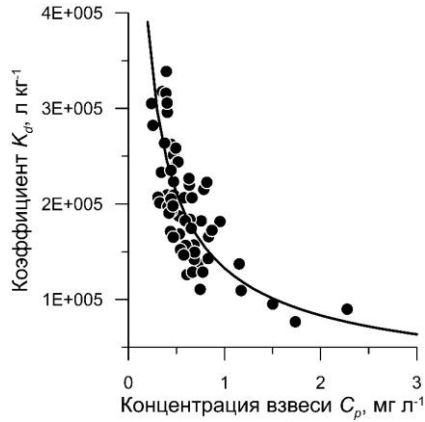


Рисунок 2 – Зависимость коэффициента распределения от концентрации взвешенного вещества. Точки – результаты расчетов, линия – аппроксимирующая функция

Вид аппроксимирующей функции на Рисунке 2 был выбран согласно [Hawley et al., 1986]:

$$K_d = a \cdot C_p^{-b}, \quad (6)$$

где a – константа равновесия, $a = (1,7 \pm 0,2) \cdot 10^5$; b – константа, учитывающая природы адсорбента и адсорбтива, $b = 0,46 \pm 0,10$; C_p – концентрация взвеси, мг л⁻¹.

В подразделе 3.2 приведены результаты исследования временных изменений концентрации ⁷Be на атмосферных аэрозолях, в суммарных и влажных атмосферных выпадениях. Результатом этих исследований стала параметризация, позволяющая оценить поток радионуклида из атмосферы с осадками:

$$F_{wet} = \left[4,75 \cdot Pr^{-0,83} + 0,2 \cdot \exp\left(\frac{Pr-64,9}{129,9}\right) \right] \times \\ \times \left[2 + 3 \cdot \exp\left(-0,5 \left(\frac{\phi-38,7}{8,4}\right)^2\right) \right] \cdot \left[1 - 0,2 \sin\left(\pi \frac{year+1,13}{5,5}\right) + 1,03 \sin\left(\pi \frac{year+0,273}{0,5}\right) \right] \times \\ \times [1 - 0,63 \exp(-0,56t)] \cdot Pr \quad (7)$$

где F_{wet} – поток ⁷Be с влажными атмосферными выпадениями, Бк м⁻² сутки⁻¹; Pr – среднесуточная интенсивность осадков, мм сутки⁻¹; ϕ – широта месторасположения исследуемого региона, градусы; $year$ – год, на который выполняется расчет

потока; t – время, прошедшее с момента последнего случая выпадения осадков, сутки.

Валидация этой параметризации была проведена по данным наблюдений, представленным в доступной литературе для 6 станций, расположенных в Бостоне (США) [Zhu et al., 2009], Нью-Йорке (США) [Renfro et al., 2013], Вильнюсе (Литва) [Lujanien, 2003], Малаге (Испания) [Duenas et al., 2011], на Бермудских островах [Kadko et al., 2011] и в районе Боденского озера (Германия) [Vogler et al., 1996]. Согласно полученным результатам для 80% данных наблюдений (Рисунок 2) величина отклонения рассчитанных значений потока от измеренных не превосходит величину доверительного интервала, обусловленного погрешностью определения параметров, использованных при разработке параметризации. Следует отметить, что максимальная величина отклонения рассчитанных значений от измеренных составила 75%, при этом в 40%-й диапазон укладывается 98% данных.

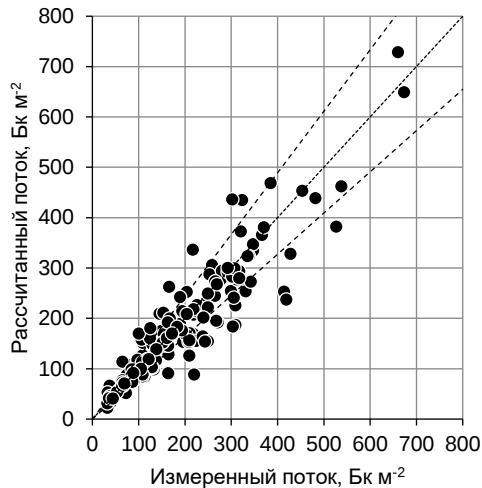


Рисунок 2 – Сопоставление результатов расчета с данными измерений.
Пунктирная линия – доверительный интервал

По результатам мониторинга средняя величина потока ^7Be с сухими атмосферными выпадениями (F_{dry}), оценки которой были получены как разность между величинами суммарного и влажного потоков радионуклида, составила $(0,5 \pm 0,3) \text{ Бк м}^{-2} \text{ сутки}^{-1}$.

