

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени М.В. ЛОМОНОСОВА
ГЕОГРАФИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ

На правах рукописи

Ефимов Василий Антонович

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

1.6.16 – Гидрология суши, водные ресурсы, гидрохимия

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени
кандидата географических наук

Научный руководитель:
доктор географических наук
Чалов Сергей Романович

Москва – 2023

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	3
ГЛАВА 1. ФАКТОРЫ ФОРМИРОВАНИЯ ГРАНУЛОМЕТРИЧЕСКОГО И ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА НАНОСОВ	8
1.1 Основные показатели, характеризующие транспорт наносов в водных объектах	8
1.2 Гранулометрический состав наносов	13
1.3 Особенности формирования химического состава взвешенных наносов	20
ГЛАВА 2. ИЗУЧЕННОСТЬ РАСТВОРЁННЫХ И ВЗВЕШЕННЫХ ФОРМ МИГРАЦИИ ХИМИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ В РЕКАХ РОССИЙСКОЙ АРКТИКИ	32
2.1 Общие сведения о гидрологическом режиме рек российской Арктики	32
2.2 Сводная база данных о химическом составе воды и наносов рек российской Арктики	35
2.3 Условия формирования потока и химического состава наносов в бассейнах рек Обь, Енисей, Лена и Колыма	46
ГЛАВА 3. МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ СОСТАВА ВЗВЕШЕННЫХ НАНОСОВ КРУПНЕЙШИХ РЕК РОССИЙСКОЙ АРКТИКИ	50
3.1 Материалы и методы исследования	50
3.2 Характеристики замыкающих створов в период проведения работ	55
3.3 Аналитические методы и статистическая обработка данных	58
3.4 Особенности применяемой методики измерений наносов	64
ГЛАВА 4. ГРАНУЛОМЕТРИЧЕСКИЙ СОСТАВ ВЗВЕШЕННЫХ НАНОСОВ КРУПНЕЙШИХ РЕК РОССИЙСКОЙ АРКТИКИ	69
4.1 Общие характеристики концентрации взвешенных наносов в замыкающих створах крупнейших рек российской Арктики	69
4.2 Общие характеристики гранулометрического состава наносов в замыкающих створах крупнейших рек российской Арктики	74
ГЛАВА 5. ОЦЕНКА СОДЕРЖАНИЯ МЕТАЛЛОВ И МЕТАЛЛОИДОВ ВО ВЗВЕШЕННЫХ НАНОСАХ КРУПНЕЙШИХ РЕК РОССИЙСКОЙ АРКТИКИ	89
5.1 Гидрохимические условия транспорта металлов и металлоидов в реках	89
5.2 Содержание металлов и металлоидов во взвешенных наносах	93
5.3 Сравнительный анализ химического состава взвеси Оби, Енисея Лены и Колымы	99
ГЛАВА 6. РАСПРЕДЕЛЕНИЕ КОНЦЕНТРАЦИЙ МЕТАЛЛОВ И МЕТАЛЛОИДОВ ВО ФРАКЦИЯХ НАНОСОВ КРУПНЕЙШИХ РЕК РОССИЙСКОЙ АРКТИКИ	109
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	116
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ	118
ПРИЛОЖЕНИЕ I	132

ВВЕДЕНИЕ

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, 2003; Голосов, 2006; Syvitski, Kettner, 2011; Milliman, 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; Шамо́в, 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., 2009].

Суммарно на реки Арктического 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; Геоэкологическое..., 2007; Шикломанов, 2008; Магрицкий, 2016; Dixon, 2016] в результате климатических изменений, таяния наземной и субаквальной 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., 2013; Гордеев, 2012]. 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 (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 в 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 161 источника и приложения. Работа изложена на 135 страницах текста. В ней содержится 69 рисунков и 18

таблиц. Список литературы включает в себя 71 публикацию на русском и 90 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; к.г.н., с.н.с., Л.Е. Ефимовой за помощь в проведении лабораторных работ и интерпретации результатов; участникам экспедиций в бассейны Арктических рек в 2018–2021 годах: д.г.н., проф. Н.Л. Фроловой, к.г.н., доц., Д.В. Магрицкому, н.с., Д.И. Школьному, к.г.н., А.С. Цыпленкову, ст. преп., А.Н. Василенко, к.г.н., н. с., А.А. Сазонову, инж., С.В. Платонову, инж. А.А. Попрядухину, к.г.н., с.н.с, В.М. Морейдо, К.Н. Прокопьевой, инж., А.Ю. Тришину и другим сотрудникам, аспирантам и студентам географического факультета МГУ; за консультации по вопросам геохимии и помощь в интерпретации результатов, внимание к работе и конструктивные замечания: академику РАН, д.г.н., проф., Н.С. Касимову, к.г.н. доц., М.Ю. Лычагину, к.г.н., с.н.с., О.Н. Ериной, д.г.-м.н., проф., В.С. Савенко, д.г.-м.н., с.н.с., А.В. Савенко, к.г.н. Г.Л. Шинкарёвой, д.г.н., проф., Н.Е. Кошелевой; а также Н.С. Зимову, С.А. Зимову и всем сотрудникам Северо-Восточной научной станции РАН; М.А. Кузнецову и сотрудникам Салехардского ЦГМС.

