

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
имени М.В. ЛОМОНОСОВА

*На правах рукописи*

**Ефимов Василий Антонович**

**Пространственно-временная изменчивость химического состава  
наносов рек российской Арктики**

1.16.16 – Гидрология суши, водные ресурсы, гидрохимия

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата географических наук

Москва – 2023

Диссертация подготовлена на кафедре гидрологии суши  
Географического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова

- Научный руководитель** – *Чалов Сергей Романович,*  
*доктор географических наук*
- Официальные оппоненты** – *Поздняков Шамиль Рауфович, доктор*  
*географических наук, директор Института*  
*исследований континентальных водных*  
*объектов Российского государственного*  
*гидрометеорологического университета*
- Осадчиев Александр Александрович,*  
*доктор физико-математических наук,*  
*ведущий научный сотрудник лаборатории*  
*взаимодействия океана с водами суши и*  
*антропогенных процессов Института*  
*океанологии им. П.П. Ширшова РАН*
- Казмирук Василий Данилович, кандидат*  
*географических наук, старший научный*  
*сотрудник группы моделирования*  
*продукционно-деструкционных процессов*  
*Института водных проблем РАН*

Защита диссертации состоится «31» мая 2023 г. в 17 часов на заседании диссертационного совета МГУ.016.2(МГУ.11.02) Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова по адресу: 119991, Москва, ГСП-1, Ленинские горы д. 1, ГЗ МГУ, Географический факультет, 18 этаж, ауд. 18-01 (тел. +7(495)9392238, факс +7 (495)9328836).

E-mail: Diss1102MSU@yandex.ru

С диссертацией можно ознакомиться в отделе диссертаций научной библиотеки МГУ имени М.В. Ломоносова (Ломоносовский просп., д. 27) и на портале <https://dissovet.msu.ru/dissertation/016.2/2495>

Автореферат разослан «    » апреля 2023 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета,  
доктор биологических наук

А.В. Ольчев

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность исследования.** Перемещаемые реками наносы разнообразны по своему происхождению, форме переноса и составу. В процессы транспорта наносов вовлекаются продукты разрушения горных пород, почв, живых организмов, представленных широким спектром минеральных и органических частиц различной крупности, перераспределяющихся в пределах речных бассейнов, отдельных участков рек, по глубине русловых потоков. Составляющие потока наносов постоянно взаимодействуют между собой и могут существенно менять свой химический состав под влиянием гидрологических условий и геохимической обстановки.

Изученность стока речных наносов преимущественно связана с разнообразными географо-гидрологическими исследованиями, как регионального, так и глобального масштабов (Алексеевский, 1998; Bobrovitskaya et al., 2003; Walling, Fang, 2003; Голосов, 2006; Syvitski, Kettner, 2011; Milliman, Farnsworth, 2013; Cohen et al., 2014; Borrelli et al., 2017). Оценки механического (гранулометрического) и химического состава наносов проводятся гораздо реже. Данные о крупности взвешенных наносов рек России впервые были обобщены на материалах 1950–70-х гг., (Лопатин, 1952; Шамов, 1959) и основывались на измерениях гидрологических постов УГМС. Они охватывали лишь небольшое число постов и имели эпизодический характер, что в значительной мере связано с трудоёмкостью пробоопределения – длительностью фракционирования взвеси методом А.Н. Сабанина (отмучивание) или пипеточным методом. Химический состав взвеси рек мира рассматривался в работах В.В. Гордеева, В.С. Савенко, Ж. Виерса, Ж. Гаярде, О.С. Покровского, Б. Дюпре, С.Р. Чалова и др. В основном он исследовался в освоенных бассейнах рек Европы, Центральной и Южной Азии и Северной Америки,

На этом фоне химический состав взвешенных наносов рек бассейна Северного Ледовитого океана изучен крайне слабо. Сведения о химическом составе наносов в этом регионе базируются на результатах эпизодических измерений. В обобщениях, характеризующих химический состав вод и наносов рек мира, встречаются единичные упоминания о содержании элементов в реках российской Арктики (Савенко, 2006; Viers et al., 2008). Суммарно на реки этого региона приходится около 11% мирового речного стока. Крупнейшие реки российской Арктики (Енисей, Лена, Обь и Колыма) составляют около 58% российского стока и около 32% суммарного стока рек в Северный Ледовитый океан. Отмечающееся возрастание стока Арктических рек (Gordeev et al., 1998; Алексеевский, Магрицкий, 2007; Евстигнеев и др., 2007; Шикломанов и др., 2008; Dixon, 2016; Li et al., 2020) в результате климатических изменений, таяния наземной и субквальной мерзлоты в бассейнах рек криолитозоны и хозяйственного освоения Арктики приводит к трансформации

эрозионных и русловых процессов в бассейнах и меняет соотношение источников формирования литогеохимических потоков. Все это определяет изменения выноса химических элементов в составе взвешенных наносов в устьевые области и Арктические моря и, следовательно, трансформацию биогеохимического цикла в Арктике. Указанные процессы имеют значение и в контексте оценки качества воды и транзита загрязняющих веществ, поскольку транспорт химических элементов в реках на 90–95% осуществляется во взвешенной форме (Добровольский, 2003; Gaillardet et al., 2003; Гордеев, 2012, 2013). Часть из этих поллютантов (металлы и металлоиды: As, Cd, Pb, Zn, Co, Ni, Cu, Sb, W, Mo, Cr) потенциально опасны для водопользования, поскольку относятся к I–II классам опасности (СанПин 2.1.4.1074-01) и могут рассматриваться как приоритетные загрязнители (Касимов и др., 2022). Таким образом, определение современных характеристик химического состава взвешенных наносов крупнейших рек российской Арктики является актуальной научной проблемой.

Своевременность ее исследования определяется активным развитием технологий изучения речных наносов, связанным с внедрением современных методов экспедиционных и аналитических работ (масс-спектральный анализ химического состава наносов и лазерная дифракция частиц взвеси), которые позволяют получить новые массивы данных о составе взвешенных наносов. На основе этих методов в 2018–2021 гг. были реализованы не имеющие аналогов натурные исследования в нижнем течении крупнейших рек России – Оби, Енисея, Лены и Колымы, выполненные по стандартизованной комплексной программе. Именно они легли в основу настоящей работы и дополнены системным обобщением данных о химическом составе взвешенных наносов 33 крупнейших рек российской части бассейна Северного Ледовитого океана.

**Цель исследования** – оценка гранулометрического состава и содержания металлов и металлоидов во взвешенных наносах крупнейших рек Арктической зоны России и изучение их пространственно-временной изменчивости.

**Предмет исследования** – физические и химические характеристики воды, речных наносов, процессы их транспорта. В работе рассматривается группа элементов: Al, V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, As, Sr, Zr, Mo, Cd, Sn, Sb, Cs, W, Pb, U, обозначаемых далее как металлы и металлоиды (далее: ММ) (Meade, 1995; Касимов и др., 2016; Kaus et al., 2017).

**В задачи работы** входило:

- Исследование факторов и особенностей формирования химического состава наносов и их пространственных отличий на реках российской Арктики;
- Обоснование методологии расширенной программы гидролого-геохимического мониторинга стока и состава наносов крупных рек;

- Сравнительный анализ гранулометрического состава взвешенных наносов нижнего течения крупнейших рек Арктики, а также долей бассейновой и русловой составляющих стока взвешенных наносов;
- Сравнительный анализ содержания металлов и металлоидов во взвешенных наносах рек Обь, Енисей, Лена и Колыма, оценка закономерностей их сезонной и локальной (в пределах поперечного сечения) изменчивости;
- Оценка выноса металлов и металлоидов в составе взвешенных наносов в устьевые области рек Обь, Енисей, Лена и Колыма;
- Исследование распределения тяжелых металлов и металлоидов по фракциям крупности взвешенных наносов рек Обь, Енисей, Лена и Колыма.

**Объект исследования** – нижнее течение рек Обь, Енисей, Лена и Колыма.

### **Научная новизна работы**

Впервые в замыкающих створах крупнейших рек российской Арктики, расположенных выше их устьевых областей, выполнено подробное исследование пространственно-временной изменчивости химического состава наносов с учетом неоднородности их распределения в пределах поперечных профилей. Закономерности формирования химического состава наносов рассмотрены на основе стандартизованных гидролого-геохимических исследований, выполненных в 2018–2021 гг.. Впервые на обширном статистическом материале определены средние концентрации ММ во взвесах рек Обь, Енисей, Лена и Колыма и величина их поступления в устьевые области указанных рек. Даны уникальные оценки распределения химического состава взвесей в пределах поперечных сечений крупных рек. Впервые проведены оценки распределения химического состава по разным фракциям крупности.

### **Личный вклад автора**

Автор принимал непосредственное участие в комплексных экспедициях географического факультета МГУ по изучению Арктических рек в 2018 (р. Обь); 2019 (р. Колыма); 2020 (р. Обь) и 2021 (р. Колыма) годах, а также провел обобщение экспедиционных данных по рекам Лена и Енисей. В полевых условиях автором выполнены работы по измерению расходов, рН, электропроводности, мутности воды, проведена пробоподготовка для определения гранулометрического состава и концентрации ММ в воде и наносах, отобраны пробы береговых отложений. Автором проанализирован гранулометрический состав наносов, содержание биогенных элементов, главных ионов, органического вещества. Подготовлена база данных о мутности и гранулометрическом составе взвешенных наносов в разные фазы водного режима. Автором обобщены и статистически обработаны полученные результаты, подготовлены иллюстрации, таблицы, карты и выполнено обобщение литературных данных.

## **Структура и объём диссертации**

Диссертация состоит из введения, 6 глав, заключения, списка литературы из 156 источников и приложений. Работа изложена на 136 страницах текста. Список литературы включает в себя 74 публикаций на русском и 82 публикаций на иностранных языках.

### **Защищаемые положения**

1. Взвешенные наносы нижнего течения рек Обь и Енисей по сравнению с взвесями рек Лена и Колыма отличаются меньшей крупностью и большей долей мелких фракций (менее 10 мкм).
2. Взвешенные наносы рек Обь, Енисей, Лена и Колыма имеют преимущественно двухмодальный тип распределения фракций гранулометрического состава, что связано с сопоставимым вкладом более крупной русловой и более мелкой бассейновой составляющих стока наносов. Доля бассейновой составляющей увеличивается во взвесах Лены и Колымы за счет поступления продуктов разрушения обнажений многолетнемерзлых пород (едом) в бортах долин и антропогенной деятельности.
3. Содержание металлов и металлоидов выше во взвешенных наносах рек. Обь и Лена по сравнению с реками. Енисей и Колыма. На всех реках в периоды пониженной водности концентрации металлов и металлоидов увеличиваются. Изменчивость концентраций металлов и металлоидов в составе взвешенных наносов в пределах поперечного сечения крупных рек возрастает в периоды повышенной водности.
4. Максимальное концентрирование металлов и металлоидов характерно для фракций с размерами менее 10 мкм. Фракции наносов размерами менее 1 мкм в большей степени обогащены металлами и металлоидами на реках Енисей и Колыма по сравнению с реками Обь и Лена.