В четвертом разделе представлены результаты численных экспериментов, их валидация. Проанализирована сезонная изменчивость структуры поля концентрации ^7Be в поверхностном слое вод Черного моря на примере 2016 г. Выделены определяющие ее факторы и исследована их пространственно-временная изменчивость.

В *подразделе 4.1* представлены результаты сопоставления данных численного эксперимента с материалами экспедиционных исследований на НИС «Профессор Водяницкий». Показано, что модель воспроизводит пространственно-временную

изменчивость поля концентрации радионуклида в Черном море в исследуемый период (Рисунок 3). Модуль средней относительной величины отклонения рассчитанных значений концентрации от измеренных равен 20% и сопоставим со средней погрешностью определения содержания ^7Be в воде (25%). Фактически относительная величина отклонения результатов численного эксперимента от данных наблюдений не превосходит среднюю величину погрешности определения концентрации ^7Be в морской воде в 80% случаев. Второй численный эксперимент показал, что повышенные относительные величины отклонения, наблюдаемые на двух станциях, расположенных вблизи г. Феодосия и г. Судак, связаны с тем, что пробы были отобраны в штормовых условиях в непосредственной близости к берегу (~1,5 км). В таких условиях могут иметь место градиенты концентрации радионуклида, обусловленные пространственной неоднородностью поля концентрации взвеси. В связи с тем, что расчеты проводились на сетке с шагом 4,8 км, такие особенности являются подстечными эффектами для данной модели.

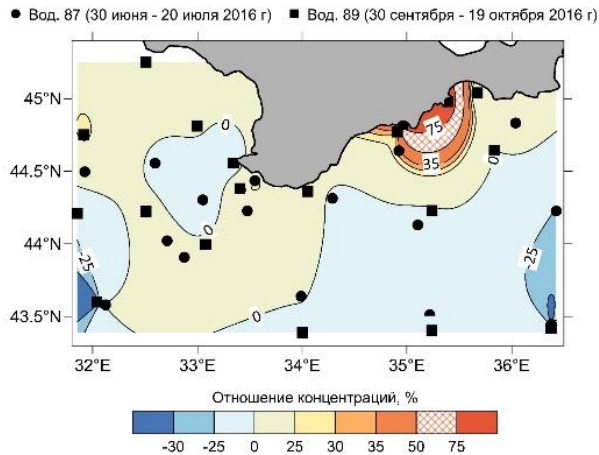


Рисунок 3 – Пространственное распределение величин отклонений рассчитанных по модели концентраций ^7Be от измеренных в ходе 87 и 89 рейсов НИС «Профессор Водяницкий». Положительные величины – оценки концентрации по модели превосходят натурные данные, отрицательные – обратное

В *подразделе 4.2* приводятся результаты исследования сезонной изменчивости характеристик поля концентрации ^7Be в поверхностном слое вод Черного моря: общего содержания радионуклида в слое (Рисунок 4) и его концентрации на взвеси. Установлено, что концентрация ^7Be в верхнем квазиоднородном слое в период с января по декабрь 2016 г. изменялась по пространству и во времени от 2 до 11 Бк м^{-3} . Повышенные величины концентрации были характерны для глубоководной части моря, пониженные – для прибрежной. Максимальные величины отмечались в летний период в юго-восточной части моря, минимальные – в зимний период в северо-западной. Величина относительного содержания ^7Be на взвеси изменялась от 6

до 27%. Повышенные величины были свойственны для прибрежной зоны моря, пониженные – для глубоководной. Максимальные величины наблюдались в зимний период в приустьевом районе Дуная, минимальные – в осенний период в центральной части моря.

