

**ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА**  
на диссертационную работу Полетаевой Веры Игоревны  
**«ГЕОЭКОЛОГИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА СОПРЯЖЕННЫХ СРЕД  
«ВОДА – ДОННЫЕ ОТЛОЖЕНИЯ» И ГЕОХИМИЧЕСКИЙ ОТКЛИК  
КРУПНОЙ ВОДНОЙ СИСТЕМЫ НА АНТРОПОГЕННОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ  
(Р. АНГАРА И КАСКАД ЕЕ ВОДОХРАНИЛИЩ)», представленную на соискание  
ученой степени доктора геолого-минералогических наук по специальности  
1.6.21–Геоэкология**

Актуальность работы и ее проблематика являются исключительно высокими, поскольку посвящены сохранению уже значительно трансформированной в результате хозяйственной деятельности человека уникальной пресноводной Байкало-Ангарской системы. Река Ангара – единственный сток чистейшего пресного озера Байкал. Превращение реки в систему проточных водоемов озерного типа (Ангарскую водную систему) связано с созданием на ней каскада водохранилищ – Иркутского, Братского, Усть-Илимского и Богучанского. Помимо создания каскада водохранилищ, уязвимость пресноводной Ангарской системы значительно усиливают расположенные в ее бассейне крупные промышленные агломерации. Основные направления научных исследований Полетаевой В.И.: установить источники поступления элементов в водоем; определить факторы формирования химического состава абиотических и биотических компонентов, факторы самоочищения и/или, напротив, деградации водной системы. Это позволит оценить возможность миграции элементов при изменении условий окружающей среды и вероятность их попадания в живые организмы, сделать прогноз развития природно-антропогенных водных экосистем, а также разработать научно-обоснованные стратегии для предотвращения деградации природных комплексов.

**Цель работы** – выявить особенности и закономерности, определяющие функционирование крупной природно-антропогенной водной системы (р. Ангара и созданный на ней каскад водохранилищ), и установить факторы, обуславливающие геохимические циклы элементов в период антропогенеза.

Результаты исследования отражены в отчетах тем госзадания ИГХ СО РАН, проектов РФФИ, в которых автор являлся руководителем (№ 12-05-98089-р\_сибирь\_a, № 16-05-00891) и исполнителем (№ 09-05-00884-а, № 14-45-04171, № 17-45-388089 р\_a), международного проекта «Mercury species and mercury isotopic Fractionation in the food chain of Lake Baikal», интеграционного проекта «Динамика и устойчивость природных экосистем Восточной Сибири в условиях изменения глобального и регионального климата и возрастающей антропогенной нагрузки» в интеграционной программе ИНЦ СО РАН (№ 0341-2016-0001), крупного научного проекта «Фундаментальные основы, методы и технологии цифрового мониторинга и прогнозирования экологической обстановки

Байкальской природной территории» (№ 075-15-2020-787), государственных контрактов (№ 16/12, № 63-57-31/12, № 63-41-34/14), что свидетельствует о значимости работы.

Диссертация производит очень хорошее впечатление как интересная научная работа, внесшая большой вклад в понимание современного состояния Байкало-Ангарской системы.

**Научная новизна работы** обусловлена использованием комплекса современных методов и подходов на основе многолетних работ и широкомасштабного мониторинга:

- впервые на современном научно-методическом уровне выполнен детальный анализ пространственно-временной динамики гидрохимического состава р. Ангары и каскада ее водохранилищ (протяженность участка исследований от истока реки до плотины Богучанской ГЭС более 1400 км). Исследования, проведенные на взаимосвязанных между собой водоемах единой Ангарской системы, позволили оценить трансформацию гидрохимического состава р. Ангары после стока из оз. Байкал с учетом воздействия на нее природных и антропогенных источников.

- изучение особенностей распределения, накопления и миграции элементов в системе «вода – донные отложения» позволило выявить наиболее антропогенно-нагруженные участки Ангарской водной системы. Показано, что природные и антропогенные факторы формирования химического состава вод и донных отложений каждого водного объекта действуют взаимосвязано, определяя эволюцию всей Ангарской водной системы.

-показано, что образованные после зарегулирования реки геохимические барьеры препятствуют распространению элементов техногенного происхождения по акватории водохранилища, а значит, являются одним из основных факторов, определяющих процессы самоочищения водных экосистем.