### **Апробация и реализация результатов работы**

Полевые работы, обработка и анализ результатов выполнены в рамках проектов «Интегральная оценка баланса наносов речной системы р. Лена» (РНФ – 21-17-00181), «Пространственно-временные закономерности формирования и переноса микрочастиц в крупных речных системах России» (РФФИ – 19-05-50109) и «Потоки тяжелых металлов, металлоидов и биогенов крупнейших рек Сибири в Арктические моря России (РФФИ – 18-05-60219)».

Результаты работы представлены автором в форме устных докладов на зарубежных и российских конференциях: «Биомониторинг в Арктике» (26–27.11.2018), «Морские исследования и образование» MARESEDU–2019 (28–31.10.2019), EGU2020 (3–8.05.2020), World's Large Rivers (3–6.08.2021) и др. Методы исследования, применяемые в работе, были протестированы в рамках комплексных экспедиций в бассейны рек Селенга, Западная Двина,

рек бассейна Белого моря. Результаты работ и заключения о возможности использования предложенных методов представлены в 4 статьях (БД Web of Science и Scopus) и 1 статье, изданной в журнале из списка ВАК.

### **Благодарности**

Автор выражает особую благодарность д.г.н, доц. Чалову Сергею Романовичу за научное руководство работой, помощь в проведении экспедиций и исследований; Л.Е. Ефимовой за помощь в проведении лабораторных работ и интерпретации результатов; участникам экспедиций в бассейны Арктических рек в 2018–2021 годах: Н.Л. Фроловой, Д.В. Магрицкому, Д.И. Школьному, А.С. Цыпленкову, А.Н. Василенко, С.В. Платонову, А.А. Попрядухину, В.М. Морейдо, К.Н. Прокопьевой, А.Ю. Тришину и другим сотрудникам, аспирантам и студентам географического факультета МГУ; за консультации по вопросам геохимии М.Ю. Лычагину, О.Н. Ериной, В.С. Савенко, А.В. Савенко, Г.Л. Шинкарёвой, Н.Е. Кошелевой, академику РАН Н.С. Касимову. Особая признательность автора – Н.С. Зимову, С.А. Зимову и всем сотрудникам Северо-Восточной научной станции РАН, а также М.А. Кузнецову и сотрудникам Салехардского ЦГМС.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

Во **введении** показана актуальность темы работы, сформулированы цели и задачи работы, охарактеризованы её научная новизна и практическая значимость, приведены сведения об апробации работы и описаны объекты и методы исследования.

### **Глава 1. Факторы формирования гранулометрического и химического состава наносов**

К речным наносам относятся нерастворённые (твёрдые) частицы различного размера и генезиса, транспортируемые потоком во взвешенном или влекомом состоянии и формирующие ложе водотоков и водоёмов: соединения минерального (фрагменты горных пород, вторично образованные минералы, конгломераты почв) и органического (водоросли, минеральное биогенное вещество, бактерии, вирусы) происхождения, ядохимикаты, радионуклиды и искусственные техногенные частицы – продукты различных производственных циклов. Различия в генезисе наносов определяют их отличия по гранулометрическому и химическому составу. Концентрации химических элементов во взвешенных наносах напрямую зависят от их распространённости (кларковое число – (Hu, Gao, 2003; Rudnick, Gao 2003)), миграционной способности (Касимов и др., 2019) и технофильности (Касимов, Власов, 2012).

В работе рассмотрены механические и миграционные группы классификаций, применяемых при изучении речных наносов (Guu, 1969; Караушев, 1977; Friedman, Sanders, 1978; Глазовская, Геннадиев, 1995). Для стандартизации описания гранулометрического

состава автором вводится численный индекс РМ в диапазоне размеров от 0.1 мкм (РМ0.1). Например, для частиц диаметром 5–1000 мкм, он обозначается как РМ50-1000, где: РМ50 – нижний диапазон выделяемого интервала (50 мкм), РМ1000 – верхний диапазон выделяемого интервала (1000 мкм).

## **Глава 2. Изученность растворённых и взвешенных форм миграции химических элементов в реках российской Арктики**

В работе обобщена информация по 33 крупнейшим по площади бассейна рекам российской Арктики, освещенным (хотя бы эпизодическими) гидрохимическими наблюдениями за ММ в растворенной и взвешенной формах. Сток воды этих рек варьирует от 609 до 1.6 км<sup>3</sup>/год. Реки различаются режимом русловых процессов, распространением многолетнемерзлых пород (0% – бассейны рек Кольского полуострова, Европейской части России; 100% – бассейн р. Колыма), степенью антропогенного преобразования водосбора (транспортная инфраструктура, промышленные центры, разработки россыпных месторождений). Сток некоторых рек значительно зарегулирован (8 плотин на р. Енисей; отсутствие гидротехнических сооружений на рр. Варзуга и Хатанга).

Сведения о содержании растворённых форм металлов в нижнем течении крупнейших рек российской Арктики представлены в работах В.С. Савенко, А.В. Савенко, В.В. Гордеева, А.Ю. Опекунова, О.С. Покровского, М.Б. Заславской, О.А. Алёкина, Ж. Гайярде, Б. Дюпре, М. Мейбека, С. Морана, Н.И. Тананаева и др. Регистрируемые средние концентрации растворённых ММ изменяются от 2–3 (Fe, Cu) до 20–30 (Pb, Mo) раз. Высокое содержание Cu, Zn, Ni, Mo приурочено к горным районам, а также к бассейнам, в которых располагаются предприятия по добыче и переработке полезных ископаемых (реки Кольского полуострова, Надым, Пур, Яна, Индигирка). Повышенные концентрации таких технофильных элементов, как V, Pb, As, W, отмечаются в устьях рек севера Европейской части России, что объясняется антропогенным освоением территории. Содержание Fe максимально в р. Обь и р. Пур, что связано с заболоченностью водосбора.

Концентрации ММ в составе взвешенных наносов изучены слабее (Kononov et al., 1968; Ivanova, Kononov, 1971; Martin et al., 1993; Gordeev et al., 1996; Савенко, 2006; Pokrovsky et al., 2016; Krickov et al., 2019, 2023; Soromotin et al., 2022; Корнеев А.П., неизданные материалы). Наиболее широко представлены данные о технофильных элементах: Zn (диапазон регистрируемых значений от 50 до 1075 мкг/г), Cu (от 8 до 291 мкг/г), Pb (от 12 до 87 мкг/г), средние концентрации которых повышены в реках бассейна Белого моря, а также в крупных речных бассейнах (Северная Двина, Печора, Обь, Енисей). Важнейшими факторами, влияющими на химический состав наносов, являются интенсивность эрозии



водосборов, наличие гидротехнических сооружений, а также влияние тающих многолетнемерзлых пород (ММП).

Малое количество измерений химического состава наносов затрудняет возможность их использования для изучения условий формирования и пространственно-временных закономерностей состава наносов даже для наиболее крупных рек. В этой связи для характеристики химического состава растворённых и взвешенных форм ММ необходимы экспедиционные исследования, выполненные по единой методике в течение длительного времени.

### **Глава 3. Методика исследования состава взвешенных наносов крупных рек российской Арктики**

Стандартизованная программа гидролого-геохимических измерений, применяемая в данном исследовании, состоит из полевого этапа, основанного на измерениях расходов и мутности воды, отборе проб в точках, рассредоточенных по поперечному сечению реки и аналитического этапа (определении физических, химических показателей воды и наносов, концентраций химических элементов). На реках Обь, Енисей, Лена и Колыма была отработана программа измерений и пробоотборов воды на трех вертикалях и трех горизонтах (приповерхностный, средний, придонный) одновременно с определением расхода воды доплеровскими измерителями течения (ADCP). Сравнение с точечным пробоотбором (одна-три точки пробоотбора), осуществляемым на сети мониторинга Росгидромета и программами ArcticGRO и BESTSiberian ([arcticgreativers.org](http://arcticgreativers.org); [istina.msu.ru/projects/414491904](http://istina.msu.ru/projects/414491904)) показало отличие результатов определения ММ в потоке на 20–30%.

Методика отбора интегральных проб взвешенных наносов на разных горизонтах была реализована с помощью применения улавливающей установки (Патент № 201927: <https://istina.msu.ru/patents/354167228/>) – зонда-ловушки взвешенных наносов, представляющей собой систему из пробоотборников, устанавливаемых в речном потоке на разной глубине (1 – приповерхностный слой; 2 – середина потока; 3 – придонный слой) для отбора репрезентативных проб взвешенных наносов разной крупности общим весом до нескольких сотен грамм. Перехват взвешенных наносов осуществляется с помощью мелкоячеистой сетки (мельничный газ с диаметром пор 28 мкм). Интегральные пробы используются для изучения концентрирования ММ в разных по крупности фракциях взвесей. Одновременно с отбором проб проводились измерения рН, электропроводности, оптической мутности, температуры воды, расходов воды и величины обратного рассеивания доплеровскими измерителями течения (ADCP). Измерения мутности воды во всех точках измерения позволяют калибровать зависимости:

$$SSC = f(T, BI, Sv), \quad (1)$$

где  $SSC$  – концентрация взвешенных наносов в мг/л;  $T$  – оптическая мутность (NTU);  $BI$  – величина обратного рассеивания ADCP (backscatter intensity);  $Sv$  – объёмная мутность.

Аналитический этап основан на делении отобранных проб на нерастворенные и растворенные формы с помощью фильтрации через мембранные фильтры 0.45 мкм и дальнейшей реализации химико-аналитических методов (табл. 1).