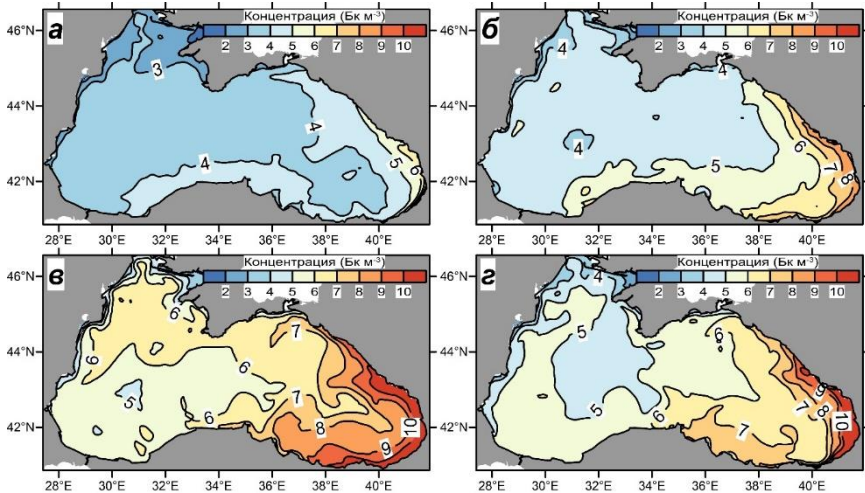


Рисунок 4 – Сезонная изменчивость концентрации ${}^7\text{Be}$ (Бк м^{-3}) в ВКС Черного моря в 2016 г.: а – зима, б – весна, в – лето, г – осень

В *подразделе 4.3* представлены результаты анализа влияния различных факторов (поступления ${}^7\text{Be}$ из атмосферы на поверхность Черного моря, адвективного и диффузионного переносов в морской среде, радиоактивного распада и седиментации радионуклида со взвешенным веществом) на пространственно-временную изменчивость поля концентрации ${}^7\text{Be}$ в поверхностном слое вод Черного моря.

По результатам корреляционного анализа установлено, что пространственная изменчивость поля концентрации ${}^7\text{Be}$ (Рисунок 5, а) определяется неоднородностью полей потока этого радионуклида из атмосферы (Рисунок 5, б) и концентрации взвешенного вещества (Рисунок 5, г). Пространственная изменчивость потока радионуклида обусловлена неоднородностью поля осадков (Рисунок 5, в).

Временная изменчивость поля концентрации ${}^7\text{Be}$ определяется не только вариациями его потока из атмосферы и концентрации взвеси, поскольку максимумы и минимумы соответствующих параметров не совпадают по времени. Максимум концентрации ${}^7\text{Be}$ в верхнем квазиоднородном слое моря наблюдается в летний сезон (Рисунок 6, а), а не в осенний, характеризующийся максимальными величинами потока радионуклида из атмосферы (Рисунок 6, б) и минимальными величинами концентрации взвеси (Рисунок 6, в).

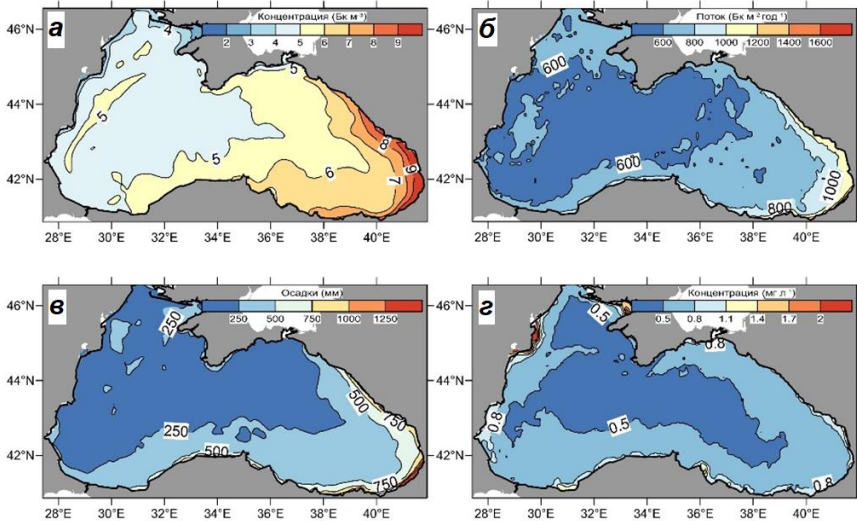


Рисунок 5 – Пространственное распределение осредненной за 2016 г. величины концентрации ${}^7\text{Be}$ (Бк м^{-3}) в поверхностном слое вод Черного моря (а), суммарных за год величин потока ${}^7\text{Be}$ ($\text{Бк м}^{-2} \text{ год}^{-1}$) (б), суммарных за год количеств атмосферных осадков (мм) (в) и осредненных за год величин концентрации (мг л^{-1}) взвешенного вещества (г)

