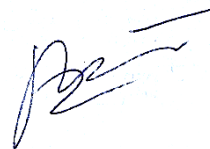


**Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования «Российский химико-технологический
университет имени Д. И. Менделеева»**

На правах рукописи



Васильева Евгения Григорьевна

**«Влияние антропогенной фосфорной нагрузки на
пресноводные объекты Российской Федерации»**

03.02.08 Экология (химическая технология)
(технические науки)

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Москва – 2021

Работа выполнена на кафедре ЮНЕСКО «Зеленая химия для устойчивого развития» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Российский химико-технологический университет имени Д.И. Менделеева».

Научный

руководитель:

Макарова Анна Сергеевна,

Доктор технических наук, профессор кафедры ЮНЕСКО «Зеленая химия для устойчивого развития» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Российский химико-технологический университет имени Д.И. Менделеева»

Официальные

оппоненты:

Бессарабов Аркадия Маркович,

Доктор технических наук, профессор, заместитель директора по науке Акционерного общества Научный центр «Малотоннажная химия»

Челноков Виталий Вячеславович,

Доктор технических наук, доцент, профессор кафедры логистики и экономической информатики федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Российский химико-технологический университет имени Д.И. Менделеева»

Назаренко Денис Игоревич,

Кандидат технических наук, начальник отдела федерального государственного унитарного предприятия «Государственный научно-исследовательский институт органической химии и технологии»

Защита состоится «__» декабря 2021 года на заседании диссертационного совета РХТУ.05.05 на базе РХТУ им. Д.И. Менделеева» по адресу: 125047, г. Москва, Миусская пл., 9, аудитория 443 (конференц-зал).

С диссертацией можно ознакомиться в Информационно-библиотечном центре РХТУ имени Д.И. Менделеева, а также на официальном сайте <https://diss.muctr.ru>.

Автореферат диссертации разослан «__» _____ 2021 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета РХТУ.05.05

кандидат технических наук, доцент

Я.П. Молчанова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

По оценкам Всемирной организации здравоохранения к 2025 году около 40 % населения планеты не будет иметь возможности обеспечивать свои хозяйственно-бытовые нужды из-за повсеместного снижения уровня качества и доступности воды.

Решение проблемы продовольственной безопасности посредством мелиорации земель привело к значительным несоответствиям в местных балансах фосфора (В рамках представленного автором исследования термином «фосфор» обозначается количество доступных минеральных форм фосфора (PO_4^{3-} , HPO_4^{2-} , H_2PO_4^-) в пересчёте на общий Р). Использование фосфорсодержащих минеральных и органических удобрений для увеличения объёмов производства продукции растениеводства приводит к резкому возрастанию концентрации фосфора в пресноводных объектах, что, в свою очередь, является одной из причин изменения трофического статуса данных объектов. Исследования динамики трофического статуса водных масс крупнейших озёр Российской Федерации (РФ) показывают значительный рост количества эвтрофицированных объектов, однако несмотря на это, в РФ дорожной картой по развитию производства и потребления минеральных удобрений на период до 2025 года, утвержденной распоряжением Правительства РФ от 29 марта 2018 г. No 532-р, запланировано увеличение использования фосфорных удобрений на 18% от текущего уровня (до 3,45 млн тонн).

С другой стороны, помимо минеральных удобрений, значимыми источниками поступления фосфора в компоненты биосферы могут быть органические удобрения, предприятия химической промышленности и синтетические моющие средства (СМС), относительно которых в настоящее время во многих европейских странах существует запрет или значительное ограничение на производство и использование средств, содержащих фосфор в своём составе. Вопрос введения ограничительных мер для фосфорсодержащих СМС обсуждается и в РФ.

Резюмируя вышесказанное, создание инструментов для проведения оценки и прогнозирования антропогенной фосфорной нагрузки на пресноводные объекты становится актуальной задачей при реализации рационального подхода к использованию ресурсов и устойчивого развития химической отрасли промышленности РФ.

Основные методики оценки химической нагрузки на компоненты биосферы, включая фосфорную, изложены в работах Ю.С. Даценко, В. Г. Драбковой, В.П. Дымникова, А.В. Измайловой, С.А. Кондратьева, М.М. Мельника, В.П. Мешалкина, Е.В. Неверовой-Дзиопак, Г.К. Осипова, А. Н. Попова, Н.П. Тарасовой, Н.И. Хрисанова, Л.И. Цветковой и зарубежных ученых: Alexander R. B., Bennett E. M., Carpenter S. R., Fekete B.M., Helmes R. J. K., Rockström J., Steffen W., Vörösmarty C.J.

и др. Однако, стоит отметить, что локальные методики, предполагающие обязательное наличие полевых данных, не подходят для проведения оценок в масштабе страны, а зарубежные глобальные методики требуют специфического набора исходных данных, отсутствующих в открытом доступе для территорий РФ, или созданы для отдельно взятых регионов и учитывают только их специфику, как например, GlobalNEWS2 может использоваться для оценки антропогенной фосфорной нагрузки только в условиях умеренно континентального климата и лесной растительности, применение данной модели в других климатических условиях даёт нерелевантные результаты.

Таким образом, создание методики оценки антропогенной фосфорной нагрузки на уровне субъектов РФ, с использованием данных открытых источников, является актуальной научно-технической задачей, а представленное диссертационное исследование полностью соответствует приоритетному направлению развития «6. Рациональное природопользование» и пункту перечня критических технологий: «19. Технологии мониторинга и прогнозирования состояния окружающей среды, предотвращения и ликвидации ее загрязнения», определенных в Указе Президента РФ «Об утверждении приоритетных направлений развития науки, технологий и техники в Российской Федерации и перечня критических технологий Российской Федерации» от 7 июля 2011 года. Также диссертационное исследование соответствует пунктам 4.1 «Исследования влияния продукции химической отрасли промышленности на окружающую среду в естественных условиях с целью установления пределов устойчивости компонентов биосферы к антропогенному воздействию» и 4.8. «Информационные технологии, как инструмент достижения экологической и экономической эффективности работы предприятий отрасли» паспорта специальности 03.02.08 Экология (по отраслям).

Цель диссертационной работы заключается в определении и прогнозировании уровня антропогенной фосфорной нагрузки для субъектов РФ при изменении климатических параметров и/или объёмов потребления фосфорных удобрений.