**Таблица 1**

Составляющие гидролого-геохимических наблюдений за стоком и составом наносов крупнейших рек Российской Арктики

| Объект  | Параметр                  | Метод анализа                               |
|---|---------------------------|---|
| Сток  | Расход воды               | ADCP  |
| Растворённые формы                            | pH                        | Потенциометрия                              |
|   | Минерализация             | Потенциометрия                              |
|   | Главные ионы              | Жидкостная хроматография                    |
|   | Биогенные элементы        | Фотометрия                                  |
|   | Органическое вещество     | CHNS-анализ                                 |
|   | Металлы и металлоиды      | ICP-MS, ICP-AES                             |
| Взвешенные наносы                             | Мутность                  | Нефелометрия, ADCP, лазерный, дистанционный |
|   | Гранулометрический состав | Лазерная гранулометрия                      |
|   | Органическое вещество     | CHNS-анализ                                 |
|   | Металлы и металлоиды      | ICP-MS, ICP-AES                             |
| Донные отложения и интегральные пробы наносов | Гранулометрический состав | Лазерная гранулометрия                      |
|   | Металлы и металлоиды      | ICP-MS, ICP-AES                             |

Гранулометрический состав взвешенных наносов определялся с помощью лазерного гранулометра Fritch Analysette 22 comfort. При анализе крупности взвесей в программе GRDISTAT V9.1 (Blott, 2020); рассчитывался медианный диаметр  $d_{50}$  (мкм), который разделяет пробу наносов массой  $m$  на 2 равные части по весу и определяется по соотношению веса  $m_i$  разных фракций  $i$  со средним диаметром  $d_{50}$ :

$$d_{50} = \frac{\sum m_i d_{50i}}{m}. \quad (2)$$

Доля каждой  $i$ -фракции в составе речных наносов определялась как

$$d_i(\%) = m_i/m. \quad (3)$$

Аналогично определялись такие метрики крупности наносов, как  $d_{10}$  и  $d_{90}$  (мкм), соответствующие диаметрам, отделяющим 10% и 90% частиц на построенной для всех

фракций в пробе кривой обеспеченности. В процессе анализа гранулометрического состава рассматривалась форма кривых, описывающих графики распределения фракций наносов, определялась модальность (количество пиков) концентраций для каждой из проб (одно-, двух- и трёхмодальные распределения). Для их анализа применялся графический метод, в котором исследовалась форма получившихся кривых распределений крупности, и автоматизированный метод (программный комплекс GRDISTAT), где критерием выделения пика содержания фракции служило превышение более чем на 10% ближайшего минимального значения содержания фракции. Также были посчитаны величины коэффициента вариации ( $Cv$ ) и стандартного отклонения ( $SD$ ).

Определение микроэлементного состава взвешенных наносов (интегральных и мгновенных) и растворенных форм было выполнено масс-спектральным методом с индуктивно-связанной плазмой и атомно-эмиссионным методом с индуктивно-связанной плазмой (приборы: масс-спектрометр с индуктивно-связанной плазмой Elan-6100 («Perkin-Elmer», США); атомно-эмиссионный с индуктивно-связанной плазмой спектрометр Optima-4300 DV («Perkin-Elmer», США)). Выбор элементов для анализа основывался на распространённости элемента во взвешенных наносах, его токсичности, а также на основании групп элементов, приоритетных при анализе водной миграции (Касимов и др. 2016; Kasimov et al., 2016; Lychagin et al., 2017). Для выбранных 20 ММ (Al, V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, As, Sr, Zr, Mo, Cd, Sn, Sb, Cs, W, Pb, U) рассчитаны кларки концентрации и коэффициенты концентрирования ( $K_k$ ,  $K_c$ ), кларки рассеивания ( $K_r$ ), коэффициент обогащения наносов ( $EF$ ), интенсивность накопления во фракциях ( $D_x$ ) и распределение по вертикали ( $K_x$ ). Были посчитаны валовые коэффициенты  $TK_c$ ,  $TEF$  (табл. 2). Созданы матрицы корреляции, а также выполнен  $DS$ -анализ. Он характеризует распределение концентраций элемента  $C_x$  между нерастворенными (мкг/г,  $PM > 0.45$ ) и растворенными формами (мкг/л,  $PM < 0.45$ ):

$$DS = \frac{SSC * C_x(PM > 0.45) * 10^{-3}}{(SSC * C_x(PM > 0.45) * 10^{-3}) + C_x(PM < 0.45)} (\%), \quad (4)$$

где  $SSC$  – концентрация взвешенных наносов в пробе в мг/л.

Отобранная зондом-ловушкой интегральная проба взвешенных наносов использовалась для сепарирования на разные классы крупности:  $PM < 1$ ;  $PM1-10$  и общая проба. Сепарирование выполнялось методом отмучивания (Вадюнина, Корчагина, 1986). Для характеристики накопления элементов в наносах были выполнены анализы концентрации ММ в наиболее мелких и химически активных бассейновых фракциях:  $PM1$  ( $PM < 1$ ) и  $PM1-10$ . Обработка статистических данных, кластерного, корреляционного и PCA анализа гранулометрического и химического состава наносов и их проверка выполнялась с помощью программного комплекса Statistica 10.

Относительные коэффициенты, характеризующие содержание ММ в воде и взвешенных наносах, применяемые в работе.

|   |   |   |
|---|---|---|
| Кларк концентрации/<br>рассеивания                      | $KK = \frac{Ci}{Co}$ $Kr = \frac{Co}{Ci}$                       | $C_i$ – концентрация элемента в пробе, $C_o$ – среднемировая концентрация элемента в верхней части земной коры  |
| Коэффициент концентрирования                            | $Kc = \frac{Ci}{Co}$  | $C_i$ – концентрация элемента в пробе, $C_o$ – среднемировая концентрация элемента в речной взвеси  |
| Коэффициент обогащения                                  | $EF = \frac{C_{xi}/C_{Sc}}{C_{xg}/C_{Scg}}$                     | $C_{xi}$ – содержание химического элемента в объекте исследования; $C_{Sc}$ – содержание скандия (Sc) в объекте исследования, $C_{xg}$ – содержание химического элемента в горной породе; $C_{Scg}$ – содержание скандия (Sc) в горной породе |
| Неоднородность распределения концентраций в створе      | $Kx = \frac{C_{0 surf}}{C_{0 bot}}$                             | $C_{0 surf}$ – концентрациями элементов поверхностных горизонтов, а $C_{0 bot}$ – в придонных горизонтах  |
| Общий коэффициент концентрации / коэффициент обогащения | $TKc = \sum (Kc > 1) - (n - 1)$ $TEF = \sum (EF > 1) - (n - 1)$ | $n$ – количество элементов, где показатель $> 1$  |
| Коэффициент концентрирования интегральных проб наносов  | $Dx = \frac{C_f}{C_{tot}}$                                      | $C_f$ – содержание элемента во фракции РМ<1; РМ1-10, а $C_{tot}$ – среднее содержание элемента в ловушке  |

За период с августа 2018 г. по сентябрь 2021 г. в створах, расположенных выше устьевых участков рек Обь, Енисей, Лена и Колыма, было проведено 15 полевых кампаний. Они охватили фазы водного режима при разных модульных коэффициентах водности  $K_m$ , рассчитываемых как отношение расхода воды в период измерений  $Q$  к среднесреднегодному расходу воды в створе реки  $Q_0$ :

$$K_m = Q/Q_0. \quad (5)$$

Исследования на р. Обь (створ расположен ниже устья р. Полуй, у г. Салехард, 66°36'39.07"С; 66°30'38.44"В) проведены во все фазы водного режима (спад половодья 2020 г. ( $K_m = 2.45$ ), летняя межень 2020 ( $K_m = 0.96$ ), осенняя межень 2018 ( $K_m = 0.91$ ), зимняя межень 2018 ( $K_m = 0.52$ ) и 2021 годов ( $K_m = 0.4$ )). На р. Енисей (створ у г. Игарка, 67°25'51.78"С; 86°29'2.31"В) работы проведены в половодье 2019 года и межень 2021 года ( $K_m = 4.54$  и  $K_m = 0.92$  соответственно). На р. Лена в створе у пос. Жиганск (66°50'35.60"С;

123°26'27.22"В) работы проводились на пике половодья ( $Km = 2.97$ ) и дополнительно - в створе у г. Якутск (61°54'29.56"С; 129°44'21.44"В) на спаде половодья 2020 ( $Km = 3.93$ ) и в летнюю межень 2018 года ( $Km = 1.32$ ). На р. Колыма (створ у п. Черский 68°45'14.25"С; 161°15'16.71"В) работы проведены в 2019 году ( $Km = 2.54$ ) в 2020 году ( $Km = 2.47$ ), и в 2021 году (половодье ( $Km = 5.16$ ), спад половодья ( $Km = 2.54$ ), межень ( $Km = 2.08$ )). Суммарно выполнено 50 измерений расходов и гидрохимических характеристик в створах, отобрано 435 пробы гранулометрического состава наносов, 449 проб воды и взвешенных наносов, выполнено 27389 элементоопределений ММ (табл. 3).

С помощью зондов-ловушек взвешенных наносов было отобрано 56 интегральных проб (р. Енисей – 17, р. Обь – 6, р. Лена – 9, р. Колыма – 24).

Таблица 3

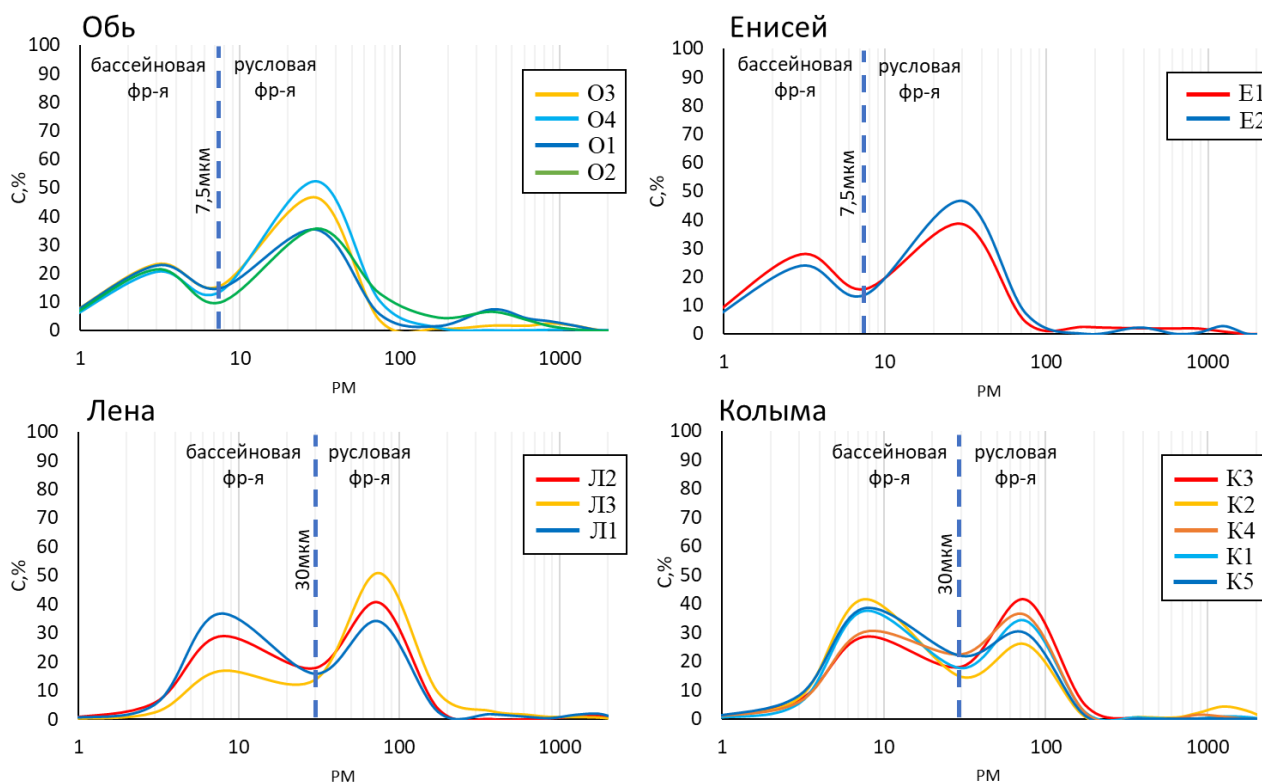
Периоды пробоотбора и количество образцов, отобранных в ходе экспедиционных работ  
2018–2021 гг.