По материалам численных экспериментов были получены потоки ${}^7\text{Be}$ в ВКС из атмосферы и из него в нижележащий слой. Установлено, что 95% радионуклида, поступающего из атмосферы в ВКС, удаляется из него за счет радиоактивного распада в самом слое, диффузионного переноса и седиментации на взвеси в нижележащие слои.

Анализ полученных данных показал, что первым фактором временной изменчивости концентрации ${}^7\text{Be}$ в ВКС Черного моря является поток радионуклида из атмосферы на морскую поверхность (Рисунок 6, б). Временная изменчивость потока ${}^7\text{Be}$ зависит нелинейно (см. подраздел 3.2) от концентрации радионуклида в атмосфере (Рисунок 6, з) и осадков (Рисунок 6, в).

Второй фактор – это глубина залегания границы ВКС (Рисунки 6, е и 7, а). Временная изменчивость первого и второго факторов определяют запас радионуклида в ВКС (Рисунок 6, з) и величину градиента концентрации ${}^7\text{Be}$ между ВКС и нижележащим слоем (Рисунок 7, б). Вариация запаса ${}^7\text{Be}$ и его градиента концентрации определяют соотношение вклада радиоактивного распада (Рисунок 6, ж) и диффузионного переноса (Рисунок 6, д) в процесс удаления изотопа из ВКС. Согласно полученным результатам (Таблица 1), осредненные за год относительные величины вкладов диффузионного переноса и радиоактивного распада сопоставимы.

Третий фактор – это сорбция и седиментация ${}^7\text{Be}$ на взвеси (Рисунок 6, и). Временная изменчивость этого фактора определяется вариацией концентрации взвешенного вещества (Рисунок 6, к) и радионуклида в ВКС (Рисунок 6, а).

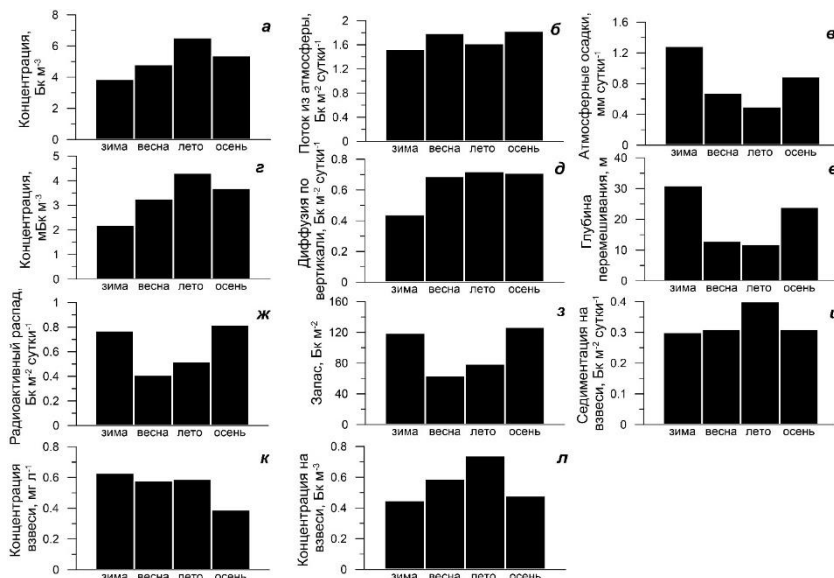


Рисунок 6 – Временная изменчивость в 2016 г. параметров: общей концентрации ^7Be в ВКС (а), потока ^7Be из атмосферы (б), атмосферных осадков (в), концентрации ^7Be в атмосфере (г), диффузионного переноса ^7Be через нижнюю границу ВКС (д), глубины перемешивания (е), радиоактивного распада ^7Be в ВКС (ж), запаса ^7Be в ВКС (з), седиментационного потока ^7Be через нижнюю границу ВКС (и), концентрации взвеси в ВКС (к), концентрации ^7Be на взвеси в ВКС (л)