ГЛАВА 1. ФАКТОРЫ ФОРМИРОВАНИЯ ГРАНУЛОМЕТРИЧЕСКОГО И ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА НАНОСОВ

1.1 Основные показатели, характеризующие транспорт наносов в водных объектах

Одной из наиболее интересных и сложных задач гидрологии является изучение речных наносов. Наносами называются нерастворённые (твёрдые) частицы различного размера и генезиса, транспортируемые потоком во взвешенном или влекомом состоянии и формирующие ложе водотоков и водоёмов [Чалов, 2008]. К наносам относятся как минеральные частицы (фрагменты горных пород, вторичнообразованные минералы, конгломераты почв), так и органические частицы, водоросли, минеральное биогенное вещество, а также частицы антропогенного происхождения.

Учение о речных наносах включает в себя изучение генезиса наносов, гидродинамическую теорию транспорта и переотложения наносов, теорию процессов формирования стока наносов и исследования географических аспектов его распределения, а также применение новейших методов измерения и моделирования данных процессов. Наиболее эффективный анализ формирования и движения различных форм наносов связан с комплексным использованием достижений различных областей науки. В изучении транспорта взвешенных частиц водными объектами используются принцип географической зональности, а также пространственной и временной изменчивости стока наносов. При изучении стока наносов необходимо оценивать интенсивность процессов эрозии и аккумуляции в различных звеньях речного бассейна, специфику условий формирования и перемещения речных наносов, неоднородности состава транспортируемого материала на всём пути перемещения, структурности форм перемещения влекомых наносов, гидродинамического процессов формирования стока наносов [Караушев, 1977, Чалов, 2008, Чалов 2021]. Сейчас, к взвешенным наносам исследователи относят не только частицы природного, но также и частицы антропогенного происхождения [Zobkov, Evsukova, 2018].

Генезис наносов может быть различным. Минеральные частицы могут поступать в водный объект в результате эрозии водосбора, эрозии русел водотоков, абразии берегов водотоков и водоёмов. В зависимости от характеристик объекта эрозии, наносы могут иметь различные физические характеристики, в первую очередь - размер (геометрическая крупность, гидравлическая крупность). Форму и размер наносов в значительной степени определяет плотность разрушаемых минералов и отложений. Размеры частиц наносов d (мм) характеризуют физическую форму их переноса речными потоками: в грубодисперсном состоянии ($d > 0.0001$ мм), в коллоидно-дисперсном состоянии (в составе коллоидов: $0.000001 < d < 0.0001$ мм), в

молекулярно-(ионно) дисперсном состоянии (в истинно-растворенной форме, или в растворенной форме: $d < 0.000001$ мм). Критерием выделения коллоидной формы служат положения традиционной коллоидной химии: коллоиды — это частицы органического или неорганического вещества достаточно крупные, чтобы иметь супрамолекулярную структуру и свойства, которые заметно отличаются от свойств только водной фазы, такие как, возможность конформационных изменений или развитие электрического поля на поверхности [Wilkison, Lead, 2007]. Граница коллоидной и растворённой форм определяется условием, согласно которому, водные коллоиды - частицы такого размера, что при отсутствии сорбционных и коагуляционных процессов, броуновского движения достаточно для удержания их во взвешенном состоянии в толще воды в течение длительных периодов (часов / дней). На этой границе, гетерогенная (коллоидная) система переходит в гомогенный молекулярный раствор (растворённая форма). Она составляет около 0.001 мкм [Глазовская, Геннадиев, 1995]. Верхний предел размера коллоидов определяется слабой выраженностью межфазных химических процессов из-за незначительного отношения поверхности частицы наносов (твёрдая фаза) к объёму коллоида/частицы (дисперсная фаза) [Wilkinson, Lead, 2007]. Поскольку коллоиды можно отнести к дисперсным (гетерогенным) средам, к которым относятся взвешенные наносы, то их нижнюю границу следует считать физической границей речных наносов. Тогда, наносами следует называть нерастворенные вещества (с крупностью более 0.001 мкм – коллоиды, глинистые, илистые, песчаные и крупнообломочные частицы), являющиеся продуктами разрушения горных пород, почв, органических остатков, трансформирующиеся под воздействием флокуляции и сорбционных процессов, которые в данной гидроклиматической обстановке могут перемещаться речными потоками [Чалов, 2021]. На практике, в качестве нижней границы диапазона речных наносов приняты размеры пор фильтров, используемых при выделении взвеси (с диаметром пор 0.22 или 0.45 мкм) [Langmuir, 1997], соответственно проводится разделение «условно растворенных» и нерастворенных форм. Именно частицы, переносимые в толще потока и имеющие диаметр более 0.45 мкм, являются объектом исследования в настоящей работе и в целом при изучении взвешенных наносов в мировой науке.