| Год                       | Река   | Месяц       | Даты        | Обозначение | Водность | АДСР/<br>Гидро-<br>химия | Пробы<br>ТМ | Пробы<br>ГС |
|---------------------------|--------|-------------|-------------|-------------|----------|--------------------------|-------------|-------------|
|                           |        |             |             | Фаза ВР     | $Km$     | работы в<br>створе г/п   | проб        | проб        |
| 2018                      | Обь    | Сентябрь    | 22–24.09    | О1          | 0.91     | 2                        | 15          | 15          |
| 2018                      | Обь    | Ноябрь      | 24–26.11    | О2          | 0.52     | 1                        | 7           | 7           |
| 2019                      | Обь    | Июнь        | 22.06–09.07 | О3          | 2.45     | 3                        | 20          | 25          |
| 2020                      | Обь    | Август      | 23–29.08    | О4          | 0.96     | 2                        | 18          | 18          |
| 2021                      | Обь    | Январь      | 30.01–04.02 | О5          | 0.4      | 2                        | 18          | 18          |
| <b>Всего</b>              |        |             |             |             |          | 10                       | 78          | 83          |
| 2019                      | Енисей | Июнь        | 02.06–16.06 | Е1          | 4.53     | 4                        | 41          | 40          |
| 2021                      | Енисей | Июль        | 01.08–08.08 | Е2          | 0.92     | 3                        | 19          | 19          |
| <b>Всего</b>              |        |             |             |             |          | 7                        | 60          | 59          |
| 2018                      | Лена   | Август      | 15.08–17.08 | Л1          | 1.32     | 2                        | 11          | 11          |
| 2019                      | Лена   | Июнь        | 7–17.06     | Л2          | 2.96     | 3                        | 27          | 25          |
| 2020                      | Лена   | Июль        | 17.06–09.07 | Л3          | 3.9      | 2                        | 29          | 41          |
| <b>Всего</b>              |        |             |             |             |          | 7                        | 67          | 77          |
| 2019                      | Колыма | Август      | 25.07–17.08 | К1          | 2.53     | 12                       | 86          | 86          |
| 2020                      | Колыма | Июль        | 01.07–09.07 | К2          | 2.46     | 4                        | 40          | 40          |
| 2021                      | Колыма | Май–июнь    | 25/05-25/06 | К3          | 5.16     | 4                        | 37          | 37          |
| 2021                      | Колыма | Июнь–июль   | 25/06-8/07  | К4          | 2.54     | 3                        | 30          | 30          |
| 2021                      | Колыма | Июль–август | 8/07-15/08  | К5          | 2.07     | 3                        | 37          | 37          |
| <b>Всего</b>              |        |             |             |             |          | 26                       | 230         | 230         |
| <b>Всего за 2018-2021</b> |        |             |             |             |          | <b>50</b>                | <b>435</b>  | <b>449</b>  |

## Глава 4. Гранулометрический состав взвешенных наносов крупнейших рек российской Арктики

Средняя измеренная мутность воды р. Обь составляет 29 мг/л, р. Енисей – 27 мг/л, р. Лена – 24 мг/л, р. Колыма – 43 мг/л. Наибольшая изменчивость содержания взвешенных наносов за весь период исследований характерна для р. Колыма ( $C_v$  123%), где также наблюдаются самые высокие концентрации взвеси – 181 мг/л. Неоднородность распределения мутности в створе г/п Черский достигает 208% в результате влияния локальных факторов (притоки, разрушения береговых ММП). Наименьшая неоднородность концентраций в створе отмечена для р. Обь ( $C_v$  31%).

В нижнем течении крупнейших рек российской Арктики состав взвешенных наносов характеризуется преимущественно двухмодальным, в отдельных случаях – трёхмодальным распределением (рис. 1).



**Рисунок 1.** Осредненные кривые гранулометрического состава наносов в разные фазы водного режима для р. Обь (О3 – спад половодья ( $n = 24$ ), О4 – летняя межень ( $n = 18$ ), О1 – осенняя межень ( $n = 15$ ), О2 – зимняя межень 2018 ( $n = 8$ )), р. Енисей (Е1 – половодье ( $n = 54$ ), Е2 – межень ( $n = 19$ )), р. Лена (Л2 – половодье ( $n = 22$ ), Л3 – спад половодья ( $n = 29$ ), Л1 – межень ( $n = 9$ )) и р. Колыма (К3 – половодье 2021 ( $n = 30$ ), К2 – спад половодья ( $n = 18$ ), К4 – межень ( $n = 18$ ), К1 – спад половодья 2020 ( $n = 31$ ), К5 – межень 2019 ( $n = 49$ )).

Пунктиром обозначены границы бассейновой и русловой фракций наносов.

Трёхмодальное распределение встречается на реках Обь, Енисей и Колыма в периоды низкой водности ( $Km < 2.5$ ); третий пик крупных фракций (PM100-500) соответствует не более чем 14% от суммарной концентрации наносов. Пики концентраций самых крупных фракций наносов (PM500-1000) отмечены в нескольких придонных пробах, отобранных в фазы с наиболее низкой водностью ( $Km < 1$ ). Для бассейнов Арктических рек было выявлено 309 двухмодальных кривых распределения фракций взвешенных наносов. Распределения пиков концентрации фракций наносов этих кривых сходны у пар рек Обь–Енисей, и Лена–Колыма. Взвесь Оби и Енисея более мелкая, в основном представлена фракциями PM1-5 и PM10-50, формирующими соответствующие пики на кривых гранулометрического состава. Средний гранулометрический состав рек Лена и Колыма характеризуется более крупными размерами частиц: им присуще наличие пиков концентрации в интервале фракций PM5-10 и PM50-100. В период половодья второй пик более выражен, чем первый, и составляет до 40-45% общей концентрации наносов. При этом в отличие от рек Обь и Енисей первый пик крупности увеличивается в периоды пониженной водности (до 36% и 42% соответственно), что связано с поступлением более мелких фракций наносов (PM5-10) при таянии ММП.

Во взвешенных наносах рек Обь и Енисей больше доля тонких фракций PM10, что проявляется в меньших значениях величины  $d_{10}$  и  $d_{50}$  для этих рек по сравнению с Леной и Колымой (табл. 4). В составе наносов рек Обь и Енисей средняя величина  $d_{10}$  равна 2.05 мкм и 1.53 мкм соответственно;  $d_{50}$  – 16 мкм и 12 мкм. Для рек Лена и Колыма она в 2–3 раза больше и составляет:  $d_{10}$  – 6.28 мкм и 5.36 мкм;  $d_{50}$  – 42 мкм и 26 мкм соответственно. Кластерный анализ (иерархическая классификация, метод полной связи,  $p < 0.05$ ) показывает, что гранулометрические составы взвешенных наносов рек Обь и Енисей в определенные фазы водного режима подобны ( $R^2 = 0.97–0.99$ ). В общую группу выделяются и реки Лена и Колыма ( $R^2 = 0.75–0.99$ ) (рис. 2). Схожи распределения ГС в зимнюю межень на р. Обь и в половодье на р. Енисей. Из-за наличия в составе одиночных крупных частиц они формируют отдельную ассоциацию внутри первой группы. Сезонные отличия крупности взвесей характеризуются тенденциями к увеличению  $d_{10}$  и  $d_{50}$  и появлением отдельных пиков концентраций крупных фракций гранулометрического состава для некоторых пробоотборов. Подобные пики концентраций в диапазоне PM100-500, позволяют выделить в отдельную ассоциацию фазы спада половодья и летней межени р. Обь (О3, О4) и летней межени р. Енисей (Е2). Во второй группе выделяются ассоциации для фазы летней межени (Л1, К1) и повышенной водности (Л3; К3).

Осреднённые характеристики модальности, диаметра  $d_{50}$ ,  $d_{10}$  обеспеченности и доли бассейновой и русловой фракции наносов