Таблица 1 – Сезонная изменчивость вклада различных факторов в удаление ^7Be из верхнего квазигоднородного слоя моря

Факторы	Вклад, %				
	Зима	Весна	Лето	Осень	Год
Радиоактивный распад	51	29	32	44	39
Диффузия по вертикали	29	49	44	39	40
Седиментация на взвеси	20	22	24	17	21

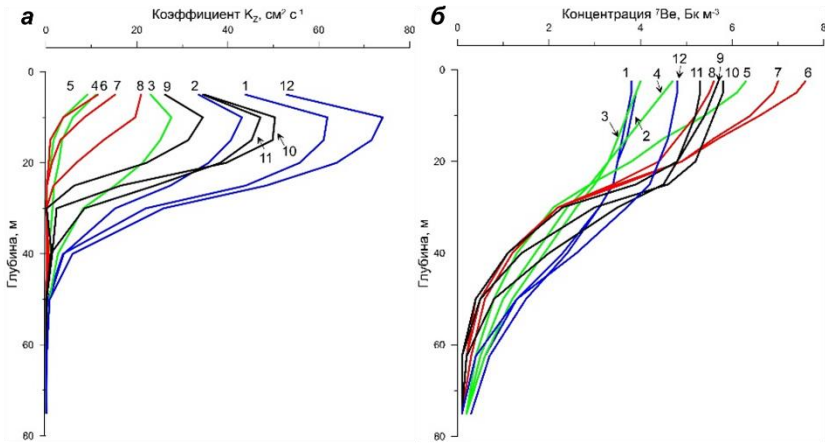


Рисунок 7 – Сезонная изменчивость вертикальных распределений коэффициента вертикальной турбулентной диффузии (K_z) (а) и концентрации ${}^7\text{Be}$ (б), осредненные для всей акватории моря. Цифры 1–12 соответствуют порядковому номеру месяца 2016 г.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертационная работа посвящена комплексному изучению процесса формирования и эволюции поля концентрации ${}^7\text{Be}$ в поверхностном слое вод Черного моря. Основные научные результаты представленной работы могут быть сформулированы следующим образом:

1. Впервые получены натурные данные о пространственно-временной изменчивости концентрации ${}^7\text{Be}$ в поверхностных водах Черного моря. Установлено, что общее содержание ${}^7\text{Be}$ в верхнем квазиоднородном слое вод Черного моря изменяется по пространству и во времени от 1,2 до 9,5 Бк м⁻³, средняя величина составляет $(5,7 \pm 1,9)$ Бк м⁻³. Максимальные величины концентрации ${}^7\text{Be}$ отмечаются в глубоководной части моря, минимальные – в прибрежной. Резидентное время нахождения радионуклида в верхнем квазиоднородном слое изменяется от 6 до 155 суток. Изотоп обнаруживается в толще воды до глубин 60–70 м.

2. Установлено, что в водах Черного моря ${}^7\text{Be}$ распределен между растворенной и адсорбированной на взвеси формами. Среднее содержание на взвеси составляет (10 ± 4) % от величины общего содержания радионуклида. Средняя величина коэффициента распределения (K_d) ${}^7\text{Be}$ между растворенной и взвешенной формами равняется $(1,7 \pm 0,3) \cdot 10^5$ л кг⁻¹. Установлена функциональная зависимость величины коэффициента K_d от концентраций взвеси в морской воде.

3. Получены современные данные о временной изменчивости содержания ${}^7\text{Be}$ в приземной атмосфере и в атмосферных выпадениях в Черноморском регионе в период с 2011 по 2016 гг. По этим данным, а также по материалам, представленным

в доступной литературе, предложена параметризация, позволяющая количественно оценивать поток ^7Be с осадками на подстилающую поверхность. Получены величины поступления ^7Be на поверхность Черного моря в 2011–2012 и 2015–2016 гг.