Транспорт наносов осуществляется потоком в виде взвешенных и влекомых наносов [Чалов, 2008]. Четкой границы между влекомыми (W_G) и взвешенными (W_R) наносами не существует, что связано с изменением продольной и вертикальной компонент турбулентного потока, в результате чего условия взмучивания и донного влечения постоянно меняются. Высота подъема частиц мелкого песка над дном в реках измеряется десятками и сотнями диаметров частиц, что значительно больше слоя скачкообразного движения, к которому обычно относят слой движения влекомых (придонных) наносов. Этот слой повышенной мутности воды (рис. 1.1)

имеет высоту a , которая принимается равной двум диаметрам частиц d [Гришанин, 1992; Shen, Julien, 1993] (1):

$$a = 2d_{50}. \quad (1)$$

В пределах этой зоны частицы можно относить к взвешенным или к влекомым наносам [Алексеевский, 1998], однако в пределах конкретного створа слой a ограничивает движение наносов. Таким образом, в нашей работе к взвешенным частицам относятся вещества $d > 0.45$ мкм, перемещаемые в толще потока выше слоя a ; к условно растворенным – вещества $d < 0.45$ мкм, перемещаемые в этом же слое; к влекомым – вещества, переносимые в слое a .

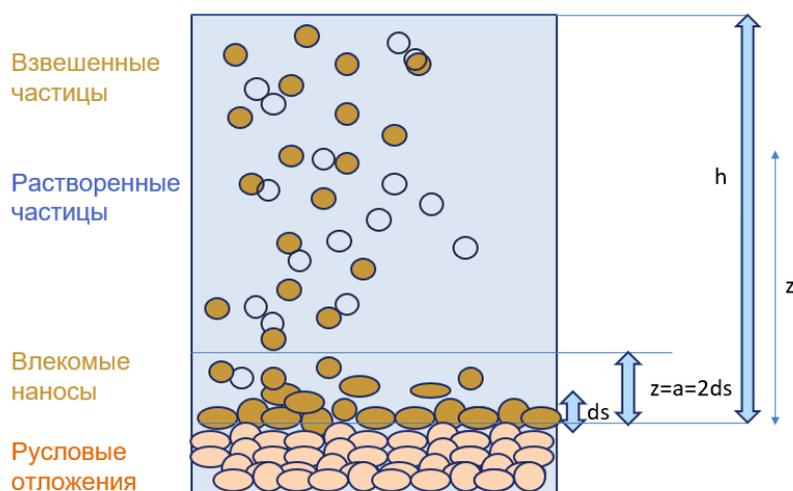


Рисунок 1.1. Вертикальное распределение частиц наносов в водотоке [Чалов, 2021].

Важнейшими характеристиками, отражающими перемещение взвешенных наносов в реках бассейна, служит расход наносов (Q_R) (2):

$$Q_R = Q * SSC \quad (2)$$

Количественное содержание наносов различных фракций в воде характеризует мутность (SSC – suspended sediment concentration) Она определяется в абсолютных величинах (мг/л), как отношение массы наносов (m) в пробе к объёму воды (v) в пробе (3):

$$SSC = m/v \quad (3)$$

Баланс наносов в речном бассейне проявляется в виде закона сохранения вещества применительно к перемещению минеральных частиц [Алексеевский, 1998]. Баланс наносов показывает соотношение поступления и удаления вещества из рассматриваемого участка за определённый период времени. В геологическом масштабе изменения стока наносов, как и изменение объёма продуктов эрозии водосбора и русла в крупном речном бассейне приближается к нулевым значениям, однако за более короткие периоды времени в небольших речных бассейнах или частях бассейнов может наблюдаться как положительный, так и отрицательный баланс наносов (4).

$$W_2 - W_1 = \Delta W, \quad (4)$$

где W_1 – объем поступления литогенного материала в пределы рассматриваемого участка бассейна; W_2 – его удаление за пределы бассейна; ΔW – результирующая баланса, характеризующая соотношение между W_2 и W_1 . В уравнении баланса наносов стоит выделить различные составляющие приходных и расходных частей. При этом они могут быть как внутренними для рассматриваемого участка, так и внешними (5).