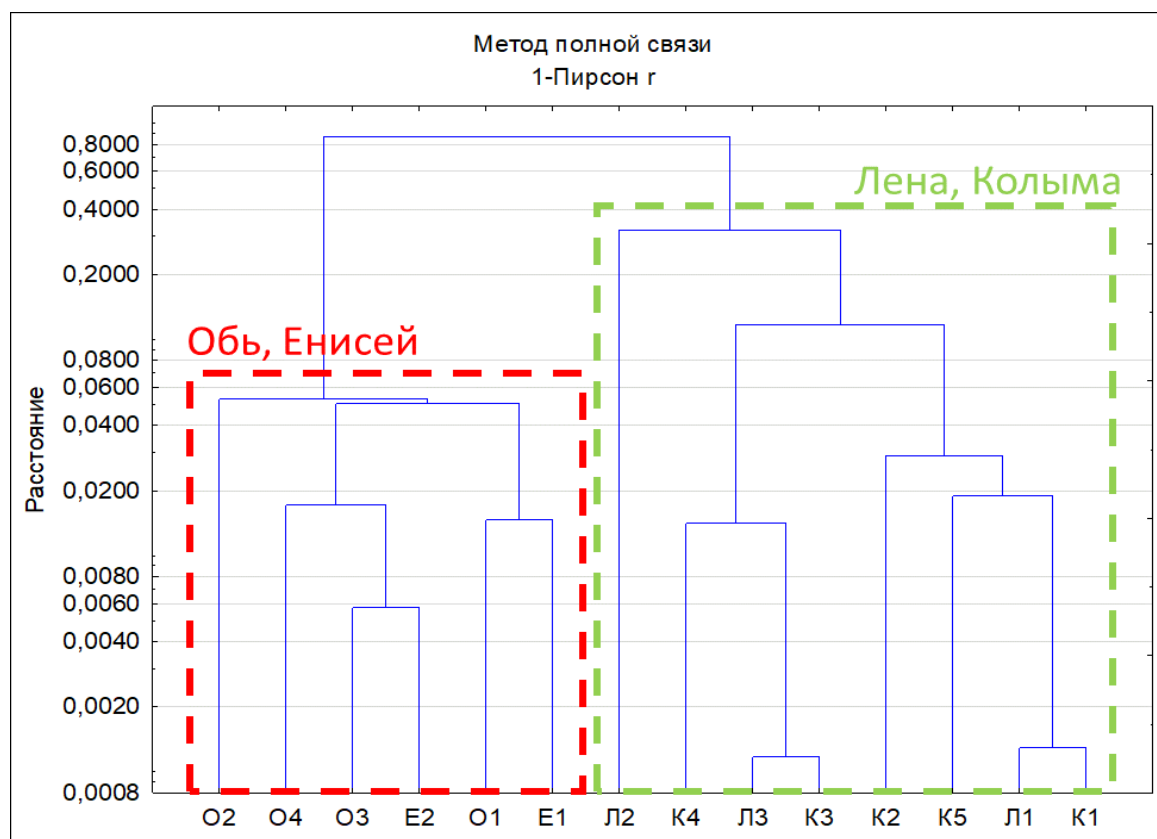
| Река   | Сезон | $K_{п}$ | Фаза ВР        | Модальность | Бассейновая. % | Русловая. % | SDфр. % | PM <sub>разд</sub> * | $d_{50}$ . мкм | $d_{10}$ . мкм | n (число проб) |
|--------|-------|---------|----------------|-------------|----------------|-------------|---------|----------------------|----------------|----------------|----------------|
| Колыма | К3    | 5.2     | Половодье      | 2           | 44             | 56          | 6       | PM10-50              | 38             | 5.43           | 30             |
| Колыма | К4    | 2.5     | Спад половодья | 2           | 46             | 54          | 6       | PM10-50              | 29             | 5.46           | 18             |
| Колыма | К5    | 2.1     | Межень         | 2           | 57             | 43          | 3       | PM10-50              | 13             | 5.17           | 18             |
| Колыма | К2    | 2.5     | Спад половодья | 3           | 62             | 38          | 12      | PM10-50              | 25             | 5.26           | 31             |
| Колыма | К1    | 2.5     | Межень         | 2           | 52             | 48          | 13      | PM10-50              | 26             | 5.49           | 49             |
| Енисей | Е1    | 4.5     | Половодье      | 2           | 40             | 60          | 10      | PM5-10               | 11             | 1.46           | 54             |
| Енисей | Е2    | 0.9     | Межень         | 2           | 34             | 66          | 7       | PM5-10               | 14             | 1.66           | 19             |
| Лена   | Л2    | 3.9     | Половодье      | 2           | 44             | 56          | 15      | PM10-50              | 39             | 5.64           | 22             |
| Лена   | Л3    | 3       | Спад половодья | 2           | 26             | 74          | 5       | PM10-50              | 63             | 7.66           | 29             |
| Лена   | Л1    | 1.3     | Межень         | 2           | 50             | 50          | 8       | PM10-50              | 24             | 5.53           | 9              |
| Обь    | О3    | 2.5     | Спад половодья | 2           | 50             | 50          | 7       | PM5-10               | 13             | 1.84           | 24             |
| Обь    | О4    | 1       | Межень летняя  | 2           | 43             | 57          | 3       | PM5-10               | 15             | 1.93           | 18             |
| Обь    | О1    | 0.9     | Межень осенняя | 3           | 48             | 52          | 8       | PM5-10               | 15             | 1.71           | 15             |
| Обь    | О2    | 0.5     | Межень зимняя  | 3           | 39             | 61          | 13      | PM5-10               | 20             | 2.7            | 8              |

\*PM<sub>разд</sub> – Граничный диапазон фракций бассейновой и русловой составляющих стока наносов. Из-за особенности выбранных диапазонов разбиения результатов анализа гранулометрического состава, граничной фракцией была принята ½ диапазона.

Модальность распределения гранулометрического состава обусловлена вовлечением более мелкой бассейновой (<50 мкм) и более крупной русловой фракции в транспорт наносов (Алексеевский, 1998; Гусаров, 2015). Предложена методика определения доли русловой и бассейновой фракции, основанная на анализе граничного диаметра - минимуме функции распределения грансостава между двумя пиками концентрации. Бассейновая составляющая стока взвешенных наносов в нижнем течении Арктических рек меняется от 34% (р. Енисей) до 62% (р. Колыма) (табл. 4). Для р. Колыма граничные значения фракций – PM30 (в среднем бассейновая фракция – 52%, русловая – 48%); для р. Енисей – PM7.5 (в среднем бассейновая фракция – 37%, русловая – 63%); для р. Лена – PM30 (в среднем бассейновая фракция – 40%, русловая – 60%); для р. Обь – PM7.5 (в среднем бассейновая



фракция – 45%, русловая – 55%). Таким образом, значения русловой и бассейновой составляющих в стоке взвешенных наносов нижнего течения крупных Арктических рек сопоставимы, однако русловая составляющая преобладает. Отмеченная бóльшая доля бассейновой составляющей на р. Колыме (в среднем 52%, в отдельные фазы до 62%) связана с поступлением более мелких взвесей (PM1-10) с территорий разработок в бассейнах рек Омолон, Малый и Большой Анюй. На р. Колыма существенное влияние на поступление наносов PM5-10 оказывает разрушение береговых обнажений вечномёрзлых пород. Только с ледового комплекса Дуванный Яр, расположенного в 115 км выше контрольного створа, в летние дни в реку поступает не менее 10 мутьевых водотоков (с концентрацией взвеси более 1 г/л) с суммарным дебитом 10 л/с, определяющих привнос и поступлением не менее 1 кг/с взвеси (Чалов и др., 2022).



**Рисунок 2.** Группы измерений по сезонам, выделенные в группировки, согласно результатам кластерного анализа (для каждого из сезонов (табл. 3) отбирались средние значения по 12 фракциям в диапазоне PM1-2500).

## Глава 5. Оценка содержания металлов и металлоидов во взвешенных наносах крупнейших рек российской Арктики

Металлы и металлоиды в водах рек Обь, Енисей, Лена и Колыма переносятся преимущественно во взвешенной форме ( $DS > 50\%$ ). Катионогенные элементы Al, Cs

переносятся исключительно во взвешенной форме (>98%), малоподвижные катионогенные элементы Fe, Zr, Mn, Co, Cr – во взвешенной форме (>75%). Для смешанной группы подвижных элементов (V, W, Pb, Zn, Cd, Ni, As) характерен транспорт преимущественно во взвешенной форме (50–75%). Транспорт анионогенных элементов и элементов-комплексобразователей (Sn, U, Cu, Sb) осуществляется преимущественно в растворённой форме (25–50%), Mo, Sr – полностью в растворённой форме (<25%). С изменением водности меняется и форма транспорта элементов. В период повышенной водности только Sb, Mo, Sr переносятся полностью или преимущественно в растворённой форме, тогда как в период малой водности преимущественно растворённая форма транспорта характерна для W, Cd, Ni, As, Sn, U, Cu, Sb, Mo, Sr.

Сравнение содержания 20 рассматриваемых металлов и металлоидов (табл. 5) показало, что для р. Обь наиболее высоки концентрации элементов: Fe, Mn, Zn, As, Sn. Эта группа элементов активно мигрирует в составе взвешенных наносов в период межени, поступая в составе органической взвеси из малых рек, дренирующих заболоченные части водосбора, а также в результате антропогенной деятельности на водосборе. Наносы р. Енисей отличаются более низкими, чем остальные реки концентрациями большинства ММ, однако группа Sr, Ni, Cu, Co, Mo – элементов, входящих в состав основных пород и поступающих в результате эрозии горных пород на правом берегу реки – имеет повышенные концентрации. Для р. Лена максимальны концентрации Al, Sr, Zr и U – элементов, входящих в состав пород на водосборе, а также техногенного элемента Cd. Повышенное содержание тяжёлых металлов Cr, V, Pb, Co, Ni, Cu, W, Mo свойственно участку р. Лена ниже г. Якутск. В р. Колыма в составе наносов отмечено наиболее высокое содержание Mo, Sb, а также повышенное W, V, Cs, Sn, As. Эти элементы поступают вместе с талыми водами, а также при разработке месторождений полезных ископаемых на притоках реки. Концентрации As, Fe, Mn возрастают в период спада половодья и летней межени когда начинается активное таяние ледовых комплексов на берегах реки.

Полученные зависимости между коэффициентом водности и содержанием элементов во взвеси показали концентрирование Cr, Mn, Zn, As, Pb, Cu при уменьшении  $Km$  ( $R^2 = -0.35 \dots -0.6$ ). Оно происходит в результате усиления процессов таяния мерзлоты и возрастания доли техногенной взвеси в результате снижения содержания  $SiO_2$  в потоке наносов. С увеличением доли бассейновой фракции наносов возрастает концентрация V, Mn, Zr, Cs, W ( $R^2 = 0.53-0.80$ ). Это малоподвижные элементы, концентрирующиеся в наиболее тонких частицах взвешенных наносов.

Таблица 5

Содержание ММ в составе взвешенных наносов и средние расходы ММ в период открытого русла в замыкающих створах рек

| Элемент   | Средние концентрации ММ в период открытого русла, мкг/г |        |       |        | Средний расход ММ в период открытого русла, г/с |        |       |        |        |
|-----------|---|--------|-------|--------|---|--------|-------|--------|--------|
|           | Обь   | Енисей | Лена  | Колыма | Обь   | Енисей | Лена  | Колыма | ∑Реки  |
| <b>Fe</b> | 66215   | 46508  | 60648 | 45427  | 31012   | 51811  | 45567 | 17637  | 146027 |
| <b>Al</b> | 55790   | 50334  | 99249 | 72695  | 29678   | 68537  | 85304 | 29997  | 213516 |
| <b>Mn</b> | 2751  | 1239   | 2386  | 1812   | 1091  | 1681   | 1429  | 469    | 4670   |
| <b>Zn</b> | 270   | 141    | 254   | 194    | 108   | 177    | 213   | 66     | 564    |
| <b>Sr</b> | 145   | 198    | 292   | 159    | 81  | 167    | 208   | 69     | 525    |
| <b>Cr</b> | 100   | 101    | 119   | 104    | 57  | 96     | 84    | 34     | 271    |
| <b>Zr</b> | 92  | 60     | 140   | 90     | 52  | 53     | 117   | 35     | 257    |
| <b>V</b>  | 87  | 87     | 129   | 125    | 59  | 114    | 122   | 49     | 344    |
| <b>Ni</b> | 50  | 52     | 56    | 40     | 33  | 60     | 47    | 14     | 154    |
| <b>Cu</b> | 35  | 45     | 46    | 37     | 18  | 72     | 39    | 12     | 141    |
| <b>Pb</b> | 27  | 19     | 31    | 25     | 13  | 12     | 27    | 9      | 61     |
| <b>As</b> | 24  | 4.9    | 8.7   | 21     | 9.2   | 3.4    | 9.1   | 7.6    | 29     |
| <b>Co</b> | 18  | 21     | 25    | 16     | 10  | 27     | 20    | 6      | 63     |
| <b>Sn</b> | 6.9   | 2.2    | 3.2   | 5      | 3.6   | 3.5    | 3     | 1.6    | 12     |
| <b>Cs</b> | 3.8   | 2.6    | 4.7   | 4.6    | 2.5   | 1.8    | 4.4   | 1.9    | 11     |
| <b>U</b>  | 2.1   | 2      | 3.8   | 2      | 1.2   | 1.1    | 2.6   | 0.85   | 5.6    |
| <b>W</b>  | 1   | 0.62   | 1.5   | 1.2    | 0.72  | 0.20   | 1.2   | 0.45   | 2.6    |
| <b>Sb</b> | 0.94  | 0.81   | 0.58  | 1.2    | 0.54  | 0.49   | 0.86  | 0.44   | 2.3    |
| <b>Cd</b> | 0.36  | 0.38   | 1.3   | 0.33   | 0.15  | 0.31   | 0.54  | 0.12   | 1.1    |
| <b>Mo</b> | 0.2   | 1.1    | 0.9   | 1.5    | 0.22  | 1.1    | 1.3   | 0.55   | 3.1    |