4. Установлена функциональная зависимость между величинами общего содержания взвешенного вещества и обратного рассеяния взвесью для поверхностного слоя вод Черного моря. Рассчитаны поля концентрации взвеси в акватории Черного моря за периоды 2011–2012 и 2015–2016 гг.

5. Используя термогидродинамическую модель циркуляции Черного моря (модель МГИ), дополненную блоком распространения пассивной примеси, проведены численные эксперименты по формированию и эволюции поля концентрации ^7Be в водах Черного моря для периодов 2011–2012 и 2015–2016 гг. Валидация результатов численных экспериментов проводилась по материалам экспедиционных исследований. Установлено, что модель воспроизводит установленные по натурным данным особенности пространственно-временной изменчивости поля концентрации ^7Be в водах Черного моря в исследуемый период. Полученные оценки содержания радионуклида согласуются с натурными данными в пределах погрешности определения его концентрации в пробах морской воды.

6. По материалам численных экспериментов описана и проанализирована сезонная изменчивость концентрации ^7Be в верхнем квазиоднородном слое Черного моря в период с января по декабрь 2016 г. Установлено, что концентрация ^7Be изменялась по пространству и во времени от 2 до 11 Бк м^{-3} , относительное содержание радионуклида на взвеси и его концентрации на взвеси – от 6 до 27% и от 400 до 2100 Бк кг^{-1} соответственно. Повышенные величины концентрации ^7Be были характерны для глубоководной части моря, пониженные – для прибрежной, что связано с большим содержанием взвешенного вещества в прибрежных районах и более интенсивным удалением ^7Be на взвеси. Максимальные величины отмечались в летний период в юго-восточной части моря, минимальные – в зимний период в северо-западной, что отражает максимальное поступление ^7Be с атмосферными выпадениями в юго-восточной части моря.

7. Выполнен анализ влияния различных факторов на пространственно-временную изменчивость поля концентрации ^7Be в поверхностном слое вод Черного моря. Установлено, что эта изменчивость обусловлена вариациями потока ^7Be из атмосферы, глубиной залегания границы верхнего квазиоднородного слоя и концентрацией взвеси. Временные изменчивости глубины перемешивания и потока ^7Be на морскую поверхность определяют доминирующий механизм удаления радионуклида из верхнего квазиоднородного слоя – радиоактивный распад или диффузионный перенос. Повышенные величины концентрации ^7Be в морской воде связаны с повышенными величинами потока изотопа из атмосферы, пониженными величинами концентрации взвеси и уменьшением глубины залегания границы верхнего квазиоднородного слоя моря.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в рецензируемых журналах

1. Dovhyi I.I. Atmospheric depositional fluxes of cosmogenic ^{32}P , ^{33}P and ^7Be in the Sevastopol region / I.I. Dovhyi, **D.A. Kremenchutskii**, V.Yu. Proskurnin, O.N. Kozlovskaya // Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry. – 2017. – № 3 (314). – P. 1643–1652.
2. **Kremenchutskii D.A.** Numerical simulation of the intra-annual evolution of beryllium-7 (^7Be) in the surface layer of the Black Sea / D.A. Kremenchutskii, O.A. Dymova, G.F. Batrakov, S.K. Konovalov // Environmental Science and Pollution Research. – 2018. – № 11 (25). – P. 11120–11127.
3. **Kremenchutskii D.A.** Distribution of beryllium-7 (^7Be) in the Black Sea in the summer of 2016 / D.A. Kremenchutskii // Environmental Science and Pollution Research. – 2018. – № 31 (25). – P. 31569–31578.