$$\Delta W = \sum_{i=1}^P W_i - \sum_{j=1}^S W_j, \quad (5)$$

где W_i и W_j – частные вклады i -х внешних и j -х внутренних процессов в формирование приходных и расходных составляющих балансового уравнения. Важно учесть, что для крупных рек возрастает значение вклада локальных факторов при расчёте показателей баланса наносов для конкретного створа. Распределение взвешенных наносов в потоке характеризуется мутностью воды, которая неравномерна по всей толщине потока (рис. 1.2). Максимум мутности приурочен к придонным слоям. В зависимости от крупности фракций взвешенных наносов распределение мутности воды по глубине потока может быть более или менее равномерным. Этот факт часто не учитывается при характеристике мутности крупных рек, что может приводить к существенному занижению стока наносов. Количественные оценки распределения наносов по глубине руслового потока дают различные гидродинамические модели, в частности модель Великанова-Рауза [Великанов, 1948; Rouse, 1937] (6).

$$\frac{SSC}{SSC_a} = \left(\frac{h-z}{z} \frac{a}{h-a} \right)^{\beta k V_*}, \quad (6)$$

где SSC_a – придонная мутность воды (на расстоянии от дна a), z – глубина от уровня a , h – глубина потока. Гидравлический критерий – число Рауза, т.е. отношение между гидравлической крупностью w и подъемными силами (динамической скорости потока V_*), действующими на частицы и поддерживающими ее во взвешенном состоянии (7):

$$Ro = \frac{w}{\beta \cdot karm \cdot V_*}, \quad (7)$$

где коэффициенты в знаменателе обычно принимаются постоянными ($\beta=1$, а постоянная Кармана $karm=0.4$). Существующая приборная база позволяет с высокой точностью производить определения потоков взвешенных наносов для разных горизонтов потока. С помощью акустик-доплеровского измерителя скоростей потока (ADCP) удаётся получить распределение величины обратного рассеяния (backscatter intensity) (BI) для небольших ячеек с площадью менее 1 м^2 по всей ширине реки (рис. 1.3). BI напрямую зависит от величины мутности SSC . В результате, с помощью уравнения (7) становится возможным установить величину потока наносов SSC_a и определить концентрацию взвешенных наносов в каждой точке створа. Однако, для применения данной модели необходима разработка методики калибровки значений BI на основании натуральных

данных, которая будет предложена в данной работе. Существующие примеры применения данной модели позволяет существенно улучшить получаемые результаты определения стока наносов, что было продемонстрировано для различных рек мира [Чалов и др. 2022; Lupker et al., 2011; Chalov et al., 2020].

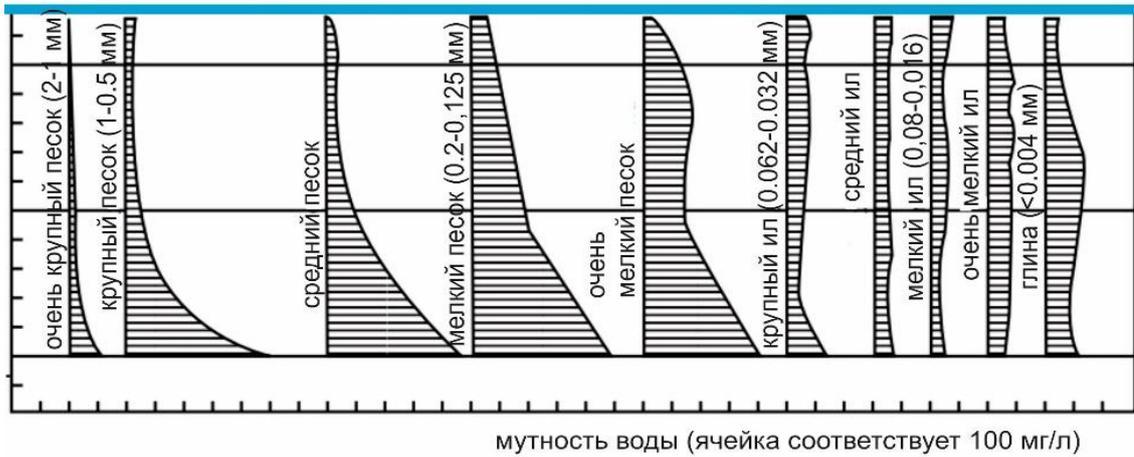


Рисунок 1.2. Распределение фракций речных наносов по глубине р. Миссисипи (г.п. Канзас) (деление по классификации Guy, 1969) рисунок по [Чалов, 2021].