Рассчитаны потоки тяжелых металлов во взвешенной ( $W$ ) форме в устьевые области исследуемых рек:

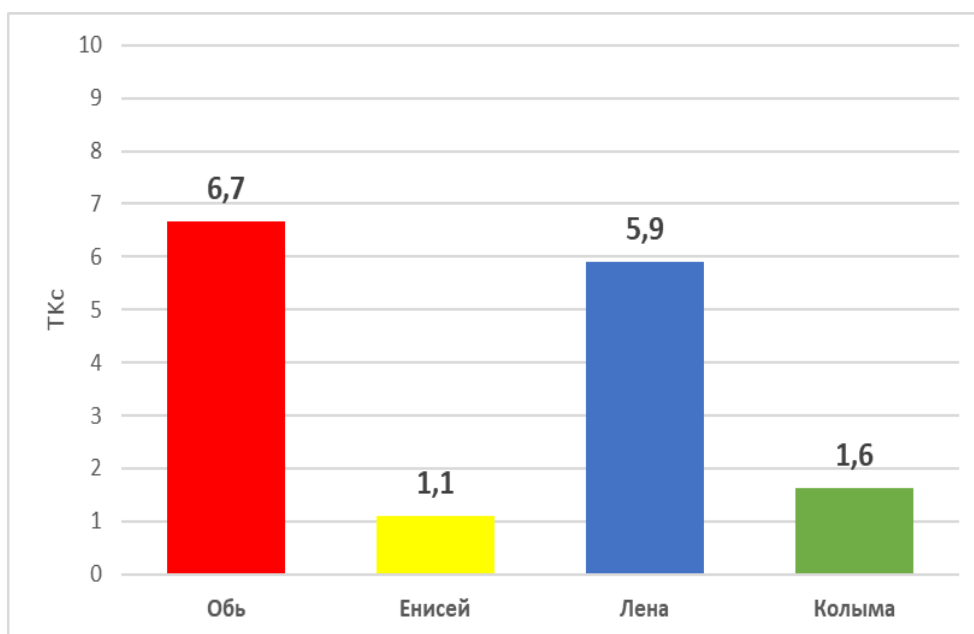
$$Wi = Q \cdot (Ci \cdot SSCi) / 10^6, \quad (6)$$

где  $Wi$  – поток  $i$ -элемента во взвешенной форме, г/с;  $Q$  – среднесуточный расход воды на г/п (УГМС), репрезентативных для створов измерений, м<sup>3</sup>/с;  $SSCi$  – измеренная концентрация наносов, г/м<sup>3</sup>,  $Ci$  – измеренная концентрация ММ в составе наносов, мкг/г. Суммарные потоки 20 ММ в период открытого русла максимальны для р. Лена – 36% от общего стока химических элементов рассматриваемых четырех рек. Р. Енисей выносит 33% от общего стока, р. Обь – 16%. При рассмотрении стока ММ для р. Обь с учётом зимней межени, поток каждого элемента уменьшается в 0,8 раза, относительно тёплого периода. Вклад р. Колыма составляет 13% от общего стока химических элементов. Доля выноса ММ в среднесуточном стоке взвешенных наносов рек (Магрицкий, 2016) для периода открытого русла составляет: р. Обь – 13%, р. Енисей – 31%, р. Лена – 19%, р. Колыма – 20%. За исключением Fe, Al, Mn, оставшиеся 17 ММ составляют около 0.1% от общего потока наносов. Размеры рек и техногенный фактор определяют изменчивость концентраций ММ в пределах поперечного сечения рек. Коэффициент вариации концентраций элементов, рассчитанный как среднее значение для всех концентраций ММ в створе реки, максимален для рек с наибольшей водностью в период половодья: р. Енисей ( $Cv = 80\%$ ), р. Лена ( $Cv = 77\%$ ). В остальные сезоны  $Cv$  находится в диапазоне от 10 до 60. Средний  $Cv$  для исследуемых рек за все сезоны составляет: р. Обь – 45%, р. Енисей – 67%, р. Лена – 50%, р. Колыма – 39%. На примере р. Колыма (2021 г.) временная изменчивость в течении года была сопоставлена с изменением концентраций ММ полученных по серии из 12 пробоотборов (половодье–межень) в створе. Среднее значение  $Cv$  за весь 2021 г. составило 39%. В половодье средний  $Cv$  концентраций элементов в пределах поперечных сечений постепенно увеличивался, начиная с 70%. Наибольшие значения  $Cv$  элементов в створе на р. Колыма наблюдались на спаде половодья (180%), а в межень значения уменьшались до 32%. В результате, определённая вариабельность значений  $Cv$  концентраций ММ в створе (57%) превышает показатели среднегодовой изменчивости за 2021 г.

Коэффициент вариации элементов в среднем по сезонам уменьшается в ряду:  $Sn > Cd > Mo > Sb > Cu > Zn > W > As > V > Cr > Ni > Mn > Pb > Cs > Zr > Co > Sr > U > Al > Fe$  с 106% до 28%. На реке Обь максимальная изменчивость наблюдается для V, Cr, Cd, Mo, Sn (>100%). На реке Енисей выделяются элементы As, Sn, W (>100%); на р. Лена – Mo, Cd, Sn; на р. Колыма – Cd, Sn.

Расчёт кларков концентрации ( $Kk$ ) относительно среднего содержания ММ в горных породах и коэффициентов концентрирования ( $Kc$ ) в наносах рек мира позволил выявить

характерные ассоциации элементов и определить источники их поступления. Для ассоциации Fe, Mn, As и Cd в бассейне Оби источником служат заболоченные почвы водосбора (Krickov et al., 2023). Cu, Zn, Cr поступают вместе со стоками промышленных предприятий, а также с техногенными взвесями, генерируемыми речным транспортом (Касимов и др., 2019). Ассоциация элементов Mn, Sr на р. Лена имеет природное происхождение, тогда как Zn, Cd – результат воздействия сточных вод г. Якутск. Для р. Колыма характерно наличие повышенных  $K_c$  для Mn, Zn, Sn, As. Источником Mn и As можно считать болотные и озёрные воды левых притоков реки, поступающие с Нижнеколымской низменности и ледового комплекса Дуванный Яр. Для р. Енисей выделяются металлы Sr, Cr, Co, Cu, Zn, Mn, Ni, характерные для основных пород, которыми сложен правый берег реки (Томшин, Копылова, 2017). Распределение  $TK_c$  в реках Енисей и Колыма отличается от рек Лена и Обь за счет меньшего антропогенного воздействия (рис. 3). Потоки наносов рек Енисей и Колыма незначительно обогащены ММ. Однако для р. Енисей наблюдаются незначительные превышения  $K_c$  (1.2–1.7) для большой ассоциации элементов: Mn, Zn, Cr, Ni, Sr, Co, Cu, тогда как для р. Колыма большой  $TK_c$  связан только с Mn, Sn, Zn, As ( $K_c > 1.5$ ), т.е. вклад отдельных превышений в  $TK_c$  более значительный.



**Рисунок 3** Суммарный коэффициент  $TK_c$  для исследуемых рек.

Участки нижнего течения исследуемых рек формируют ассоциации химического состава взвеси, сильно отличающиеся от их верхнего и среднего течения. Значения  $K_c$  для замыкающих створов рек Лена и Енисей были сопоставлены с сильно антропогенно нарушенными участками – р. Лена в районе г. Якутск и р. Селенга в нижнем течении

(Thorslund et al., 2017; Chalov et al., 2020).  $TKc$  для р. Енисей равен 1.1 и меньше, чем для р. Селенги, расположенной в верхней части его бассейна ( $TKc$  равен 8.7). Вероятно, из-за влияния каскада ГЭС поллютанты осаждаются в водохранилищах и не поступают в замыкающий створ. В нижнем течении р. Лена концентрации ММ значительно меньше, чем в ее среднем течении, в районе г. Якутска. Здесь имеют место наиболее высокие концентрации техногенных элементов (Cd, Cr, Ni, W, Mo) и повышенные концентрации всех остальных элементов ( $TKc$  равен 160).

Кластерный анализ концентраций ММ в наносах рек (иерархическая классификация, метод полной связи,  $p < 0.05$ ) позволил выделить для р. Енисей ассоциацию элементов, которые поступают в результате эрозии водосбора (Cr, Co, Cu, Mn, Ni). Также была выделена группа ММ, которые, напротив, рассеиваются (Zn, Cd, Cs, Pb, U, Sb, As, Mo). На р. Лена выявлены 3 ассоциации элементов – техногенные (Cr, Ni, W, Mo, Co, Cu), поступающие из горных пород (Al, Sr, Zr, U, Cs, Pb) и поступающие с талыми водами ММП (V, Fe, Zn, As, Mn, Cd). Для рек Обь и Колыма выявлено большое количество парных группировок элементов, что может указывать на разнообразие источников их поступления.