Для достижения цели диссертационного исследования сформулированы и выполнены следующие взаимосвязанные научно-технические **задачи**:

1. Анализ современного состояния научных исследований по методам оценки антропогенной фосфорной нагрузки в глобальном и региональном масштабах.
2. Разработка порядка сбора, анализа и обработки первичных данных и составление базы данных для расчета уровня антропогенной фосфорной нагрузки на пресноводные объекты РФ.
3. Разработка порядка расчёта миграции фосфора в компонентах биосферы, учитывающего установленные концепцией «планетарных границ» пределы устойчивости данных компонентов к техногенному воздействию.

4. Определение приоритетных источников поступления фосфора в пресноводные объекты РФ.

5. Прогнозирование изменения уровня антропогенной фосфорной нагрузки в зависимости от изменения климатических параметров и/или объёмов потребления фосфорных удобрений.

Методы решения поставленных задач: системный анализ техногенно-природных объектов, включая современные методы переработки больших массивов информации; палеоолиминологические и статистические методы, методы регрессионного анализа.

Для визуального представления полученных расчётов автором исследования использовались методы иерархических образов, предназначенные для представления многомерных данных, выстроенных в иерархическую структуру определённого порядка.

Научная новизна диссертационного исследования:

1. Разработана методика оценки уровня антропогенной фосфорной нагрузки на пресноводные объекты РФ, отличающаяся одновременным учётом процессов миграции фосфора в нескольких компонентах биосферы и определением пределов устойчивости к техногенному воздействию на основании концепции «планетарных границ», применяемой в глобальном масштабе. Методика позволяет производить скрининговые расчеты для каждого отдельно взятого субъекта РФ, что может использоваться для проведения первичного анализа состояния компонентов биосферы на рассматриваемых территориях.

2. Проведена оценка текущего уровня антропогенной фосфорной нагрузки на пресноводные объекты в субъектах РФ, а также произведено прогнозирование уровня нагрузки, включающее в себя изменение климатических параметров и увеличение объёмов потребления фосфорных удобрений. На основании полученных результатов определены приоритетные источники поступления фосфора в пресноводные объекты для всех субъектов РФ.

Практическая значимость диссертационной работы. Результаты диссертационной работы использованы: в качестве одного из методов оценки экологического состояния территорий, на которых расположены предприятия-члены Ассоциации «РОСХИМПРЕАКТИВ», производящие различные фосфорсодержащие составы и реактивы; предприятием ООО «ЙОСЯ» при создании программного комплекса в рамках выполнения этапа конкурса префектуры города Марсель (Франция), что подтверждается справкой о внедрении.

На защиту выносятся следующие результаты исследования, имеющие научную и практическую значимость:

1. Порядок сбора, анализа и обработки первичных данных и база данных для расчёта антропогенной фосфорной нагрузки на пресноводные объекты РФ.

2. Порядок расчёта миграции фосфора в компонентах биосферы, учитывающий процессы трансграничного переноса в водной среде.

3. Оценка и прогнозирование антропогенной фосфорной нагрузки на пресноводные объекты и ее визуальное представление для субъектов РФ при различных сценариях, учитывающих глобальные климатические изменения и увеличение объёмов потребления фосфорных удобрений.

4. Определение приоритетных источников поступления фосфора в пресноводные объекты РФ.

Достоверность и обоснованность научных результатов и выводов обеспечена строгостью используемого математического аппарата. Результаты, полученные в ходе диссертационной работы, не противоречат ранее полученным известным результатам других авторов. Сопоставление полученных при применении методики результатов с данными мониторинга водных объектов показало, что величина относительной погрешности расчётных данных составляет не более 32 %.

Апробация работы. Основные результаты исследования были представлены на следующих конференциях: Летняя школа молодых ученых «Планетарные границы. Искусство моделирования», г. Звенигород (май 2016 г.); Международная научно-практическая конференция «Логистика и экономика ресурсосбережения и энергосбережения в промышленности», п. Дивноморское, Краснодарский край (сентябрь 2016 г.); Конкурс молодых ученых «Прикоснись к науке» в рамках Фестиваля Науки, г. Москва (октябрь 2016 г.); IX Международная научно-практическая конференция «Образования и наука для устойчивого развития», г. Москва (апрель 2017 г.); 1-я Международная научно-практическая конференция «Снежный покров, атмосферные осадки, аэрозоли: климат и экология северных территорий и Байкальского региона», г. Иркутск (июнь 2017 г.); 7th International IUPAC Conference on Green Chemistry, г. Москва (октябрь 2017 г.); XXXIX международная научно-практическая конференция «Российская наука в современном мире», г. Москва (июль 2021 г.); «Биотехнология: наука и практика», г. Ялта (сентябрь 2021 года).

Публикации. По материалам диссертационной работы автором исследования опубликовано 10 научных работ, в том числе: 3 в журналах, индексируемых в международных системах SCOPUS и Web of Science; 1 в журнале, рекомендованном ВАК; 1 свидетельство о регистрации базы данных; 5 в прочих журналах, включая тезисы конференций.

Структура и объём диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, трёх глав, заключения, трёх приложений и списка литературы из 66 наименований. Работа изложена на 133 страницах машинописного текста, включает 7 таблиц, 14 рисунков.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность поставленной и решенной научно-технической задачи, сформулированы цель и задачи диссертационной работы, изложены научная новизна и практическая значимость полученных результатов.

В первой главе «Современное состояние научных исследований в области методологии оценки антропогенной фосфорной нагрузки на компоненты биосферы» проанализированы существующие методы оценки антропогенной химической нагрузки на компоненты биосферы, включая фосфорную, в глобальном и региональном масштабе, сформулированы достоинства и недостатки существующих методов, обоснована необходимость проведения исследований по оценке уровня антропогенной фосфорной нагрузки на пресноводные объекты в субъектах РФ.

Во второй главе «Методика расчёта миграции фосфора в компонентах биосферы, учитывающая трансграничный перенос в пресноводных водоемах» автором подробно описывается разработанная в рамках диссертационной работы методика расчёта миграции фосфора, включающая в себя сбор, анализ и обработку первичных данных, создание базы данных для расчёта уровня антропогенной фосфорной нагрузки на пресноводные объекты, непосредственно расчёты уровня нагрузки и создание иллюстрационных материалов для визуального представления полученных результатов.

В качестве основного подхода для определения текущего уровня антропогенной фосфорной нагрузки на пресноводные объекты автором выбрана концепция «планетарных границ», представляющая собой комплексный подход к определению допустимых пределов устойчивости компонентов биосферы к техногенному воздействию. В рамках данной концепции планетарная граница по суммарному поступлению фосфора в пресноводные объекты установлена в размере $11,2 * 10^{12}$ г/год.