-методически обоснована возможность использования результатов гидрохимических исследований истока р. Ангары в качестве индикаторных геохимических критериев.

**Полученные соискателем результаты исследования имеют значительную теоретическую и практическую значимость:** в работе в качестве региональных фоновых концентраций элементов предлагается использовать результаты по гидрохимическому составу истока р. Ангары, полученному за долговременный период наблюдений; исследования, проведенные на р. Ангаре до создания Богучанского водохранилища и во время его заполнения являются неповторимыми наборами данных, с помощью которых можно доказательно оценить последствия, связанные с переходом водоемов от речного режима в режим водохранилища. Изучение изменений жизнеобеспечивающих ресурсов геосферных оболочек Земли под влиянием природных и

антропогенных факторов, их охрана, рациональное использование и контроль с целью сохранения для человека продуктивной природной среды является одним из приоритетных направлений экологической политики РФ. Предложенная система мониторинга сформирует основу для корректировки существующих требований в области нормирования уровней загрязнения окружающей среды, что является стратегически важным для водных объектов Байкало-Ангарской водной системы – основного резервного фонда по запасам пресных питьевых вод не только для РФ, но и для всего мира.

**Обоснованность и достоверность сделанных в диссертации выводов** определяются: объектами исследования (вода и донные отложения единой водной системы р. Ангары и таких водохранилищ как Иркутское, Братское, Усть-Илимское и Богучанское); большим фактическим материалом; современными аналитическими методами, примененными в работе, что позволило изучить широкий круг микроэлементов, которые, ранее в Ангарской водной системе были изучены крайне недостаточно; квалификацией автора при обработке аналитических данных; тщательностью проводимых исследований и грамотным анализом литературных данных.

Содержание автореферата соответствует содержанию рукописи диссертационной работы и последовательности представления материала в диссертации. Таким образом, цель и задачи оцениваемого исследования соискателем были полностью решены.

Представленные в диссертации результаты исследований апробированы в докладах на более 12 международных и всероссийских конференциях, 32 статьи опубликованы в рецензируемых изданиях из перечня ВАК и баз цитирования WoS и Scopus, 2 работы в коллективных монографиях, 1 работа в Государственном докладе. Этого достаточно для подтверждения квалификации, т.е. результаты работы достаточно широко освещены и апробированы.

Диссертация состоит из введения, 5 глав, заключения, списка литературы, включающего 358 наименований, и двух приложений. Общий объем – 279 стр., включая 53 рисунка и 53 таблицы.

Во введении соискатель описывает актуальность проводимых исследований, определяет цель, задачи и объекты исследования, характеризует фактический материал, на котором базируются результаты, научная новизна и выносимые соискателем на защиту положения.

В первой главе представлены основные характеристики и условия формирования р. Ангары и каскада её водохранилищ.

Вторая глава посвящена методологии исследования, в ней рассмотрено состояние проблемы, показаны карты-схемы отбора проб, описаны методы отбора проб, подготовка их к анализу и т.д.

В третьей главе приведен анализ пространственно-временной динамики химического состава вод и изучение факторов формирования Ангарской системы показали, что каждый водоем имеет свои гидрохимические особенности, обусловленные поступлением элементов из природных и антропогенных источников (дисс. стр. 41, 1-е защищаемое положение).

В четвертой главе исследована система «вода – донные отложения» в разные по антропогенной нагрузке периоды в Братском и Усть-Илимском водохранилищах (2-4 защищаемые положения).

В пятой главе дана оценка антропогенного воздействия и предложено использовать концентрации микроэлементов в воде истока р. Ангары, полученные за долговременный период наблюдений, в качестве индикаторных геохимических критериев, отражающих природные условия формирования и позволяющих объективно оценить вызванные антропогенной деятельностью изменения гидрохимического состава водоемов Ангарской системы (5-е защищаемое положение).

В заключение диссертации Полетаевой В.И. сформулированы выводы проведенной работы в соответствии с поставленными задачами.

