

ОТЗЫВ

официального оппонента

Макеева Владимира Михайловича на диссертацию Яковлева Евгения Юрьевича «Изотопно-радиогеохимические методы оценки геоэкологической обстановки Западного сектора Российской Арктики», представленную на соискание учёной степени доктора геолого-минералогических наук по специальности 1.6.21. Геоэкология

Диссертационная работа Яковлева Е.Ю. посвящена **актуальной** проблеме, связанной с необходимостью обеспечения экологической безопасности Российской Арктики в условиях возрастающего интереса к хозяйственному освоению региона и глобального потепления климата.

Одним из важнейших аспектов, обеспечивающих сохранение экологической устойчивости в Российской Арктике, является оценка радиоэкологического состояния компонентов природной среды, что связано со значительным техногенным радиационным воздействием, которому в особенности подверглись территории Западного сектора Российской Арктики (полигон на Новой Земле, мирные ядерные взрывы, объекты «ядерного наследия», пункты захоронения радиоактивных отходов и т.д.). Потенциальная радиационная опасность может быть связана с природными источниками радиации, такими как добыча полезных ископаемых, сопровождающаяся эмиссией в окружающую среду радионуклидов. Климатические изменения и связанная с ними деградация мерзлоты также играет свою роль в ускорении миграции радионуклидов, что требует контроля и прогноза естественной радиационной обстановки. В связи с этим, оценка радиационного загрязнения арктических экосистем и возможных путей радиационного воздействия на биоту требуют проведения исследований накопления и распределения радиоактивных изотопов в различных компонентах экосистем, анализ источников загрязнения и разработки моделей миграции радионуклидов в окружающую природную среду. Решению этих проблем и посвящена рассматриваемая диссертационная работа.

Структура диссертации. Диссертация состоит из введения, семи глав и заключения, включает 311 страниц текста, 77 рисунков, 8 таблиц. Работа сопровождается внушительным списком литературы из 708 наименований, из которых более трети иностранные, что говорит о хорошем владении имеющимся в печати материалом по теме исследования, что в свою очередь крайне важно для корректной постановки проблемы исследования.

В **главе 1** на основании рассмотрения обширного перечня литературных данных о распределении радиоактивных элементов в экосистемах арктических территорий определен ряд вопросов, которые в настоящее время не ре-

шены и составляют суть проблемы корректной оценки радиогенного загрязнения природных сред Российской Арктики, учитывающей совокупность разнообразных источников воздействия природного и техногенного характера. **Глава 2** посвящена характеристике природных условий региона исследований – Западного сектора Российской Арктики, что важно для формирования комплексного представления о рассматриваемой территории. В главе дано описание географического положения региона, геолого-тектонические, геоморфологические, геокриологические, ландшафтно-климатические, а также почвенно-растительные условия. **Глава 3** посвящена подробному освещению *методологических подходов* к использованию изотопно-радиогеохимических методов, в т. ч. вспомогательных полевых и лабораторных физико-химических методов. Большое внимание уделено описанию процедур контроля результатов аналитических измерений, что позволяет оценить полученные лабораторные данные как качественные и представительные. **Глава 4** посвящена проблеме фоновых концентраций радионуклидов в прибрежных и морских экосистемах Арктики, отражающих геохимические процессы в зоне гипергенеза и определяющих дальнейшее освоение ресурсов континентального шельфа и совершенствование природоохранных мероприятий. Автором рассмотрены источники техногенного радиационного загрязнения Российской Арктики, дана оценка формированию дозовых нагрузок на биоту от естественных и антропогенных источников. *Материалы данной главы вошли в первое защищаемое положение.* **Глава 5** посвящена решению проблемы комплексной оценки воздействия горнотехнической деятельности на водные арктические экосистемы на примере добычи и разработки алмазоносных кимберлитов в Архангельской области, оценке негативного воздействия на биоту и человека. *По результатам этих материалов сформулировано второе защищаемое положение.* В **главе 6** рассматривается влияние потепления климата на эмиссию радиоактивных элементов в Арктике в связи с изменениями в криолитозоне, обуславливающих трансформацию естественного радиационного фона. *Материалы этой главы использованы для обоснования третьего защищаемого положения.* В **главе 7** рассматривается проблема использования изотопно-радиогеохимических методов для поисков месторождений нерадиоактивных полезных ископаемых на примере алмазоносных кимберлитов Архангельской области и прогнозирования радиогенной обстановки приуроченной к структурам, контролирующим рудные месторождения. *Эти материалы использованы при формулировании четвертого защищаемого положения.* В **Заключение** приводятся основные выводы, сделанные автором диссертационной работы, которые четко и аргументированно сформулированы, и соответствуют содержанию работы.