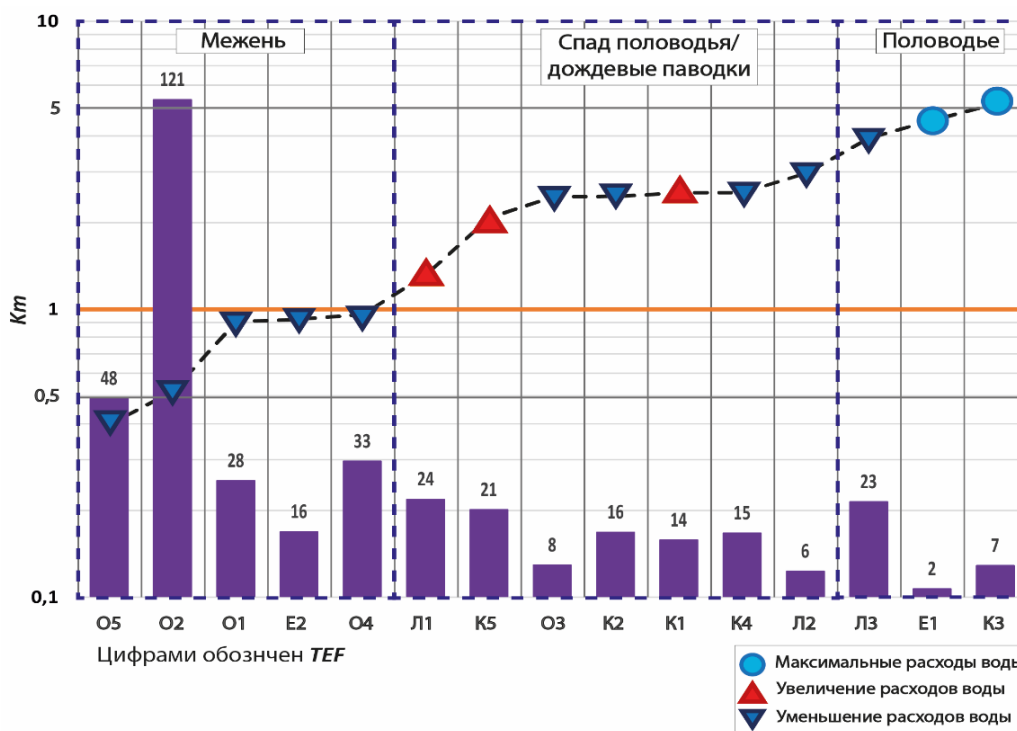
Коэффициент  $EF$ , характеризующий отличие концентраций ММ в составе наносов от среднего состава земной коры (Hu, Gao, 2003; Rudnick, Gao 2003) был принят как характеристика степени загрязнения наносов. В каждой из рек были выявлены элементы, отличающиеся повышенным значением коэффициента  $EF$  (табл. 6). Коэффициент  $EF$  был посчитан для каждой из фаз водного режима (табл. 3). Затем уровни загрязнения для всех элементов для одной фазы ВР были суммированы для получения обобщённого коэффициента обогащения наносов ( $TEF$ ) (рис. 4). Уровень загрязнения ( $TEF$ ) сильно зависит от значения  $Km$ . Между  $TEF$  разных фаз водного режима (кроме O2) и  $Km$  была получена зависимость ( $R^2 = 0.55$ ), характеризующая разбавление загрязнения во взвеси с увеличением водности:

$$TEF = 4.8121e^{-0.049Km} \quad (6)$$

**Таблица 6**

Уровень загрязнения ММ, согласно классификации (Shtherland, 2000)

| Река   | Умеренное ( $EF=2-5$ )         | Высокое ( $EF=5-20$ ) |
|--------|--------------------------------|-----------------------|
| Обь    | Mn, Sn, Sb, Fe, Pb, Cu, Ni, Mo | As, Zn, Cd            |
| Енисей | Zn, Cd                         |                       |
| Лена   | Zn, Mn                         | Cd                    |
| Колыма | As, Zn, Cd, Mn, Sn, Sb         |                       |

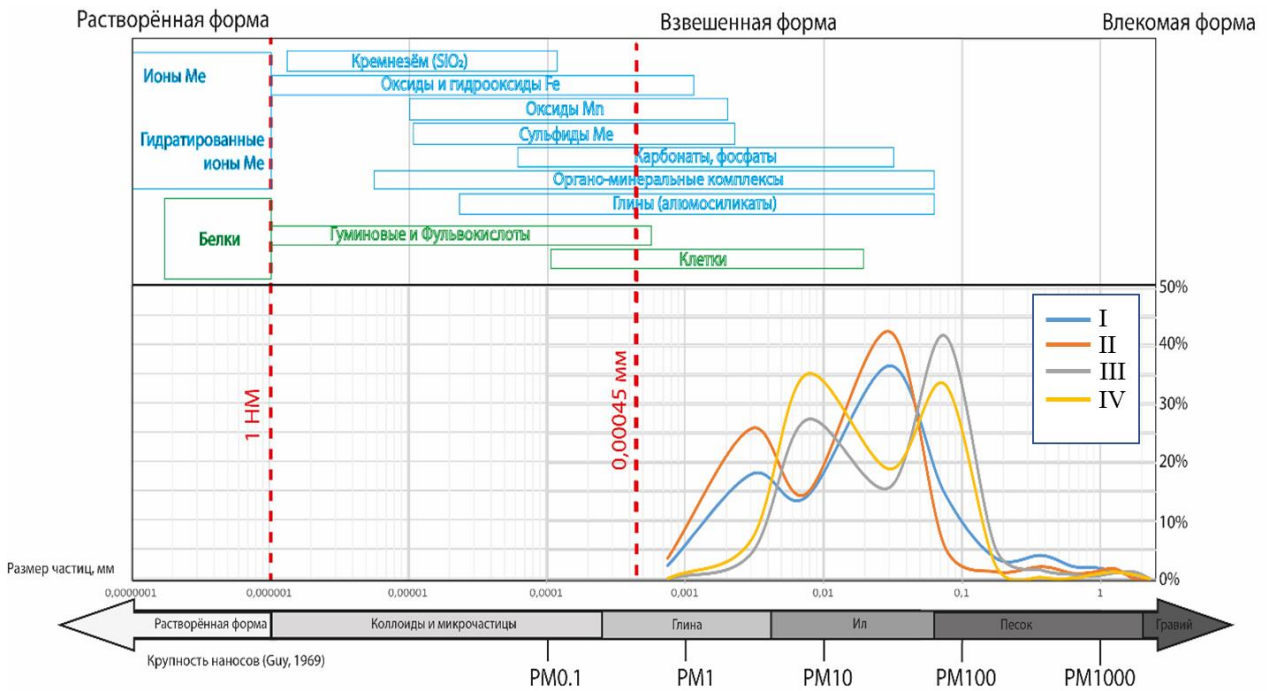


**Рисунок 4.** Изменчивость значения суммарного коэффициента обогащения ( $TEF$ ) и модульного коэффициента водности ( $Km$ ) по фазам водного режима (табл. 3).

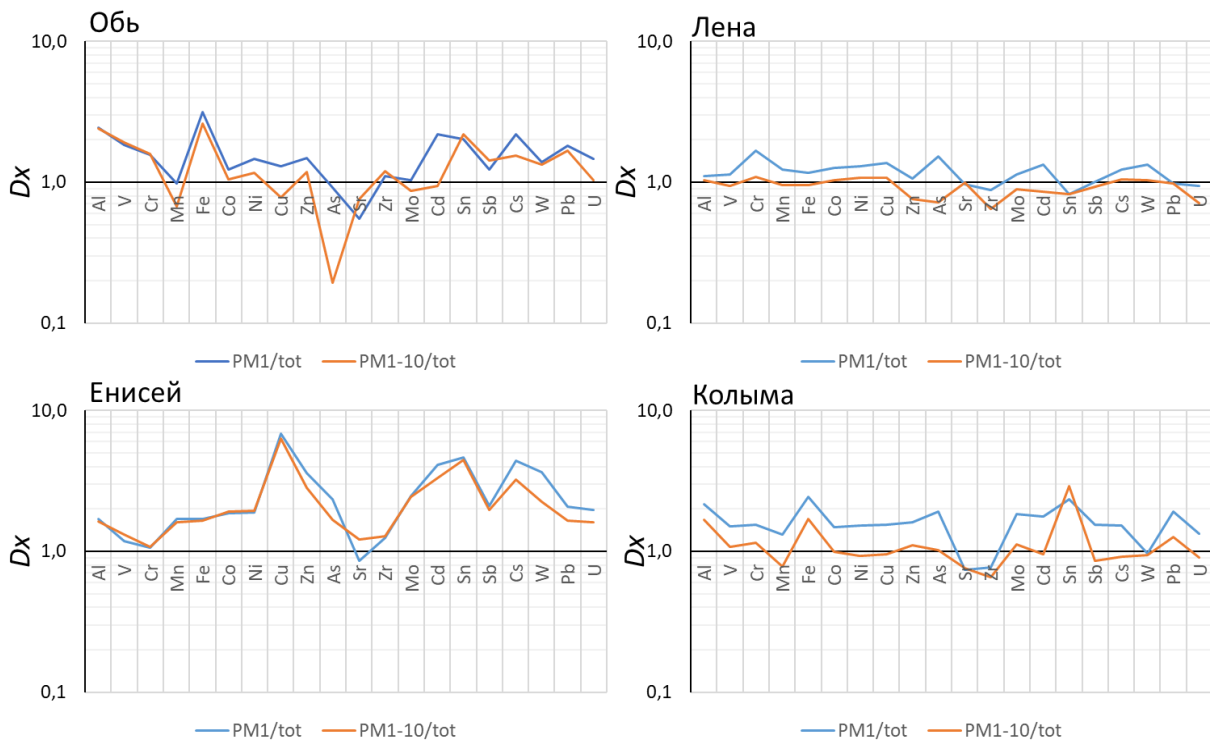
## Глава 6. Распределение концентраций металлов и металлоидов во фракциях наносов крупнейших рек российской Арктики

Для оценки влияния крупности наносов на их химический состав был проведен анализ данных о распределении химических элементов во фракциях PM1, PM1-10 и общей пробе взвешенных наносов, отобранной с помощью зонда-ловушки. Исследуемые элементы Al, V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, As, Sr, Zr, Mo, Cd, Sn, Sb, Cs, W, Pb, U переносятся во фракции PM1-PM50 в составе кристаллических решёток минералов, глинистых частицах (алюмосиликатах), крупных органических частицах. Во фракции PM1-PM10 транспорт осуществляется в составе органоминеральных, гидрокарбонатных и фосфатных комплексов. Во фракции PM0,1-PM1 они переносятся как оксиды, сульфиды и окисленные формы металлов. Органические молекулы, а также клетки микроорганизмов переносятся во фракции PM0,1-PM15 (рис. 5).

В нижнем течении рек Обь, Енисей, Лена и Колыма концентрирование элементов во фракции PM1, относительно общей концентрации во взвеси (коэффициент  $D_x$ ), в среднем увеличивается: в р. Обь в 1.57 раза, в р. Енисей в 2.56 раза, в р. Лена в 1.17 раза, в р. Колыма в 1.6 раза. Во фракции PM1-10 концентрация увеличивается р. Обь в 1.33 раза, р. Енисей в 2.27, р. Лена уменьшается в 0.17 раза, р. Колыма в 1.13 раза. Суммарное концентрирование в мелкой фракции максимально для рек Енисей и Колыма (рис. 6).



**Рисунок 5.** Распределение форм миграции химических веществ, транспортируемых потоком, осреднённые кривые распределения гранулометрического состава рек Обь (I), Енисей (II), Лена (III), Колыма (IV) и их характерные размеры в значениях РМ.



**Рисунок 6.** Коэффициент концентрирования наносов ( $D_x$ ) в фракциях РМ1 и РМ1-10 относительно общего содержания наносов в ловушках для исследуемых рек.