Для описания процессов миграции фосфора в компонентах биосферы автором сформулировано схематическое описание (рисунок 1), в котором учитываются процессы естественного выветривания фосфорсодержащих пород и переноса пыли в различные водные объекты при формировании антропогенной фосфорной нагрузки на компоненты биосферы.

Прямоугольниками на схеме обозначены рассматриваемые в рамках исследования компоненты биосферы: атмосфера, водные объекты, донные отложения и почвы. X1, X2, X3 и X4 обозначено количество фосфора, поступающего в: почву, водные объекты, атмосферу и донные отложения соответственно. Для учёта максимального количества различных пресноводных объектов, включая озёра, болота и водохранилища, автором предложено рассматривать не только динамические, но и статические водные объекты, которые имеют условное обозначение Z.

При исследовании поступления фосфора в компоненты биосферы в качестве основных источников были выделены следующие процессы, обозначенные на схеме овалами: в почву фосфор, в основном, попадает за счёт внесения минеральных удобрений (S_{fer}^s) и денудации (S_{den}^s); исследование процесса поступления фосфора в водные объекты показало, что в качестве основных источников выступают точечные источники (S_p^w) и продукты жизнедеятельности животноводства в виде органических удобрений (S_{of}^w); поступление фосфора в атмосферу (S_{tot}^a).

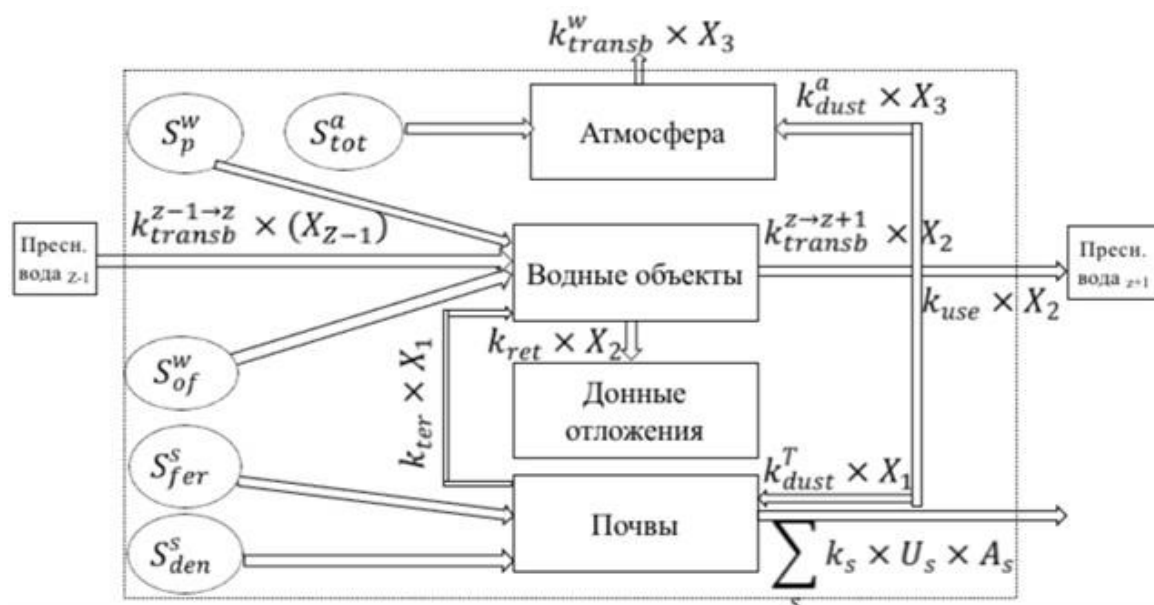


Рисунок 1 - Схематическое описание процессов миграции фосфора в компонентах биосферы

Поступление фосфора в почву с минеральными удобрениями, S_{fer}^s (кг/год), рассчитывалось как произведение количества фосфора, ежегодно вносимое для каждого субъекта РФ на площадь его сельскохозяйственных территорий. Поскольку данные о ежегодном количестве внесения минеральных удобрений в Статистическом ежегоднике представлены только для РФ в целом, автором было найдено и изучено более 85 отчетов региональных министерств сельского хозяйства и природных ресурсов с целью получения необходимых для расчёта данных.

Поступление фосфора в поверхностные слои почвы вследствие выветривания в различных исследованиях колеблется в диапазоне значений от $1,5 \cdot 10^{10}$ до $2 \cdot 10^{10}$ кг/год в глобальном масштабе. Путем суммирования скоростей механической и химической денудации ($2 \cdot 10^{13}$ кг/год) со средним содержанием фосфора в земной коре (0,1%), научной группой Дюка¹ предложено использовать в качестве значения текущего выветривания фосфора величину, равную $2 \cdot 10^{10}$ кг/год. Количество

¹ Duce R. A. et al. Global Biogeochemical Cycles. — 1991. — V. 5. — № 3. — PP. 193–259.

фосфора, поступающего с механической и химической денудацией, рассчитывалось с использованием значения доли рассматриваемой территории от общемировой поверхности суши.

Отходы жизнедеятельности животноводческих ферм и птицефабрик, их хранение и дальнейшее использование в качестве органических удобрений, являются достаточно значимыми источниками поступления фосфорсодержащих соединений в водные объекты. Если предположить, что все образовавшиеся на фермах и птицефабриках отходы жизнедеятельности остаются в пределах рассматриваемых территорий, то расчет S_{of}^w может быть представлен как сумма всех произведений коэффициента эмиссии общего фосфора одного домашнего животного j -го наименования (кг/год) на количество голов рассматриваемого вида этих животных. Под определением «домашние животные» в рамках исследования автором принято количество голов крупного рогатого скота, свиней и птицы, информация о которых взята из Базы данных государственной статистики для каждого субъекта РФ.

Сброс сточных вод муниципальных предприятий является одним из основных точечных источников (S_p^w) загрязнения поверхностных вод и при отсутствии достоверных данных мониторинга может быть рассчитан на основании данных о численности населения рассматриваемой территории, умноженных на коэффициент эмиссии (k_p) химического вещества для 1 жителя, равный 2,7 г/день или 0,99 кг/год фосфора, и умноженный на безразмерный коэффициент k_t , характеризующий снижение концентрации химических веществ в сточных водах после очистки, равный 0,7, так как биологическая очистка муниципальных сточных вод приводит к снижению концентрации на 30 %.