По итогам диссертационной работы соискатель выносит на защиту четыре защищаемых положения.

Первое защищаемое положение содержит вывод о том, что изотопно-радиогеохимические методы, основанные на оценке распределения и миграции радионуклидов естественного и антропогенного происхождения в компонентах природной среды Западного сектора Российской Арктики, их изотопных и атомных отношений, позволяют выполнить идентификацию источников загрязнения, использовать радионуклиды в качестве хронометрических маркеров, определить их биологическое воздействие и выполнить прогноз изменения радиоэкологической обстановки под влиянием природных и техногенных факторов. Положение базируется на исследовании основных депонирующих сред, обладающих повышенной аккумулярующей способностью по отношению к радионуклидам – *морских донных осадков и прибрежных торфяных отложений, которые являются представительными информативными объектами*, отражающими текущую радиоэкологическую обстановку и динамику исторических радиационных воздействий. Доказательство положения основано на обширном фактическом материале, сопровождаемом наглядными рисунками, схемами и графиками. Выводы также хорошо иллюстрируются результатами экспериментального моделирования процессов связывания радионуклидов верховым торфом, а также данными математического моделирования применительно к датированию торфяных отложений, характеризующихся нарушенным распределением изотопов. *Положение полностью доказано.*

Второе защищаемое положение содержит вывод о том, что использование изотопно-радиогеохимических методов позволяет выполнить количественную оценку воздействия горнотехнической деятельности на объекты окружающей среды, связанные с трансформацией радионуклидного и химического состава водных экосистем Западного сектора Российской Арктики. Доказательство защищаемого положения базируется на данных, полученных при исследовании района месторождения алмазов им. М.В. Ломоносова в Архангельской области, который рассматривается как модельный представительный объект для Арктики. Этот район характеризуется комплексным воздействием на природную среду, возникающим при добыче полезных ископаемых открытым способом. Воздействие выражено нарушением природных ландшафтов, постоянным увеличением площадей занятых под отвалы и хвостохранилища, загрязнением атмосферы в результате дробления пород и пылением отвалов, возникновение антропогенных геохимических аномалий, загрязнением водной среды в результате сброса карьерных и сточных вод и др. видами. Диссертантом выявлены закономерности распределения радионуклидов в природно-техногенных образованиях района алмазодобычи в Архан-

гельской области и установлена приуроченность повышенных содержаний радионуклидов в речных водах и донных отложениях к местам разгрузки минерализованных дренажных вод с болот-полей фильтрации в речную сеть. Автор показал, что среди естественных радионуклидов основные экологические риски для водной биоты района алмазодобычи связаны с накоплением урана, к повышенным концентрациям которого наиболее чувствительны донные беспозвоночные.

Важным результатом является то, что предложенный соискателем подход к оценке экологического состояния районов горнотехнической деятельности с использованием изотопно-радиогеохимических методов может быть распространен на другие районы добычи твердых полезных ископаемых в Западном секторе Российской Арктики, месторождения которых ассоциированы с уран и торий содержащими минералами или имеют фоновые содержания естественных радиоактивных элементов. Таких объектов особенно много на Кольском полуострове и Карелии, что определяет востребованность и практическую ценность результатов диссертанта. *Положение полностью доказано.*

Третье защищаемое положение доказывает, что радиоактивные изотопы уранового ряда ^{238}U отражают процессы деградации многолетней мерзлоты и могут быть использованы в качестве трассеров при исследовании состояния криолитозоны и оценки радиационного качества подземных вод. Для обсуждения этого вывода диссертант привлекает обширный литературный материал, который подкрепляется данными собственных полевых и лабораторных исследований. Основной вывод, убедительно показанный автором, заключается в том, что глобальное потепление климата, отражающееся на изменении параметров многолетнемерзлых пород, обуславливает трансформацию естественного радиационного фона в районах с фоновым содержанием естественных радиоактивных элементов. Для рассматриваемого района такая трансформация в первую очередь выражается в увеличении эманаций радона-222 и продуктов его распада, а также накоплении избытков урана-234 в природных водах. Автором показана вероятность ускорения миграции и техногенных радионуклидов, накопленных с начала атомной эры в почвах, торфяниках и ледниковом покрове Арктики, поскольку потепление климата приведет к их мобилизации. *Положение полностью доказано.*

Четвертое защищаемое положение содержит вывод о том, что выявленные соискателем закономерности распределения радионуклидов уранового ряда в осадочном чехле областей развития кимберлитового магматизма являются дополнительными признаками для поисков структур контролирующей трубки взрыва и прогнозирования радоноопасности северных территорий. Материалами, лежащими в основе защищаемого положения, являются