#### **К наиболее важным научным результатам следует отнести следующие:**

1. По результатам долговременных исследований (с 1950 г. по настоящее время) системы «Байкал-Ангара» установлены близкие значения величины минерализации и гидрокарбонатный кальциевый состав их вод, невысокая пространственно-временная изменчивость концентраций главных ионов, даже в период значительной антропогенной нагрузки (1984-1995 гг.), что указывает на природное единство р. Ангары и оз. Байкал. Сопоставляя концентрации главных ионов р. Ангары и оз. Байкал (табл. 3.1.1, стр. 66-67) с рекомендуемыми концентрациями в питьевых водах (Назаров, Зарубина, 2010) можно отметить практически идеальное соответствие всех показателей кроме значений рН. В работе (Назаров, Зарубина, 2010) рН изменялся в пределах 6,8 -7,2 ; рН р. Ангары изменялся в пределах 7,4-8,0 (2021-2022 гг.).

2. Впервые получены количественные данные по широкому спектру микроэлементов (53 элемента) в водах истока р. Ангары, как регионально фоновые, что позволило выявить негативные изменения качества вод ангарской системы.

3. Результаты мониторинговых исследований показывают (табл. 3.2.1, стр. 88), что по концентрации (мг/л)  $\text{HCO}_3^-$  (65,5),  $\text{Cl}^-$  (0,85),  $\text{SO}_4^{2-}$  (5,5),  $\text{Ca}^{2+}$  (15,4),  $\text{Mg}^{2+}$  (3,3),  $\text{Na}^+$  (3,2),  $\text{K}^+$  (1,0) вода Иркутского водохранилища характеризуется невысокой пространственно-временной изменчивостью. Значения рН изменялись в пределах 6.4-8.6 (2007, 2012, 2021гг.).

4. Исследования позволили выявить седиментационные геохимические барьеры, на которых происходит осаждение взвешенного материала, поступающего с промышленных территорий. Для Ангарской системы выделено два наиболее значимых барьера:

- основной геохимический барьер находится под воздействием наиболее серьезной антропогенной нагрузки, связанной с загрязнением предприятиями Усольской промышленной зоны (более 90 км, стр. 171, о. Конный (72 км, глубина 12 м, табл. 2.2.2., стр. 49, стр. 132). В период высокой антропогенной нагрузки (2003 г.) в поверхностной и придонной воде этого участка повышались концентрации Al (>ПДК), Cr, Fe (>ПДК), Cu, Cd, Cs, U(>ПДК) и Hg (рис. 3.3.9). Увеличение концентраций Al, Cr, Fe, Cu, Zn, Cd, Cs, U в 2018 г. (рис. 3.3.10) показывает, что поступление элементов антропогенного генезиса в Братское водохранилище в меньших объемах продолжается, при этом отмечены повышенные концентрации элементов в придонных водах относительно поверхностных. На примере ртути, поступающей в Братское водохранилище от предприятия «Усольехимпром», показано, что благодаря сорбции на взвешенных частицах и их последующего выведения в донные отложения происходит уменьшение концентраций токсиканта в водной среде. В донных отложениях верхней, наиболее техногенно нагруженной части Братского водохранилища, помимо ртути, содержатся высокие концентрации Pb и As, также обуславливающие специфику техногенного загрязнения района исследования. Распределение элементов по глубине донных отложений и затопленных почв верхней части водохранилища показало, что основной закономерностью накопления Cu, Zn, Pb, As, также как Hg, является приуроченность их высоких концентраций к периодам интенсивной работы химических предприятий. Присутствие в донных отложениях потенциально токсичных элементов в подвижных и потенциально подвижных формах определяет, что донные отложения являются потенциальными источниками вторичного загрязнения водной среды (стр. 234). Ответные реакции живых организмов подтвердили негативные изменения качества вод этого участка (стр. 224).

**Оценка качества вод Братского водохранилища.** Значения CF, рассчитанные с использованием в качестве контрольного материала концентраций микроэлементов в воде истока р. Ангары в различные по антропогенной нагрузке периоды, обуславливают низкое, умеренное, значительное и очень высокое загрязнение вод Братского водохранилища. Средние значения CF (рис. 5.1) выделяют умеренное загрязнение вод по большинству микроэлементов. Очень высокое загрязнение отмечено для Al в 2003 г. (20,69), Mn в 2003

г. (6,64) и 2018 г. (7,96), Fe в 2003 г. (6,45), Cd в 2003 г. (7,92) и 2009 г. (22,09), Cs в 2003 г. (11,28), Pb в 2012 г. (6,49), значительное загрязнение для Al в 2018 г. (3,51), Pb в 2003 г. (5,74), Hg в 2003 г. (5,78)(стр. 233).