Для описания скорости переноса фосфора в различных компонентах биосферы, автором использовались различные коэффициенты, имеющие буквенное обозначение k и указанные на рисунке 1 над стрелками, обозначающими перенос фосфора из одного компонента биосферы в другой, а также вынос за пределы рассматриваемой системы. Трансграничный перенос фосфора в водных объектах учитывался с помощью коэффициентов удаления фосфора из предстоящего ($k_{transb}^{z-1 \rightarrow z}$) и последующего ($k_{transb}^{z \rightarrow z+1}$) объектов, которые, в свою очередь, рассчитывались как отношение среднесноголетнего расхода воды к общему объёму воды для рассматриваемой территории. Общий объём воды был рассчитан для каждого субъекта РФ на основании данных об объёмах рек, озёр и водохранилищ. Так как в государственных докладах об использовании и состоянии природных ресурсов размещаются данные только для крупных рек, озёр и водохранилищ, а 98 % озёр в РФ являются небольшими и мелководными, автором было предложено

рассчитать объём таких объектов с помощью эмпирических зависимостей, описанных в работах Миллера и Хельмса².

На основании значения массы переноса фосфора с пылью в глобальном масштабе, предложенного научной группой Розембаума³ и равного 10^9 кг/год, коэффициент переноса фосфора с пылью k_{dust}^T был рассчитан с использованием отношения площади сельскохозяйственных территорий рассматриваемого субъекта к общемировой поверхности суши.

Вынос фосфорсодержащих веществ за пределы водосбора с продуктами растениеводства рассчитывался как произведение коэффициента выноса химического вещества с растительной массой k_s (кг/ц), урожайности U_s (кг/(км²*год)) и площади A_s (км²), которую занимает рассматриваемая сельскохозяйственная культура. Рекомендованные значения параметра k_s являются справочными величинами, значения площадей, занятых определенными сельскохозяйственными культурами, рассчитывались на основании статистических данных, приведенных в Российском статистическом ежегоднике для каждого региона РФ.

Коэффициент переноса фосфора, связанный с антропогенными процессами (k_{use}) (1/год) и коэффициент, описывающий перенос фосфора в донные отложения (k_{ret}) (1/год), рассчитывались на основании зависимостей, приведенных в работах Майорги⁴ и Смита соответственно.

Для расчёта уровня антропогенной фосфорной нагрузки по предложенной автором методике, необходимо наличие большого количества первичных данных, включая значения общих объёмов доступной воды в субъектах федерации, площади и объёмов водно-болотных угодий, длин рек и других подобных параметров. Помимо высокой степени достоверности используемых данных, в некоторых случаях требовалось проведение дополнительной обработки с целью приведения найденных значений к одинаковым единицам измерения. Для унификации описанного процесса автором разработан порядок поиска, сбор и анализа первичных данных, представленный на рисунке 2.

² Helmes R. et al. International Journal of Life Cycle Assessment. — 2012. — № 17. — PP. 646-654.

³ Rosenbaum R. K. et al. International Journal of Life Cycle Assessment. — 2008. — V. 13. — № 7. — PP.532 - 546.

⁴ Mayorga E. et al. Environmental Modelling & Software. — 2010. — V. 25. — PP. 837–853.



Рисунок 2 - Порядок поиска, сбора и анализа первичных данных

После обработки данные использовались для расчёта 90 различных параметров, необходимых для определения значений уровня антропогенной фосфорной нагрузки на пресноводные объекты каждого из 85 субъектов РФ, на основании которого сформирована и зарегистрирована в официальном порядке база данных. (Свидетельство о государственной регистрации базы данных RU 2021622068, 04.10.2021. Заявка № 2021621846 от 03.09.2021). Суммарно в ходе исследования найдено и (или) рассчитано порядка 38 тысяч параметров, некоторые примеры использованных при расчёте параметров приведены в таблице 1.

Таблица 1. Примеры параметров, использованных при расчёте уровня фосфорной нагрузки для субъектов РФ

№ п/п	Наименование параметра	Источник
1	Площадь территории округа, A_i , (км ²)	Российский Статистический Ежегодник 2020 ⁵
2	Средние многолетние значения водных ресурсов, (км ³ /год)	Проект Государственного доклада «О состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации в 2019 году» ⁶
3	Вносимые удобрения, Ad_{fer} , (кг/га)	Россия в цифрах. 2019 ⁷
4	Общий объем воды, V , (км ³)	Параметр рассчитывался на основании выражения: $V = V_{riv} + V_{lak+res}$
5	Объем озер и водохранилищ, $V_{lak+res}$, (км ³)	Параметр рассчитывался на основании выражения: $V_{lak+res} = V_{lak+res}^L + V_{lak+res}^S$
6	Объём малых озер, $V_{lak+res}^S$, (км ³)	Параметр рассчитывался на основании выражения: $V_{lak+res}^S = A_{lak+res}^S \times 0,001$
7	Площадь малых озёр, $A_{lak+res}^S$, (км ²)	Параметр рассчитывался на основании выражения: $A_{lak+res}^S = A_{lak+res} - A_{lak+res}^L$
8	Объем рек, V_{riv} , (км ³)	Параметр рассчитывался на основании выражения: $V_{riv,i} = W_i \times D_i \times L_i^8$
9	Ширина водного объекта, W_i , (м)	Параметр рассчитывался на основании выражения: $W_i = aw \times Q_i^{bw} \text{ }^9$
10	Глубина водного объекта, D_i , (м)	Параметр рассчитывался на основании выражения: $D_i = ad \times Q_i^{bd}$
11	Длина водного объекта, L_i , (м)	Параметр рассчитывался на основании выражения: $L_i = S_b \times \sqrt{A_i} \text{ }^{10}$
12	Густота речной сети, G_{riv} , (км/км ²)	Параметр рассчитывался на основании выражения: $G_{riv} = \frac{L_{riv}}{A_{riv}}$
13	Площадь речной сети, A_{riv} , (км ²)	Параметр рассчитывался на основании выражения: $A_{riv} = A_w - A_{lak+res} - A_{sw}$

⁵ https://gks.ru/bgd/regl/b20_13/Main.htm

⁶ [https://www.mnr.gov.ru/upload/iblock/cf1/07_09_2020_M_P_O%20\(1\)](https://www.mnr.gov.ru/upload/iblock/cf1/07_09_2020_M_P_O%20(1))