данные, полученные автором в ходе изучения трех районов проявлений кимберлитового магматизма Архангельской алмазоносной провинции: 1) Золотницкого, 2) Мегорского и 3) Чидвинско-Ижмозерского поля. Обширный материал, привлекаемый к доказательству положения, включал как данные полевых измерений (гамма-поле, объемная активность радона), так и данные экспериментальных лабораторных определений (валовые содержания радионуклидов и их изотопные отношения, формы нахождения, коэффициент эманации, скорость продуцирования радона). Для количественной оценки формирования объемной активности радона, которая может наблюдаться в почвенном воздухе при проведении полевых эманационных исследований, соискателем было выполнено теоретическое моделирование переноса радона в массиве пород на основе полученных в лаборатории радиационно-физических параметров горных пород, слагающих кимберлитовое поле. При этом результаты моделирования переноса радона в целом подтвердившие данные полевых измерений, указывают на применимость модели для прогноза наблюдаемого распределения объемной активности радона в пределах трубок. Эти материалы имеют не только важнейшее геоэкологическое значение, связанное с оценкой формирования радиогенных нагрузок на биоту и человека, но и геохимическое значение, направленное на понимание геологических процессов протекающих в земной коре и индикацию различных геохимических обстановок, связанных с месторождениями полезных ископаемых.

Научная новизна диссертации заключается в следующем:

- впервые для торфяных отложений получены данные по распределению радионуклидов естественного и техногенного происхождения, предложены методические подходы к их датированию для количественной оценки потока загрязняющих веществ на поверхность торфяников и уточнения их роли в накоплении атмосферного углерода.

- установлены закономерности концентрирования радионуклидов в донных отложениях района добычи алмазов в Архангельской области, связанные со специфическим составом кимберлитов, выветрелых до глинистого состояния (сапонитов), и предложен комплекс экологической оценки районов добычи твердых полезных ископаемых, учитывающий, в т.ч. радиогенные нагрузки.

- показано, что глобальное потепление климата, отражающееся на изменении параметров криолитозоны, может обуславливать трансформацию естественного радиационного фона, что необходимо учитывать при оценке и прогнозе радоноопасности, радиационных исследованиях питьевых подземных вод.

- выявленные закономерности распределения изотопов уранового ряда в основных типах пород кимберлитового поля, могут служить основой для совершенствования технологии поисков структур, контролирующей трубки взрыва, а также для прогнозирования радоноопасности территорий развития кимберлитового магматизма в Арктике.

Практическая ценность работы заключается в целесообразности и эффективности использования изотопно-геохимических данных для разработки программ обеспечения устойчивого развития Арктической зоны России, в т.ч. для организации радиационно-экологического мониторинга, снижения экологических рисков, планирования природоохранных мероприятий, экологических прогнозов, реализации новых подходов к индикации процессов трансформации экосистем под воздействием природных и антропогенных факторов. Результаты выполненных исследований используются при проведении мониторинговых работ по оценке радиационного качества питьевых подземных вод в Архангельской области, а также в учебном процессе при чтении курса «Техногенез и формирование природно-техногенных ландшафтов» и подготовке аспирантов в ФИЦКИА УрО РАН.

Обоснованность и достоверность результатов исследования и выводов диссертации определяется большим объемом фактического материала (более тысячи образцов), собранным лично автором в ходе экспедиционных и лабораторных работ и включающим результаты их изучения. Достоверность результатов подтверждается применением *современных* аналитических методов, а также выполнением исследований в *аккредитованных* лабораториях, обеспеченных контролем качества измерений. Следует отметить хорошую проработку литературных данных, корректную постановку задач, грамотное планирование полевых и экспериментальных исследований, тщательный анализ полученных материалов и обоснованность выводов, что подтверждает высокую квалификацию соискателя. Исследования по теме диссертации поддержаны многочисленными *грантами* (Президента РФ, РНФ, РФФИ и т.д.) в которых соискатель является руководителем, что подтверждает востребованность и актуальность проводимых автором исследований.

По теме диссертации опубликовано 90 научных работ, в т.ч. 34 статьи в журналах, входящих в перечень ВАК, 51 статья в журналах Web of Science и Scopus, 5 коллективных монографий. Большой объем публикаций автора свидетельствует о хорошей представленности и полноте освещения результатов исследования в открытой печати, в т.ч. в высокорейтинговых международных журналах. Результаты исследований многократно докладывались соискателем на научных конференциях, совещаниях и круглых столах всероссийского и международного уровня, что подтверждает высокий уровень апробации материалов в среде экспертного сообщества.