-седиментационный геохимический барьер (Усть-Илимского водохранилища) сформировался на участке смешения загрязненных вод реки Вихорева и Вихоревского залива, в условиях замедления водообмена в 2 км ниже устья р. Вихорева (стр. 191) (более 100 см., глубина 19 м, стр. 53). Гидрохимические исследования, проведенные в р. Вихорева, показали значительное увеличение минерализации вод реки после поступления в нее сточных вод (табл. 3.4.2, стр. 142). Из компонентов основного ионного состава наибольшим вариациям подвержены концентрации ионов хлора (73 раза), натрия (60 раз), калия (10 раз), сульфат-ионы (2,2 раза), которые относятся к основным загрязняющим компонентам лесоперерабатывающей промышленности. Отмечается увеличение концентрации  $C_{орг}$  (от 48,8 до 368 мг/л), изменение концентрации  $O_2$  от 9,2 до поступления сточных вод до 0,3 мг/л в устье реки. Исследования поровых вод показали накопления микроэлементов в донных отложениях залива поступающих с водным потоком р. Вихорева (табл. 3.4.3, стр. 146). Mn присутствует в концентрации  $\cdot 10^3$  мкг/л, Fe –  $\cdot 10^2$ - $\cdot 10^3$  мкг/л, Al –  $\cdot 10^1$ - $\cdot 10^2$  мкг/л, Zn, Cr, Cu, Co –  $\cdot 10$  мкг/л, As –  $\cdot 10$ - $\cdot 10^1$  мкг/л, Pb –  $\cdot 10$ - $1$  мкг/л, Cd –  $\cdot 10$ - $1$  мкг/л, Hg –  $\cdot 10$ - $2$ - $\cdot 10$ - $1$  мкг/л (рис. 4.2.2.)

При этом, в барьерной зоне доли подвижных (водорастворимая, легкообменная) и потенциальных подвижных (карбонатная, органическая, аморфных гидроксидов) форм элементов в донных отложениях значительно выше, а закрепленных форм (легкоразрушающихся и труднорастворимых силикатов) ниже, чем в устье Вихоревского залива (стр. 196, рис. 4.23, автореферат стр. 32). При разрушении органического вещества, связанные с ним элементы освобождаются. Высокие концентрации железа (до 1,597 мг/л, выше ПДК – 0,3 и НПБЗК – 0,375) в придонной воде следствие миграции элементов из донных осадков в водную толщу (рис. 4.2.2, стр. 200). Повышенные концентрации (мг/л) Al (0,8 при ПДК – 0,2), Mn (4 при ПДК – 0,1 НПБЗК – 0,0925), Fe, Cr, Co, Cu, Zn в придонной воде барьера, относительно их концентраций в поверхностной воде и устья р. Вихорева, определяют диффузионный поток микроэлементов из донных отложений в водную среду залива. Активизации ремобилизации элементов в придонную воду способствует смена уровня водоема, ветровое перемешивание вод, смена окислительно-восстановительных условий и т.д., т.е. происходит вторичное загрязнение придонных вод.

**Оценка качества вод Усть-Илимского водохранилища.** Значения индекса CF, рассчитанные с использованием в качестве контрольного материала концентраций микроэлементов в воде истока р. Ангары, показывают, что качество вод по мере течения реки значительно ухудшается. Средние значения CF (рис. 5.3) выделяют низкое и

умеренное загрязнение вод на всех участках водохранилища только по концентрациям Zn, Cu, As, а также Hg (за исключением Вихоревского залива). В категорию высокого и очень высокого загрязнения попадают воды русловой части и Вихоревского залива водохранилища по Al, Mn, Cd, Pb. Воды, подверженные антропогенному воздействию от Братской промышленной зоны (I, II участки и Вихоревский залив), по концентрации Cr – значительного и очень высокого загрязнения, воды III и IV участков водохранилища – умеренно загрязненные.