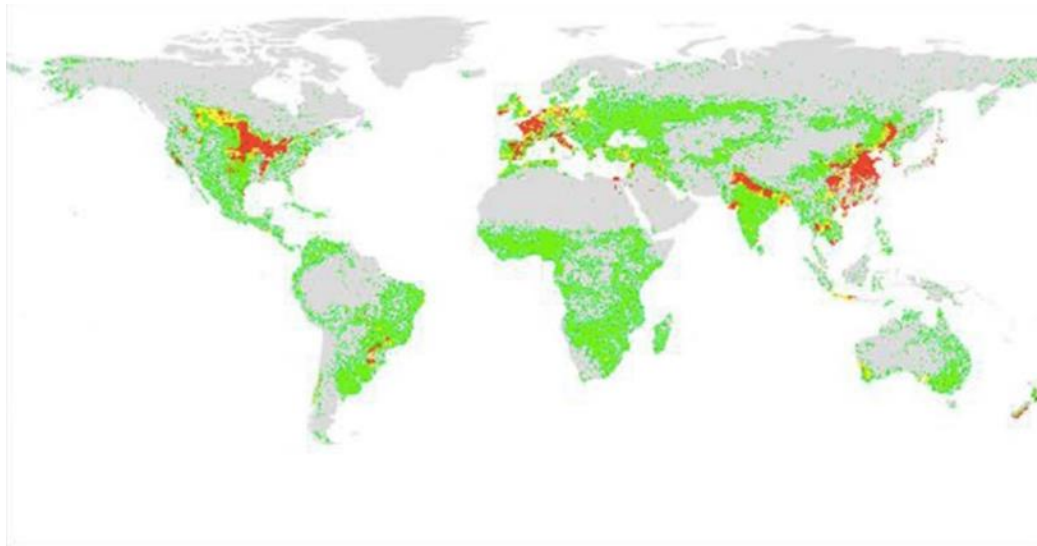
⁷ Россия в цифрах. 2019: Крат. стат. сб./Росстат — М., 2019. — 549 с.

⁸ Helmes, R. et al. International Journal of Life Cycle Assessment. — 2012. — № 17. — PP. 646-654.

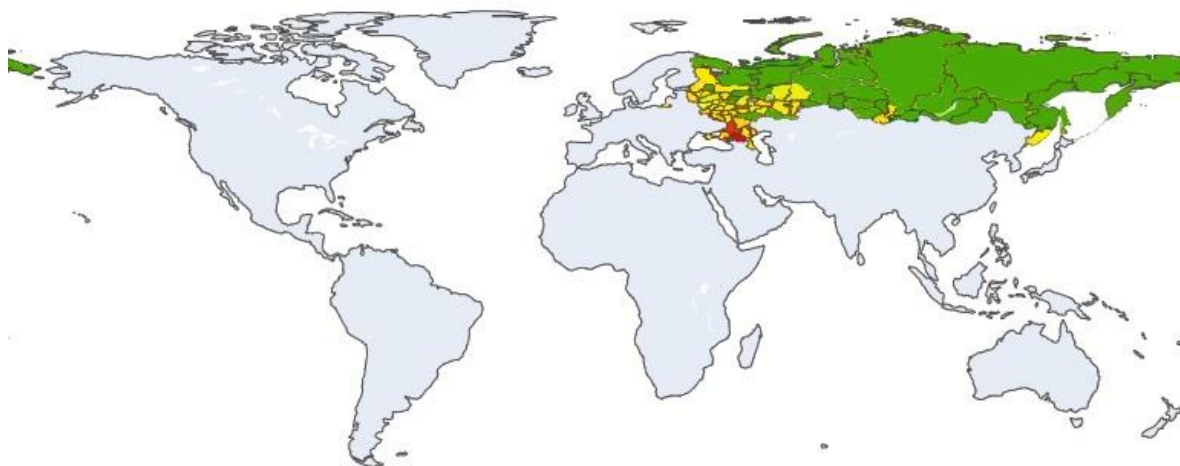
⁹ Miller, Z. F. et al. Hydrology and Earth System Sciences. — 2014. — V. 18. — PP. 4883–4895.

¹⁰ Vörösmarty, C. J. et al. Journal of Hydrology. — 2000. — V. 237. — № 1. — PP. 17–39.

В третьей главе «Оценка и прогнозирование антропогенной фосфорной нагрузки на пресноводные объекты РФ при различных сценариях» автором с помощью иллюстрационных материалов в виде карты страны (рисунок 3б) представлены полученные в ходе диссертационного исследования результаты расчёта уровня фосфорной нагрузки для субъектов РФ.



а) – результаты исследования фосфорной нагрузки в глобальном масштабе, представленные научной группой под руководством Штефена



б) - результаты исследования фосфорной нагрузки, полученные в ходе выполнения диссертационной работы, представляющие собой дополнительные данные по субъектам РФ

Рисунок 3 – Результаты исследования фосфорной нагрузки: в глобальном масштабе, представленные научной группой под руководством Штефена (а); полученные в ходе выполнения диссертационной работы, представляющие собой дополнительные данные по субъектам РФ (б)

Иллюстрационные материалы для визуального представления полученных результатов выполнены по аналогии с результатами исследования фосфорной нагрузки в глобальном масштабе, проведенными научной группой под руководством Штефена¹¹ (рисунок 3а), и имеют три типа зон: зелёная (безопасная зона) зона, в которой значение планетарной границы не превышает; жёлтая (зона повышенного риска) зона характеризует регионы, в которых планетарная граница превышена более чем в 10 раз; в регионах красной (зоны высокого риска) зоны значение планетарной границы превышено более чем в 20 раз.

Сравнение полученных при использовании предложенной методики оценки уровня антропогенной фосфорной нагрузки на пресноводные объекты РФ с данными мониторинга приведено на рисунке 4. Величина относительной погрешности составляет 32 %, что является достаточным уровнем достоверности для предложенной методики.