В реках Колыма и Обь наблюдаются превышения концентраций Al, Sn, Fe более чем в 2 раза во фракциях РМ1 по сравнению с общими концентрациями. Большая часть



анализируемых элементов в PM1 превышает общие концентрации в 1–2 раза, а Sr, напротив, меньше общего содержания в 0.5 раза (рис. 6). Для реки Енисей (фракция PM1) элементы U, Pb, Sb, As, Mo превышают общие концентрации более чем в 2 раза, Zn и W – в 3 раза, Cd, Cs, Sn – в 4 раза, Cu – в 6 раз. Для р. Лена, напротив, отклонения от валовых концентраций не превышают 1.7 раза, что связано с незначительным вкладом частиц PM1 в поступление ММ. Коэффициент  $D_x$  фракции PM1-10 характеризуется превышением общих концентраций менее чем в 2 раза для всех ММ реки Обь, за исключением Al, Fe. Во фракции PM1-10 отмечается пониженное содержание Sr, Mn, Cu, As, Mo, Cd. Для рек Лена и Колыма концентрации PM1-10 приблизительно соответствуют общим концентрациям в интегральной пробе. Для р. Енисей содержание всех ММ повышено относительно общих концентраций, однако значения  $D_x$  меньше, чем во фракции PM1. Кластерный и корреляционный анализ концентраций микроэлементов подтверждает выделенные группы с повышенной и пониженной концентрациями в каждой из фракций. Для фракции PM1 можно выделить ассоциацию Al, Cs, As, Sb, Zr, Pb (корреляция внутри группы  $R^2 > 0.5$ ), Mn, Mo, Cd, U ( $R^2 > 0.45$ ), Co, Ni, Cu ( $R^2 > 0.6$ ). Для фракции PM1-10 можно выделить более устойчивые ассоциации элементов Al, Zr ( $R^2 = 0.8$ ), V, Fe, Sr, Cr, Co, Ni ( $R^2 > 0.6$ ), Zn, Mo, Cd, U, W, Pb ( $R^2 > 0.5$ ) и As, Sn ( $R^2 > 0.6$ ), Sb, Cs ( $R^2 > 0.7$ ). Полученные результаты согласуются с результатами работ по концентрированию ММ в мелких фракциях почв, дорожной пыли и речных наносов (Zhang et al., 2013; Lanzerstorfer, 2018; Ma et al., 2019; Vlasov et al., 2021; Bezberdaya et al., 2022). Таким образом, именно фракция PM1 и PM1-10 определяет химический состав взвешенных наносов в рассматриваемых реках.

Различия в крупности взвеси исследуемых рек и закономерности распределения ММ по фракциям проявляются в распределении доли взвешенных форм ММ (величина  $DS$ ) в пределах поперечных сечений. В реках с меньшей долей тонких фракций PM10 (р. Лена и р. Колыма) доля ММ в составе взвешенных наносов увеличивается к придонным слоям (на 5–20%). Максимальное увеличение отмечается в р. Колыма в период половодья: для U (на 43%), Cu (на 38%), Sb (на 60%), Mo (на 62%). В реках Енисей и Обь в период межени наблюдается увеличение концентраций элементов в поверхностных слоях на 2–10%.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Химический состав взвешенных наносов формируется в результате сложного сочетания физических и химических процессов и зависит от крупности частиц. Отличия бассейнов по условиям формирования стока наносов определяет изменение крупности взвесей и дифференциацию рек по гранулометрическому составу, что приводит к закономерным отличиям содержания ММ, вариабельности распределения состава ММ и распределений доли нерастворенной и растворенной форм в пределах поперечных сечений рек.

Существующих обобщений химического состава наносов рек Арктики недостаточно для характеристики химического стока в Северный Ледовитый океан. В крупных реках наблюдается значительная временная и пространственная неоднородность химического состава взвешенных наносов в пределах поперечных сечений, что требует использования единой методики отбора и анализа.

2. Для рек Обь, Енисей, Лена и Колыма характерен двухмодальный тип распределения фракций взвешенных наносов, определяемый вкладом более мелкой бассейновой (менее РМ10-30) и более крупной русловой составляющих в сток наносов. Средняя доля бассейновой фракции в стоке взвешенных наносов меняется от 34% на р. Енисей до 62% на р. Колыма, где ее увеличение связано с антропогенным поступлением (разработка россыпных месторождений) фракции РМ30 и выносом продуктов разрушения вечномерзлых пород и ледовых комплексов (едом). В среднем доля бассейновой фракции составляет: р. Обь – 45%, р. Енисей – 36%, р. Лена – 39%, р. Колыма – 52%. Граница бассейновой и русловой фракций наносов рек Обь и Енисей (около 7.5 мкм) меньше, чем граница рек Лена и Колыма (около 30 мкм).
3. Для нижнего течения рек Обь и Енисей характерен более мелкий, по сравнению с реками Лена и Колыма, гранулометрический состав наносов, что проявляется в пониженных пиках концентраций (фракции РМ1-5 и РМ10-50 соответственно), меньшем значении  $d_{10}$  (2.05 мкм – р. Обь, 1.53 мкм – р. Енисей, 6.28 мкм – р. Лена и 5.36 мкм – р. Колыма) и  $d_{50}$  (16 мкм – р. Обь, 12 мкм – р. Енисей, 42 мкм – р. Лена, 26 мкм – р. Колыма). Из-за более крупного состава взвеси рек Лена и Колыма с глубиной закономерно увеличивается доля взвешенных форм транспорта ММ.
4. Концентрации химических элементов в составе взвешенных наносов в нижнем течении крупнейших рек российской Арктики близки к их среднемировым концентрациям в верхней части земной коры. Для р. Обь отмечаются повышенные кларки концентрации ( $K_k$ ) элементов Zn, Mn, Sn, Sb, Fe, Pb, Cu, As, Cd; для р. Енисей – Zn, Cd, Mn, Sb, Cu; для р. Лена – As, Zn, Mn, Sn, Pb, Cu, Cd; для р. Колыма – As, Zn, Cd, Mn, Sn, Sb. Коэффициенты концентрирования ( $K_c$ ) рассчитанные относительно взвешенных наносов мира в 1.5–2 раза меньше по сравнению с  $K_k$  рассматриваемых элементов. Рассчитанный уровень загрязнения показал, что наиболее сильно подвержена антропогенному воздействию р. Обь (уровень загрязнения ( $EF$ ) элементов As, Cd, Zn >5). Наименьшее загрязнение свойственно р. Енисей. В реках выявлены устойчивые ассоциации элементов, имеющих схожие источники поступления: заболоченная часть водосбора – As, Mn, Fe (реки Обь и Колыма); продукты эрозии горных пород – Al, Sr, Zr, U, Cs (р. Лена), техногенные источники – Cr, Ni, Zn, Pb, Co, Cu (реки Обь и Лена). В р. Енисей высокая

доля элементов третьей группы объясняется естественным поступлением при эрозии водосбора реки, сложенного основными горными породами в нижнем течении.

5. Изменчивость концентраций ММ в пределах поперечного сечения отдельных рек максимальна в р. Енисей (67%) и минимальна в р. Колыма (39%), возрастает для периода половодья и спада половодья (>50%), а в межень снижается до 30–45%. При этом изменчивость  $C_v$  концентраций ММ в пределах поперечного сечения может превышать изменения средних значений  $C_v$  в течение года. Доля элементов транспортируемых во взвешенной форме в общем потоке наносов составляет: >98% (Al, Cs); >75% (Fe, Zr, Mn, Co, Cr); 50–75% (V, W, Pb, Zn, Cd, Ni, As); 25–50% (Sn, U, Cu, Sb); <25% (Mo, Sr). Вынос металлов и металлоидов в устьевые области в период открытого русла составляет около 12–24% от общего потока взвешенных наносов каждой из реки достигает максимальных значений для р. Лена (133 кг/с, или 19% от стока взвешенных наносов периода открытого русла). В р. Енисей он составляет 122 кг/с (31%), в р. Обь – 62 кг/с (13%), в р. Колыма – 48 кг/с (20%).
6. Концентрирование химических элементов происходит в наиболее мелких фракциях взвешенных наносов. Фракции РМ1 почти всегда содержат более высокие концентрации химических элементов (превышение в 1.5–2.5 раза) относительно общих концентраций в пробе. Во фракции РМ1-10 концентрации ММ также часто повышены относительно общих концентраций (превышение в 1.3–2 раза). Минимальные значения концентраций чаще всего обнаруживаются в общей пробе за счет наличия крупных частиц с малой сорбирующей способностью. Наиболее интенсивно суммарное концентрирование ММ происходит в наносах РМ1, РМ1-10 в реках Обь и Енисей; слабее – в реках Колыма и Лена, что связано с более крупным гранулометрическим составом взвеси этих рек.

### ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в рецензируемых научных изданиях, определенных в п.2.3 Положения о присуждении ученых степеней в Московском государственном университете имени М.В. Ломоносова:

1. **Efimov V.A.**, Chalov S.R., Efimova L.E., Ivanov V.A., Jarsjö J., Fisher S. Impact of mining activities on the surface water quality (case study of Khibiny mountains, Russia) // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2019. Vol. 263. P. 012008. Scopus IF (SiteScore) = 0.45, доля участия 1/6.

2. Chalov S., Moreido V., Sharapova E., Efimova L., **Efimov V.**, Lychagin M., Kasimov N. Hydrodynamic controls of particulate metals partitioning along the lower Selenga River – Main tributary of the lake Baikal // Water. 2020. Vol. 12. P. 1345. Scopus IF (SiteScore) = 4.8, доля участия 1/7.

3. Чалов С.Р., **Ефимов В.А.** Гранулометрический состав взвешенных наносов: классификации, характеристики, пространственная изменчивость // Вестник Московского университета. Серия 5. География. 2021. № 4. С. 91–103. Scopus IF (CiteScore) = 0.90, доля участия 1/2.

4. Магрицкий Д.В., Фролова Н.Л., Агафонова С.А., **Ефимов В.А.**, Василенко А.Н., Сазонов А.А., Ефимова Л.Е. Гидрологические условия в устье реки Колымы летом 2019 года // Вестник Московского университета. Серия 5. География. 2022. № 1. С. 134–151. IF (CiteScore) = 0.90, доля участия 1/7.

5. Fischer S., Mörth C.-M., Rosqvist G., Chalov S.R., **Efimov V.**, Jarsjö J. Microbial sulfate reduction (MSR) as nature-based solution (NBS) to mine drainage: Contrasting spatio-temporal conditions in northern Europe // Water Resources Research. 2022. Vol. 58. P. e2021WR031777. Scopus IF (SiteScore) = 8.2, доля участия 1/6.

#### **Иные публикации**

Полный список публикаций с учётом работ в сборниках материалов и тезисов российских и международных конференций доступен на странице соискателя в ИАС «ИСТИНА» (<https://istina.msu.ru/profile/Roxifixat/>)