#### 5. Река Ангара и Богучанское водохранилище.

Само зарегулирование реки стало еще одним антропогенным фактором, повлиявшим на геохимию главных ионов в воде р. Ангары (изменение температурного режима с 7°C в 2007 г. до 8,8 в 2014 г., до 13°C в 2015 г., стр. 153). В воде Богучанского водохранилища произошло увеличение средних концентраций  $\text{SO}_4^{2-}$ , Cl,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ , которые при заполнении водохранилища до проектной отметки и стабилизации уровня не снизились до уровня их концентраций в воде р. Ангары (2007 г.) (табл.3.5.1, стр.155). Отличительной особенностью катионного состава Богучанского водохранилища является увеличение доли  $\text{Na}^+$  над  $\text{Mg}^{2+}$  (табл. 3.5.1). Из природных факторов на формирование режима главных ионов в воде Богучанское водохранилище по-прежнему большое влияние оказывает сток оз. Байкал, трансформированный в вышерасположенных водохранилищах р. Ангары, а также выветривание пород, представленных, в основном, карбонатами или обогащенными карбонатами силикатами. Одним из факторов, который может определять вариации главных ионов при увеличении уровня воды, может являться изменение гидрогеохимической обстановки в бассейне водоема, в частности, внедрение высокоминерализованных вод глубокой циркуляции по зонам повышенной трещиноватости в верхнюю гидрогеохимическую часть разреза (рис.3.4.2).

**Отмечая хорошее качество диссертационной работы Полетаевой В.И., её содержание вызвало ряд вопросов и замечаний:**

1. Автор работы называет озеро Байкал чистейшим, тем не менее, на стр. 67 указано, что основные загрязнители озера Байкал – сточные воды БЦБК (Cl до 7 т/год,  $\text{SO}_4^{2-}$ ), р. Селенга (Cl до 70 т/год), сейсмические события региона ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) (дисс. стр. 67). В 2021-2022 гг. концентрации ионов хлора повышены в воде истока реки Ангары (0,65 мг/л; данные автора) относительно вод озера (0,4-0,5 мг/л) (глава 3, таблица 3.1.1). По данным ежемесячного мониторинга 2006, 2007, 2008 гг. для микроэлементов установлены значительные вариации: отношение максимальных концентраций к минимальным для некоторых элементов составило более 100 раз (Mn, Fe, Sc, Pb, Tl, Th, табл. 3.1.8, стр. 73). При этом, концентрации элементов остаются ниже ПДК (СанПин 2.1.3684-21). Средние концентрации элементов Sc (0,026 мкг/л, табл. 3.1.5) выше НПБЗК (0,001), Th (0,0114

мкг/л, табл. 3.1.3) выше НПБЗК (0,007), U(0,59 мкг/л, табл. 3.1.3) выше НПБЗК (0,037), Sr(103,1 мкг/л, табл. 3.1.2) выше НПБЗК (50). НПБЗК – нижний предел биологически значимой концентрации и взят из (Барвищ, Шварц, 2000). Эти элементы не учитываются при оценке качества вод водохранилищ. В чем причина?

2. При отсутствии значимых производств на побережье Иркутского водохранилища, изменения микроэлементного состава воды связаны с воздействием антропогенно-нагруженных прибрежных территорий (в большей степени, район г. Иркутск) и водного транспорта. Образцы вод отнесены к категории значительного и очень высокого загрязнения (по значениям однофакторного индекса CF, стр. 227): в 2012 г. по концентрации Al, Mn, Fe, в мае 2021 – по концентрации Al, Mn, Fe, Cu, в июле 2021 г. – по концентрации Al, Cr, Mn, Fe, Cd, в сентябре 2021 г. – по концентрации Al, Mn, Fe, Pb. Расчет индекса PLI показал, что по концентрации микроэлементов большинство образцов вод Иркутского водохранилища классифицируются как воды с базовым загрязнением. PLI рассчитан по концентрации этих же элементов?

3. Применение физико-химического моделирования позволило бы проанализировать изменения форм миграции всех элементов в зависимости от условий (открытые или закрытые системы «вода-порода-атмосфера», процессов, происходящих в донных осадках, смешение пресных и минерализованных вод как геохимический барьер) и определить состав новообразованных фаз.