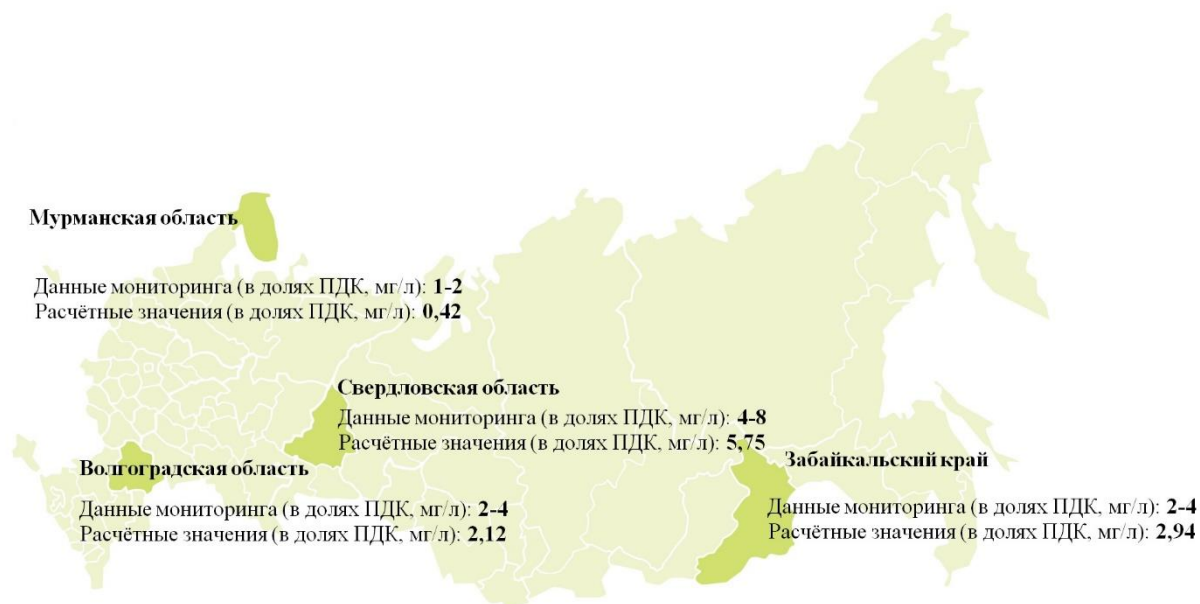


Рисунок 4 – Сравнение полученных при расчёте результатов с данными мониторинга

Оценка последствий внедрения плана по увеличению объёмов потребления фосфорных удобрений (рисунок 5), утверждённого распоряжением Правительства Российской Федерации от 29 марта 2018 г. No 532-р, в соответствии с которым максимальный прирост, как ожидается, будет иметь место в Краснодарском крае (+23%, 82 млн тонн), Ставропольском крае (+30% к уровню 2018 г., или +64 млн тонн), Тамбовской области (+40%, 50 млн тонн), Брянской области (+23%, 18 млн тонн), Республике Татарстан (+19%, 28 млн тонн), Орловской области (+23%, 23 млн тонн), Ростовской области (+13%, 35 млн тонн), показала что в Белгородской и Курской областях, Краснодарском крае и Карачаево-Черкесской Республике

¹¹ Steffen W. et al. THE ANTHROPOCENE REVIEW. — 2015. — PP. 1-18.

допустимый уровень антропогенной фосфорной нагрузки будет превышен более чем в 10 раз, а в Ставропольском крае допустимый уровень нагрузки будет превышен более чем в 20 раз, что может привести к негативным последствиям из-за снижения доступности водных ресурсов в указанных регионах.

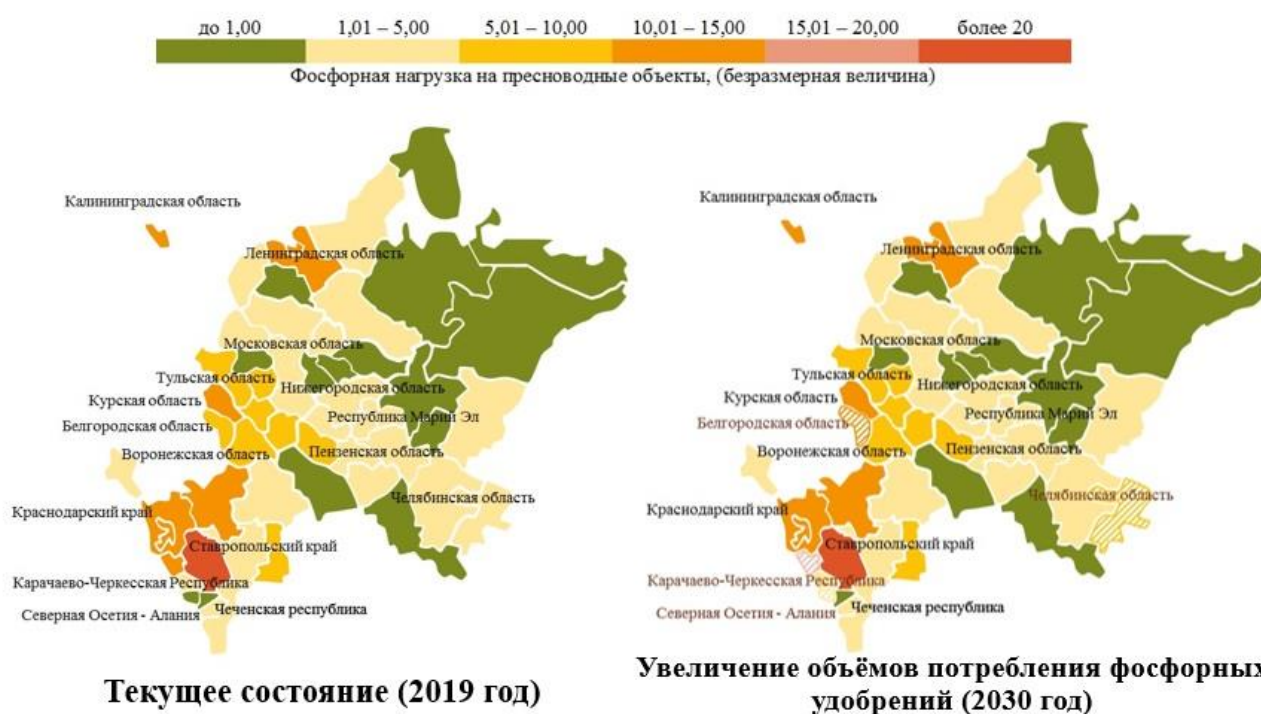


Рисунок 5 - Оценка последствий внедрения плана по увеличению объёмов потребления фосфорных удобрений на период 2030 г.

Примечание: наименования регионов, в которых произошло изменение уровня нагрузки, обозначены на рисунке красным цветом (Белгородская область, Челябинская область, Карачаево-Черкесская республика, Северная Осетия – Алания)

Научной группой под руководством Воросматри опубликован прогноз доступности водных ресурсов¹², результаты которого показывают повсеместное снижение доступности водных ресурсов в глобальном масштабе при увеличении таких параметров как численность населения планеты и глобальные климатические изменения. Увеличение уровня антропогенной фосфорной нагрузки также приведет к ухудшению качества и снижению уровня доступности пресной воды. Для подтверждения данного предположения относительно территории РФ, были произведены расчёты уровня антропогенной фосфорной нагрузки на период до 2045 года, включающие в себя такие параметры как климатические изменения и увеличение объемов потребления фосфорных удобрений.