Статьи в сборниках научных трудов

4. Батраков Г.Ф. Временная изменчивость концентрации ^7Be в приземной атмосфере и сухих выпадениях в севастопольском регионе / А.П. Арбузова, Г.Ф. Батраков, Т.М. Иванова, **Д.А. Кременчуцкий**, В.В. Семёнов, Т.В. Чудиновских // Системы контроля окружающей среды – Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика. – 2010. – № 14. – С. 173–181.
5. **Кременчуцкий Д.А.** ^7Be в прибрежной зоне Черного моря / Д.А. Кременчуцкий, Г.Ф. Батраков, В.В. Семенов // Системы контроля окружающей среды. – Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика. – 2011. – № 16. – С. 251–257.
6. **Кременчуцкий Д.А.** Оценка потока ^7Be с влажными атмосферными выпадениями / Д.А. Кременчуцкий // Системы контроля окружающей среды. – Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика. – 2012. – № 17. – С. 148–152.
7. **Кременчуцкий Д.А.** ^7Be в шельфовой зоне вод Черного моря: результаты измерений / Д.А. Кременчуцкий // Системы контроля окружающей среды. – Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика. – 2012. – № 18. – С. 149–152.
8. **Кременчуцкий Д.А.** Распределение бериллия-7 (^7Be) между взвешенным веществом и морской водой в шельфовой зоне Черного моря / Д.А. Кременчуцкий // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. – Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика. – 2013. – № 27. – С. 306–311.
9. **Кременчуцкий Д.А.** Определение концентрации взвешенного вещества в Черном море по данным спутника MODIS / Д.А. Кременчуцкий, А.А. Кубряков, П.О. Завьялов, Б.В. Коновалов, С.В. Станичный, А.А. Алескерова // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. – Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика. – 2014. – № 29. – С. 5–9.
10. **Кременчуцкий Д.А.** Временная изменчивость поступления бериллия-7 (^7Be) на подстилающую поверхность в Севастополе / **Д.А. Кременчуцкий**, Г.Ф. Батраков // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. – Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика. – 2016. – № 3. – С. 95–98.

11. **Кременчуцкий Д.А.** Исследование полей концентрации радионуклидов в Черном море методами численного моделирования на примере бериллия-7 (^7Be) / **Д.А. Кременчуцкий**, О.А. Дымова, Г.Ф. Батраков // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. – Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика. – 2017. – № 2. – С. 37–43.

Монографии и главы в монографиях

12. Батраков Г.Ф. Исследование роли атмосферных аэрозолей в формировании полей природной и техногенной радиоактивности Черного моря / Г.Ф. Батраков, Т.В. Чудиновских, Т.М. Иванова, А.П. Арбузова, **Д.А. Кременчуцкий**, В.В. Семенов // Устойчивость и эволюция океанологических характеристик экосистемы Черного моря / под. ред. В.Н. Еремеева, С.К. Коновалова. – Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика. – 2012. – Раздел 2.5. – С.160–187.

Тезисы докладов на Всероссийских и международных конференциях

13. **Кременчуцкий Д.А.** Внутригодовые изменения потока ^7Be с атмосферными выпадениями в севастопольском регионе / **Д.А. Кременчуцкий** // Материалы Международного молодежного научного форума «ЛОМОНОСОВ-2012». [Электронный ресурс]. – М.: МАКС Пресс. – 2012 г. – электрон, опт. диск (CD-ROM).

14. **Кременчуцкий Д.А.** Пространственно-временная изменчивость содержания ^7Be в шельфовой зоне Черного моря: результаты измерений / **Д.А. Кременчуцкий** // Збірник наукових праць Всеукраїнської конференції з міжнародною участю. – К.: Видавництво географічної літератури "Обрії". – 2012. – № 8. – С. 245–248.

15. **Кременчуцкий Д.А.** Пространственно-временная изменчивость поля концентрации бериллия-7 (^7Be) в Черном море по результатам численных экспериментов / **Д.А. Кременчуцкий** // Тезисы докладов симпозиума «Чернобыль: 30 лет спустя» и международной научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Ломоносов-2016» Подсекция радиохимия и радиоэкология. – М.: МГУ. – 2016. – С. 47.

16. **Кременчуцкий Д.А.** Формування поля ^7Be в поверхневому шарі Чорного моря: результати чисельних експериментів / **Д.А. Кременчуцкий**, О.А. Дымова // Програма і матеріали IV-ої науково-практичної конференції «Електроніка та інформаційні технології». – Л.: Видавничий центр Львівського національного університету ім. Івана Франка. – 2012. – С. 56–59.

17. **Кременчуцкий Д.А.** Региональный алгоритм для оценки поступления бериллия-7(^7Be) с атмосферными осадками / **Д.А. Кременчуцкий**, С.К. Коновалов, Г.Ф. Батраков // Материалы международной научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Ломоносов-2015» / Под. ред. Соколова М.Э. и др. – Севастополь: ООО «Экспресс-печать». – 2015. – С. 45.