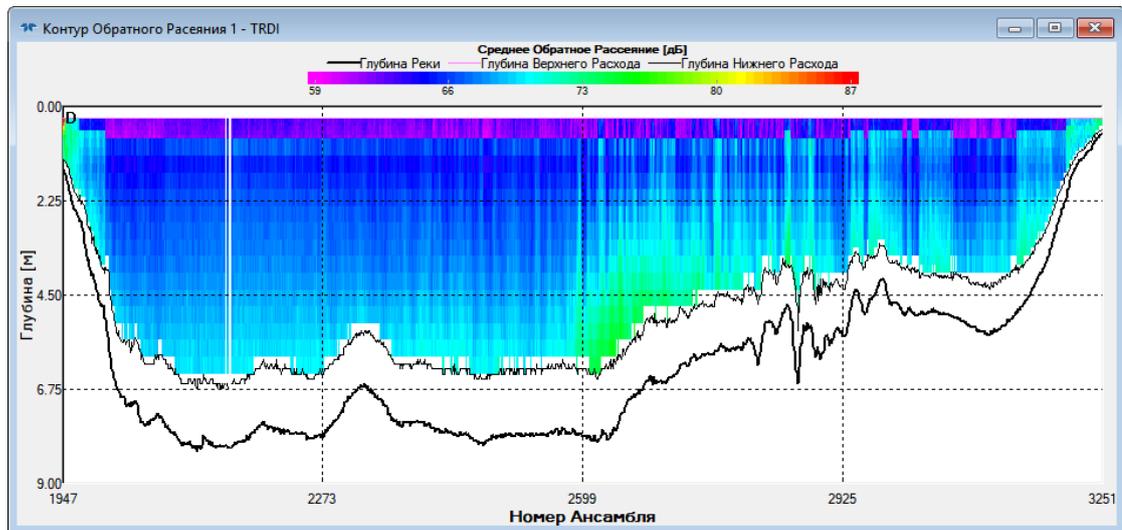


Рисунок 1.3. Распределение величины обратного рассеяния (BI) по всей площади створа р. Колыма.

1.2 Гранулометрический состав наносов

Геометрическая крупность частицы устанавливается на основе её среднего диаметра. В зависимости от неё авторы разделяют взвешенные наносы на фракции (табл. 1.1) Гранулометрический состав (ГС) взвешенных наносов – относительное содержание частиц различных размеров в толще воды, которая позволяет охарактеризовать происхождение и свойства поведения частиц в потоке. Данные о ГС используются в смежных научных дисциплинах – учении о эрозионно-аккумулятивном процессе [Маккавеев, 1955; Knighton, 1998], эрозиоведении [Заславский, 1983; Лисецкий, 2012] и русловедении [Чалов, 2008], гидрологии в целом и науке о стоке наносов [Караушев, 1977; Алексеевский, 1998; Julien, 2010], геохимии ландшафтов (механической миграции веществ или механогенеза) [Перельман, Касимов, 1999] и экогеохимии [Касимов, 2013]. На их основе проводится классификация наносов по признакам гидромеханического [Караушев, 1977; Россинский, Дебольский, 1980; Поздняков, 2011] состава, условиям транспорта [Алексеевский, 1998; Knighton, 1998] и формам миграции микроэлементов (химическому составу) [Линник, Набиванец, 1986; Савенко, 2006]. Существующая несогласованность применяемых подходов, делает понятие гранулометрической крупности речных наносов довольно размытым. Одновременно, при наличии подробных данных о сезонной изменчивости ГС [Лопатин, 1952; Шапов, 1959] и их изменений по длине отдельных рек, отсутствует единое представление о территориальных факторах его формирования и межбассейновых отличиях.

В результате анализа гранулометрического состава наносов в выбранном диапазоне крупности получается доля фракций различного размера i (мм) в общем объёме наносов d_i (%). Часто, при анализе ГС рассматривается медианный диаметр (средняя крупность) d_{50} (мм), который разделяет пробу наносов массой m_s на две равные части. Можно рассматривать вес m_i разных фракций наносов i , которые характеризуются средним диаметром частиц d_{oi} (8):

$$d_{50} = \frac{\sum m_i d_{oi}}{m_s} \quad (8)$$

Величина d_{50} может определяться по кривой обеспеченности (рис. 1.4). Вместе с ней обычно используются такие характерные крупности наносов, как d_{10} и d_{90} , соответствующие диаметру, меньше которого находится 10% или 90% частиц пробы. Доля каждой i -фракции в составе речных наносов определяется как (9):

$$m_i(\%) = \frac{m_i}{m_s} \quad (9)$$

В зарубежных классификациях для характеристики их состава используют логарифмические единицы размеров φ [Tipping, 1988](10):