В качестве наиболее достоверной модели, описывающей глобальные климатические изменения, выбрана модель общей циркуляции атмосферы и океана (МОЦАО), созданная в рамках проекта CMIP5¹³. В качестве основного параметра,

¹² Vörösmarty C.J. et al. Science. — 2000. — V. 289. — PP. 284-288.

¹³ URL: <https://www.wcrp-climate.org/wgcm-cmip/wgcm-cmip5>

описывающего глобальные климатические изменения в рамках данного исследования, была выбрана величина ежегодного количества выпадающих осадков, на основании значений которой произведён пересчёт общего объёма воды для рассматриваемых территорий. Визуальное представление полученных результатов приведено на рисунке 6.

Необходимо отметить, что для большинства регионов климатические изменения будут иметь положительный эффект, так как за счёт увеличения общего объёма воды произойдёт снижение уровня антропогенной фосфорной нагрузки. Но даже несмотря на увеличение общего объёма воды, в контексте климатических изменений, допустимый уровень нагрузки в Челябинской области будет превышен в 5 раз, а в Ставропольском крае - в 20 раз.

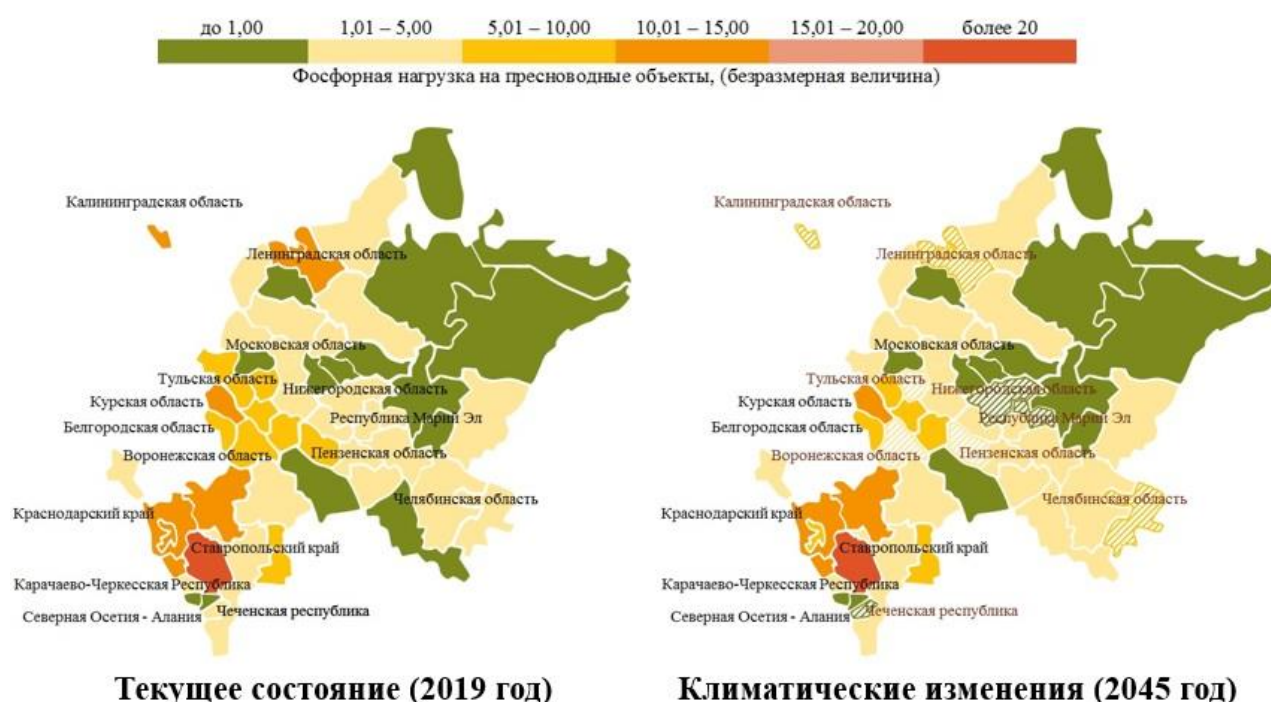


Рисунок 6 - Оценка влияния климатических изменений на уровень антропогенной фосфорной нагрузки на период 2045 г.

Примечание: наименования регионов, в которых произошло изменение уровня нагрузки, обозначены на рисунке красным цветом (Воронежская область, Калининградская область, Ленинградская область, Нижегородская область, Пензенская область, Тульская область, Челябинская область, Чеченская республика, Республика Марий Эл)

Для регионов, в которых уровень допустимой антропогенной фосфорной нагрузки превышен в 10 и более раз, автором исследования проведён детализированный анализ вклада источников поступления фосфора в формирование уровня нагрузки (рисунок 7), который показал, что для таких областей как Белгородская, Брянская и Ленинградская значительный вклад в формирование нагрузки могут вносить не только минеральные, но и органические удобрения.