Применение современных геохимических методов, позволяет не только оценивать текущее состояние, но и давать прогнозную оценку взаимодействия природных и техногенных систем. В частности, автору стоит обратить внимание на метод физико-химического моделирования (ПК «Селектор»). В последние три десятилетия, благодаря использованию термодинамического моделирования, достигнуто более глубокое понимание и объяснение процессов, которые связаны с физико-химическим взаимодействием в основополагающей для земной коры системе «вода - порода - газ - органическое вещество». Фактически работа Полетаевой В.И. направлена на исследование системы «вода – порода – органическое вещество» в открытых и закрытых по отношению к атмосфере условиях. Применение метода физико-химического моделирования (например, ПК «Селектор») помогло бы определить состав новообразованных фаз, изменение форм миграции элементов, как в фоновых территориях, так и подвергнутых разного вида загрязнениям с учетом изменения pH, Eh, температуры воды. Именно формы миграции элементов и оказывают влияние на гидробионты. К одному из наиболее важных результатов этой области науки относится формулирование (Helgeson et al., 1993) и развитие (Price and DeWitt, 2001) концепции гидролитического диспропорционирования органического вещества («hydrolytic



disproportionation of organic matter» (HDOM)). Гидролитическое диспропорционирование – это химическое взаимодействие органического вещества с водой, в процессе которого вода является одновременно и окислителем, и восстановителем, с образованием органических компонентов различной степени окисления углерода на пути к полному термодинамическому равновесию с конечными продуктами  $\text{CH}_4$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{C}_{(\text{ТВ})}$ .

Указанные выше замечания и рекомендации не снижают научной ценности работы.

**Соответствие научной специальности.** Проведенные исследования и сформулированные в диссертации научные положения соответствуют направлению исследований, перечисленных в паспорте научной специальности 1.6.21 – Геоэкология: 1. Изучение состава, строения, свойств, процессов, физических и геохимических полей геосфер Земли как среды обитания человека и других организмов; 2. Изучение изменений жизнеобеспечивающих ресурсов геосферных оболочек Земли под влиянием природных и техногенных факторов, их охрана, рациональное использование и контроль с целью сохранения для нынешних и будущих поколений людей продуктивной природной среды; 3. Междисциплинарные аспекты стратегии выживания человечества и разработка научных основ регулирования качества состояния окружающей среды; 4. Глобальные и региональные экологические кризисы – комплексные изменения окружающей среды и ее компонентов, приводящие к резкому ухудшению условий жизни и хозяйственной деятельности; 5. Природная среда и индикаторы ее изменения под влиянием естественных природных процессов и хозяйственной деятельности человека (химическое и радиоактивное загрязнение биоты, почв, пород, поверхностных и подземных вод); 6. Разработка научных основ рационального использования и охраны водных, воздушных, земельных, биологических, рекреационных, минеральных и энергетических ресурсов Земли.

Диссертационная работа **В.И. Полетаевой** «Геоэкологическая оценка сопряженных сред «вода – донные отложения» и геохимический отклик крупной водной системы на антропогенное воздействие (р. Ангара и каскад ее водохранилищ)» по специальности 1.6.21 – Геоэкология отвечает всем требованиям, предъявляемым к докторским диссертациям, по актуальности, обоснованности полученных результатов, научной новизне и практической значимости и может рассматриваться как завершенная научно-квалификационная работа, в которой содержится решение актуальной научной задачи, имеющей существенное значение для геоэкологии. Работа **соответствует критериям, установленным в пп. 9-11, 13 и 14** Постановления Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. N 842 «Положение о присуждении ученых степеней».

Считаю, что автор диссертационной работы «Геоэкологическая оценка

сопряженных сред «вода – донные отложения» и геохимический отклик крупной водной системы на антропогенное воздействие (р. Ангара и каскад ее водохранилищ)» - Полетаева Вера Игоревна заслуживает присуждения ученой степени доктора геолого-минералогических наук по специальности 1.6.21 – Геоэкология.

Официальный оппонент:

доктор геолого- минералогических наук  
по специальности 25.00.36 – Геоэкология,  
ведущий научный сотрудник  
Института проблем промышленной экологии Севера  
– обособленного подразделения Федерального  
государственного бюджетного учреждения науки  
Федерального исследовательского центра  
«Кольский научный центр Российской академии наук»,  
184209, Апатиты, Мурманской обл., Академгородок 14а  
e-mail:simazukhina@mail.ru, тел. 8-921-280-22-43

Мазухина Светлана Ивановна

Подпись Мазухиной С.И. заверяю:

Директор ИППЭС КНЦ РАН, д.т.н.  
25.12.24



Макаров Д.В.