$$\varphi = -\log_2 d. \quad (10)$$

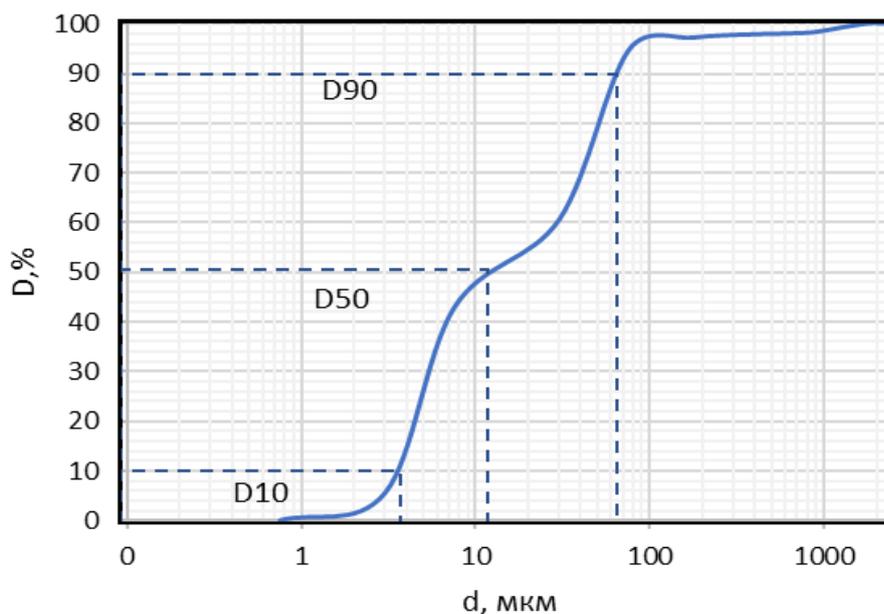


Рисунок 1.4. Пример выделения долей фракций 10%, 50% и 90% обеспеченности на накопительной кривой фракций гранулометрического состава пробы наносов.

Важным свойством наносов являются экстремумы функции распределения i -той фракции в составе наносов $d_i(\%) = f(d)$. При наличии одного максимума крупности d_i (%) в ряду всех значений d взвешенные наносы формируют одномодальные системы распределения, при двух максимумах d_i (%) – двухмодальные, при трех – трехмодальные (рис. 1.5; табл. 1.2). Важность оценки модальности гранулометрического состава связана с разным химическим составом i -тых фракций наносов [Chalov et al., 2020]. Данный показатель позволяет выделять генетические составляющие стока взвешенных наносов – русловую и бассейновую составляющие [Алексеевский, 1998; Гусаров, 2015]. Бассейновая (или транзитная) фракция наносов относятся к внешним по отношению к водотоку источникам поступления наносов и формируется в результате эрозии водосбора. Частицы бассейновой фракции имеют характерные размеры до 50 мкм. Русловая фракция представлена крупными наносами (более 50 мкм), формирующимися в результате размыва донных отложений, абразии берегов переотложения материала в самом потоке. В отечественной литературе [Барышников, Попов, 1988] присутствует метод расчёта показателя содержания русловой и транзитной фракций наносов на основании на основе d_5 и d_{50} (12):

$$d_r = \frac{d_{50}}{3.12} \left(\frac{d_5}{h} \right)^{1/12}, \quad (12)$$

где d_r – граничный диаметр русловой и бассейновой фракции (мм), h – глубина потока.

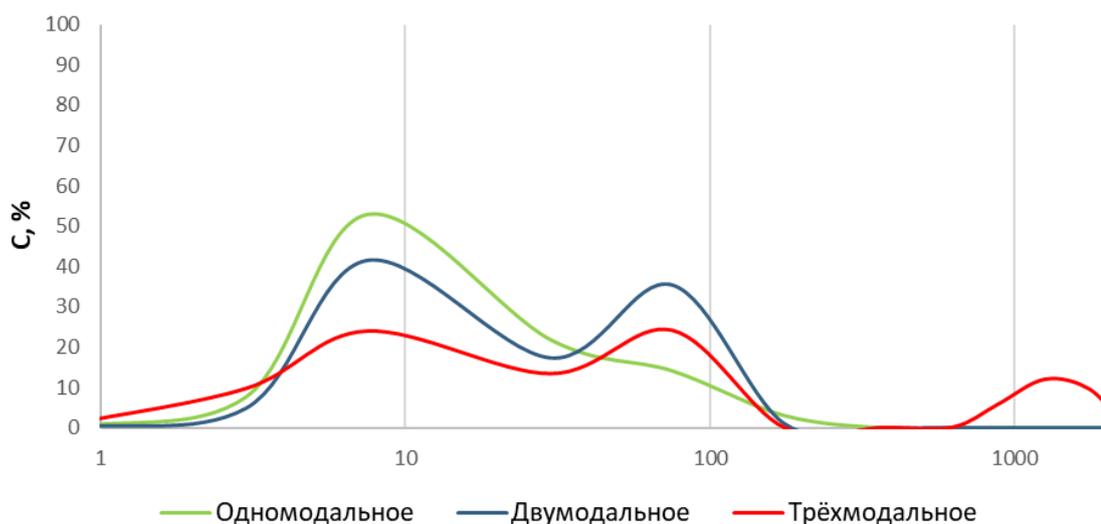


Рисунок 1.5. Примеры разномодальных распределений состава взвешенных наносов.