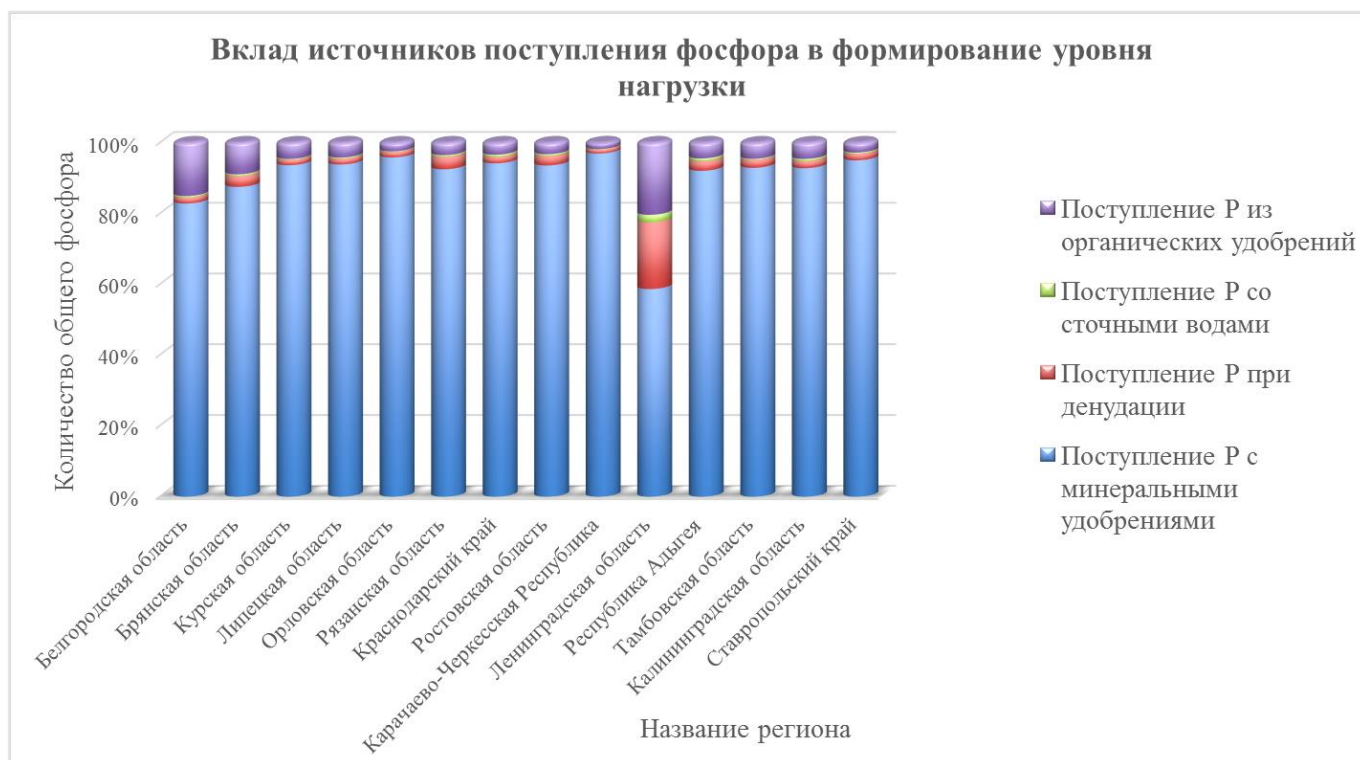


Рисунок 7 - Вклад источников поступления фосфора в формирование уровня нагрузки

В заключении автором излагаются выводы, результаты, предложения и практические рекомендации. Ниже приведены основные из них.

1. Разработанная автором исследования методика оценки уровня антропогенной фосфорной нагрузки на пресноводные объекты Российской Федерации позволяет осуществлять первичную оценку состояния водных систем регионов, а также даёт возможность использовать различные исходные сценарии.

2. Анализ и прогнозирование уровня антропогенной фосфорной нагрузки, с учетом изменения объемов потребления фосфорных удобрений и климатических параметров, показали, что к 2045 году уровень нагрузки на пресноводные объекты снизится в следующих субъектах РФ: Воронежская область, Калининградская область, Ленинградская область, Нижегородская область, Пензенская область, Тульская область, Чеченская республика, Республика Марий Эл. Увеличение уровня нагрузки прогнозируется в Челябинской области.

3. Предложенная методика расчётов использована в качестве одного из компонентов для оценки состояния промышленных площадок и принятия решений о необходимости проведения дополнительных инженерно-технических мероприятий с целью улучшения экологических показателей на промышленных площадках предприятий-членов Ассоциации «РОСХИМПРЕАКТИВ».

Основные результаты работы изложены в следующих публикациях:

В научных изданиях, индексируемых в международных системах SCOPUS и Web of Science:

1. Tarasova, N. P. Phosphorus within planetary boundaries / N.P. Tarasova, A.S. Makarova, **E.G. Vasileva** // Phosphorus, Sulfur and Silicon and the Related Elements. — 2016. — V. 191. — PP. 1447–1451.

2. Tarasova, N. P. Estimation of the phosphorus loading with consideration for the planetary boundaries (for the Russian Federation as an example) / N.P. Tarasova, A.S. Makarova, **E.G. Vasileva**, D.D. Savelova // Pure and Applied Chemistry. — 2017. — V. 89. — PP. 287–292.

3. Тарасова, Н. П. Оценка фосфорной нагрузки на пресные водоёмы субъектов Российской Федерации: моделирование миграции фосфора и его соединений между компонентами окружающей среды / Н.П. Тарасова, А.С. Макарова, **Е.Г. Васильева** и др. // Доклады Академии наук. — 2018. — Т. 480. — № 6. — С. 717–721.

Статьи, опубликованные в журналах из перечня ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, определяемого ВАК Минобрнауки РФ:

4. Макарова, А. С. Алгоритм расчета констант скоростей переноса химических веществ в гидросфере с использованием геоинформационных систем / А.С. Макарова, **Е.Г. Васильева** // Научный журнал Известия Самарского научного центра РАН. — 2017. — Т. 19. — № 4. — С. 139–148.

Участие в конференциях:

5. **Васильева, Е. Г.** Фосфор в пределах планетарных границ // Сборник тезисов Международной научно- практической конференции «Логистика и экономика ресурсосбережения и энергосбережения в промышленности» (МНПК «ЛЭРЭП- 10-2016). пос. Дивноморское. — 2016. — С. 252-258.

6. **Васильева, Е. Г.** Оценка влияния климатических изменений на биогеохимический цикл фосфора / **Е.Г. Васильева**, А.С. Макарова // Мат-лы 1-й Международной научно-практической конференции «Снежный покров, атмосферные осадки, аэрозоли: климат и экология северных территорий и Байкальского региона». — 2017. — Иркутск. — ИРНТУ. — С. 156-158.

7. **Vasileva, E. G.** Assessment of the Impact of Climate Change on the Biogeochemical Cycle of Phosphorus // 7th International IUPAC Conference on Green Chemistry. — 2017. — Moscow. — PP. 57-58.

8. **Васильева, Е. Г.** Биогеохимический цикл фосфора в контексте планетарных границ / **Е.Г. Васильева**, К.В. Пищаева, А.С. Макарова, И.В. Развин // XXXIX Международная научно-практическая конференция «Российская наука в современном мире». — 2021. — Москва. — «Научно- издательский центр «Актуальность.РФ». — С. 64-67.

9. **Васильева, Е. Г.** Оценка фосфорной нагрузки для субъектов РФ с учётом интенсификации производства фосфорных удобрений / **Е.Г. Васильева**, А.С. Макарова, К.В. Пищаева // Материалы IX Международной научно-практической конференции «Биотехнология: наука и практика». — 2021. — Ялта. — С. 229.

Свидетельства о праве на объекты интеллектуальной собственности:

10. База данных для расчёта антропогенной фосфорной нагрузки на пресноводные объекты субъектов Российской Федерации / **Е.Г. Васильева**, А.С. Макарова, К.В. Пищаева, А.С. Васильев, И.В. Развин // Свидетельство о государственной регистрации базы данных RU 2021622068, 04.10.2021. Заявка № 2021621846 от 03.09.2021.