Рекомендации по использованию результатов исследований. Автором проведена крайне актуальная и корректная оценка радиогенных нагрузок на экосистемы Российской Арктики. Полученные результаты являются ценными в области организации радиационно-экологического мониторинга, снижения экологических рисков, планирования природоохранных мероприятий, экологических прогнозов, реализации новых подходов к индикации процессов трансформации экосистем под воздействием природных и антропогенных факторов.

Автореферат отражает основное содержание диссертации.

При рассмотрении диссертационной работы возникли следующие **замечания**.

- В главе 1, посвященной описанию радиационного загрязнения природных сред Арктики, среди источников техногенной радиоактивности соискатель не упоминает радиоизотопные термоэлектрические генераторы (РИТЭГи), которые широко применялись на крайнем Севере в советское время в качестве источников электроэнергии. Отслужившие свой срок генераторы в 90-е годы были источником радиационного загрязнения местности и причиной смерти людей. Кроме этого, в качестве источников техногенной радиоактивности в Арктике не рассматривается авария американского бомбардировщика Б-52 с ядерными бомбами на борту в 1968 году в Гренландии, аварии спутников с ядерными двигателями в 60-70-х годах. Соискателю следовало хотя бы кратко описать эти источники загрязнения.
- Автором в главе 3 достаточно подробно описаны методы определения радионуклидного состава в изучаемых объектах, к чему у меня (оппонента) нет замечаний. Однако хотелось бы увидеть более подробное обоснование выбора в качестве ключевых физико-химических показателей, набор параметров, представленных в разделе 3.2.
- В главе 4 не приводятся данные по содержанию естественного радионуклида урана в прибрежных арктических торфяниках. Определялся ли уран в изученных торфяниках, если да, то какие концентрации обнаружены? Возможно, уран будет вносить наиболее существенный вклад в дозовые нагрузки для биоты, обитающей в пределах болотных массивов и для человека при промышленном использовании торфа. Известно, что торфяники являются эффективным органогенным геохимическим барьером для урана. В России и ряде других стран, таких как Швеция, США, Великобритания, в торфяниках обнаружены многочисленные поверхностные месторождения урана, некоторые из которых по содержанию U могут рассматриваться как промышленные источники урановой руды.

- Почему соискатель среди ряда методов датирования, которые часто применяются к молодым осадочным отложениям (например, радиоуглеродный), в своем исследовании рассматривает лишь метод неравновесного свинца-210? Хотелось бы увидеть сравнение данных различных методов применительно к изучаемым объектам – торфяникам, чтобы оценить применимость и корректность методики датирования по свинцу.
- В главе 5 было бы желательно привести данные о накоплении радионуклидов в рыбе, обитающей в водных объектах, непосредственно подверженных влиянию горнотехнической деятельности.
- Показанные в главе 6 экспериментальные данные отчетливо свидетельствуют о повышении эмиссии техногенных и естественных радионуклидов в окружающую среду Арктики в связи с глобальным потеплением климата, что, вероятно, будет иметь влияние на ухудшение радиоэкологической обстановки и рост заболеваний. Поскольку наиболее выраженный тренд роста среднегодовых температур на планете и связанных с ним негативных климатических явлений фиксируется последние 30-40 лет, есть ли за этот период данные по уровням онкологических заболеваний жителей Арктики, которые можно было бы связать с воздействием дополнительных доз радиации?
- На территории Архангельской алмазодобывающей провинции известны различные типы алмазосодержащих пород, это не только кимберлиты (с наибольшим содержанием алмазов), но и щелочные пикриты, оливиновые мелилититы, к тому же форма магматических тел не только трубчатая, но и в форме даек и силлов. Будут ли по-разному отражаться в радиогеохимических полях (радон, уран) различные типы родственных кимберлитам ультраосновных пород, развитых на территории Архангельской алмазодобывающей провинции?

Выводы

Диссертация Яковлева Е.Ю. выполнена на достаточно высоком научном уровне и представляет собой законченную научно-квалификационную работу, в которой решена проблема корректной оценки геоэкологической обстановки Западного сектора Российской Арктики, учитывающей комплексное воздействие на экосистемы техногенных и климатических факторов. Полученные новые знания определяют целесообразность и эффективность предложенных в работе подходов к использованию изотопно-радиогеохимической информации для совершенствования мониторинга окружающей среды в Арктике, реализации новых подходов к индикации процессов трансформации экосистем, обеспечения экологической безопасности территории в условиях изменения климата и развития крупных промышлен-