Таблица 1.2

Системы распределения пиков концентрации взвешенных наносов на примере базы данных гранулометрического состава рек России [Чалов, Ефимов 2021]

Тип/%	Одномодальное	Двухмодальное	Трёхмодальное
Горные ($n=156$)	5	65	30
Полугорные ($n=155$)	17	74	9
Равнинные ($n=216$)	13	71	16
Лахаровые реки ($n=24$)	12	46	42
Разработки россыпных месторождений ($n=21$)	46	39	15

По данным обобщений гранулометрического состава рек России [Дедков, Мозжерин, 1984] доля русловых фракций составляет 10-30% от общего стока взвешенных наносов. Разделение взвешенных наносов на русловую и бассейновую составляющие также рассматривалось с помощью графоаналитического метода и описывалось зависимостью $Q(\text{русл})=f(Q)$ [Гусаров, 2015]. В этом случае на долю русловых фракций взвешенных наносов приходится около 15% от общего объёма. Рассматриваемые методы, однако, могут иметь погрешности определения, связанные с рядом допущений при расчётах, а также с выбором минимальных значений $Q(\text{русл})$ при графоаналитическом методе расчёта. При этом, анализ с помощью методики «отпечатка» (*fingerprinting*), основанного на использовании химических трассеров, позволил оценить вклад русловой эрозии для малых водосборов в общий поток наносов в 30-50% [Walling, Collins, 2005].

На основе обобщения гранулометрического состава взвешенных наносов [Чалов, Ефимов, 2021] было установлено, что большинство крупных рек относится к двумодальному типу распределения фракций наносов. В верховьях рек обычно наблюдаются более крупный диаметр

пиков фракций наносов. В результате истирания и гидравлической сортировки, к устьям рек происходит постепенное увеличение доли мелкофракционного материала, что приводит к увеличению пика, соответствующего частицам 1-10 мкм. Этот процесс сильно зависит от мощности водного потока (рис. 1.6). Кроме того, скорость истирания связана с морфометрией русла и генезисом наносов. В результате, в нижнем течении крупных рек формируются двумодальные распределения, пики концентраций фракций в которых приблизительно соответствуют границам русловой и бассейновой фракций наносов. В базу данных гранулометрического состава были включены потоки наносов, поступающие с водосбора и переносимые преимущественно бассейновую фракцию наносов (потоки со склонов ледовых комплексов, участков активной эрозии почв, отвалов разработок полезных ископаемых). Исходя из полученных результатов выявлено, что повышенные концентрации мелких частиц в этих потоках соответствуют первому пику концентраций бассейновой фракции наносов в крупных реках. Эта закономерность легла в основу разделения потока наносов на русловую и бассейновую составляющие, использованные в данной работе (глава IV).

При характеристике потока взвешенных наносов и их гранулометрического состава необходимо использовать единый подход к анализу крупности наносов, позволяющий выделять её характерные диапазоны. Сегодня можно выделить две основных группы классификаций, применяемых при изучении речных наносов: механическую (для грунтов, наносов, почвенной массы и почв) и миграционную (табл. 1.3). Гидромеханические классификации речных наносов, принятые в гидрометрии и используемые на сети Росгидромета [Караушев, 1977], охватывают лишь часть спектра крупности взвешенных наносов, позволяя определять в их составе глинистые (менее 1 мкм), илистые (1–10 мкм), пылеватых (1–100 мкм), песчаные (100–1000 мкм), гравийные (1000–10000 мкм), галечные (10000–100000 мкм) частицы и обломки горных пород (валуны и глыбы) размером более 100000 мкм. Классификации гранулометрического состава речных наносов [Guy, 1969; Friedman, Sanders, 1978] основаны на градациях элементов, граничные значения которых связаны с целыми значениями числа ϕ , обычно выделяемых по шкале Уэентворта [Wentworth, 1922]. Эти подходы отличаются от традиционной шкалы размера частиц, принятых при типизации элементов почвенной массы и почв. Например, согласно Международной шкале 1926 г. все частицы подразделяются на крупнозем (гравелистая и каменная часть почвенной массы) и мелкозем [Глазовская, Геннадиев, 1995]. Последний состоит из фракций песка крупного и среднего – 200–2000 мкм, мелкого песка – 74–200 мкм, пыли – 2–74 мкм, глины (ила) – <2 мкм. Одновременно наличие свойств глины у частиц с размером менее 10 мкм определяет отнесение этого класса частиц в почвоведении и грунтоведении к физической глине.