18. **Кременчуцкий Д.А.** Пространственно-временная изменчивость поступления бериллия-7 (^7Be) на поверхность Черного моря / **Д.А. Кременчуцкий**, С.К. Коновалов, Г.Ф. Батраков, С.В. Станичный // Материалы научной конференции с международным участием «Современные проблемы гидрохимии и мониторинга качества поверхностных вод». – Ростов-на-Дону. – 2015. – № 2. – С. 247–251.

19. **Кременчуцкий Д.А.** Исследование полей концентрации радионуклидов в Черном море методами численного моделирования на примере бериллия-7 (^7Be) / Д.А. Кременчуцкий, О.А. Дымова, Г.Ф. Батраков, С.К. Коновалов // Тезисы докладов научной конференции «Мировой океан: модели, данные и оперативная океанология». – Севастополь: ФГБУН МГИ. – 2016. – С. 171.

20. **Кременчуцкий Д.А.** Временная изменчивость содержания бериллия-7 (^7Be) в Черном море по результатам численных экспериментов / Д.А. Кременчуцкий, О.А. Дымова, Н.А. Евстигнеева, Г.Ф. Батраков // Материалы научно-практической конференции с международным участием «Экологическая, промышленная и энергетическая безопасность». – Севастополь. – 2017. – С. 694–697.

21. **Кременчуцкий Д.А.** Временная изменчивость концентрации бериллия-7 (^7Be) в атмосфере г. Севастополь за период 2011–2016 гг. / Д.А. Кременчуцкий, Г.Ф. Батраков // Тезисы докладов XXI Всероссийской школы-конференции молодых ученых / Геофизическая обсерватория «Борок» – филиал Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта – Ярославль: Филигрань. – 2017. – С. 17.

22. **Кременчуцкий Д.А.** Пространственная изменчивость содержания бериллия-7 в морской воде по данным 89 рейса НИС «Проф. Водяницкий» / Д.А. Кременчуцкий, Г.Ф. Батраков // Тезисы научно-технической конференции «Системы контроля окружающей среды-2017». – Севастополь, 06–09 ноября 2017 г. – Севастополь: РИО ИПТС. – 2017. – С. 77.

23. Батраков Г.Ф. Временная изменчивость потока бериллия-7 на подстилающую поверхность / Г.Ф. Батраков, **Д.А. Кременчуцкий** // Тезисы научно-технической конференции «Системы контроля окружающей среды-2017». – Севастополь: РИО ИПТС. – 2017. – С. 78.

24. **Kremenchutskii D.A.** Concentration of beryllium-7 (^7Be) in the surface layer of Black Sea: evolution and governing processes / D.A. Kremenchutskii, G.F. Batrakov, S.G. Demyshev, O.A. Dymova, S.K. Konovalov // Book of abstracts 7th International Symposium on IN Situ Nuclear Metrology as a tool for radioecology INSINUME 2017, Ohrid, Macedonia. 2017. – P. 36–37.

25. Дымова О.А. Моделирование распространения пассивных загрязняющих примесей в Черном море для задач экологического мониторинга / О.А. Дымова, **Д.А. Кременчуцкий** // Материалы I Международного экологического форума в Крыму «Крым – эколого-экономический регион. Пространство ноосферного развития» – Севастополь: Филиал МГУ имени М.В. Ломоносова в г. Севастополе. – 2017. – С. 165–169.

26. Dovhyi I.I. Atmospheric depositional fluxes of marine radiotracers ^{32}P , ^{33}P and ^7Be in Sevastopol region / I.I. Dovhyi, **D.A. Kremenchutskii**, V.Yu. Proskurnin, O.N. Kozlovskaya // Goldschmidt-2017, Paris, France. – 2017. – P. 10m.

27. **Кременчуцкий Д.А.** Факторы временной изменчивости концентрации бериллия-7 в Черном море / Д.А. Кременчуцкий, О.А. Дымова, Г.Ф. Батраков, С.К. Коновалов // Сборник тезисов IX Российской конференции с международным участием «Радиохимия 2018». – Санкт-Петербург. – 2018. – С. 225.