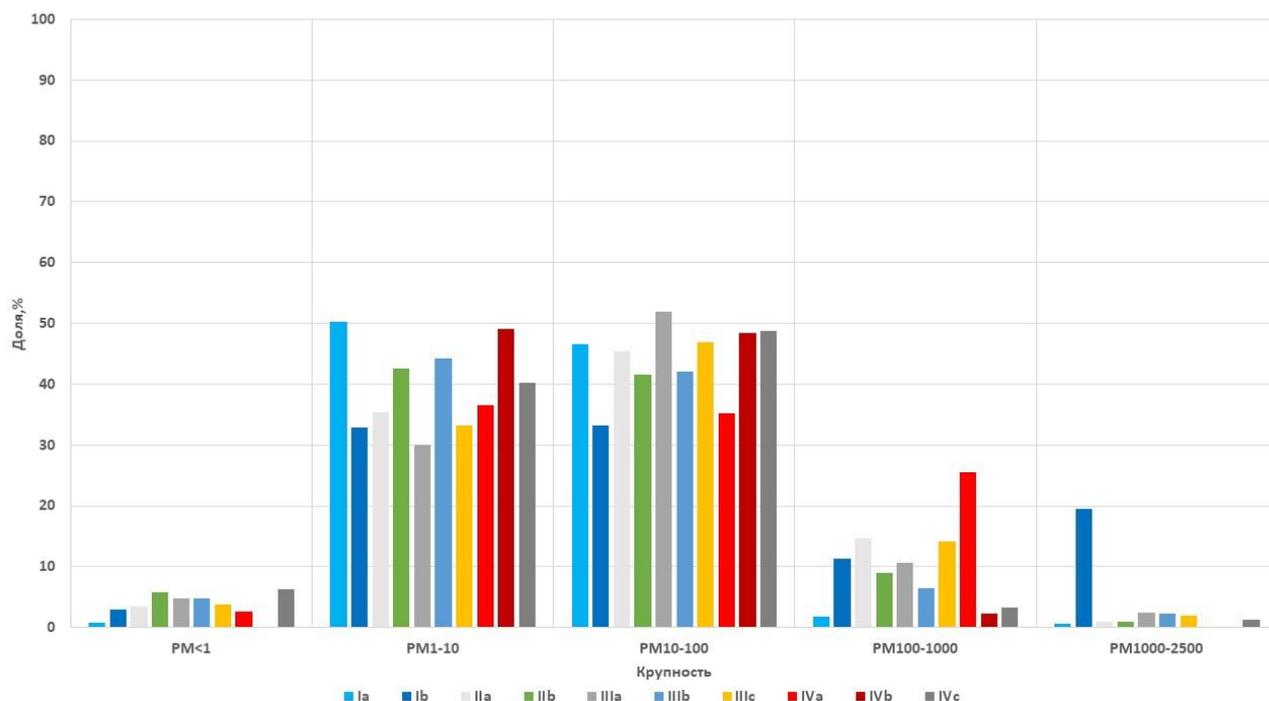


Рисунок 1.6. Пример распределения крупности частиц наносов базы данных гранулометрического состава рек России с помощью классификации в единицах РМ [Чалов, Ефимов, 2021]. Группы рек: Ia – горные ледниковые; Ib – горные; IIa – малые полугорные ($Q < 50 \text{ м}^3/\text{с}$); IIb – крупные полугорные ($Q > 50 \text{ м}^3/\text{с}$); IIIa – средние равнинные ($Q < 500 \text{ м}^3/\text{с}$); IIIb – крупные равнинные ($Q 500 - 5000 \text{ м}^3/\text{с}$); IIIc – крупнейшие равнинные ($Q > 5000 \text{ м}^3/\text{с}$); IVa – лахаровых долин; IVb – техногенные водотоки; IVc – реки в районах разработки россыпных месторождений.

Несогласованность разных подходов определяет тот факт, что разным диапазонам крупности «почвенные» и «гидрологические» классификации предлагают одинаковые термины. Например, под понятие глина попадают частицы менее 10 мкм [Глазовская, Геннадиев, 1995] или менее 1 мкм [Караушев, 1977]. Для решения этих противоречий целесообразно использовать классификацию в диапазоне размеров от 0.001 мкм, основанную на численных индексах, задающих нижнюю и верхнюю границы выделяемого диапазона. Такой индекс может иметь название РМ (от англ. Particulate Matter), по аналогии с широко применяемым в смежных науках (в частности, при изучении аэрозолей) обозначением [Hinds, 1999]. Например, для частиц диаметром 50–1000 мкм он может быть записан в виде: РМ50-1000, где 50 – нижний диапазон выделяемого интервала (50 мкм), 1000 – верхний диапазон выделяемого интервала (1000 мкм). Частицы с диаметром менее 10 мкм имеют название РМ10. Индекс РМ1-10 характеризует частицы 1–10 мкм (илистые по классификации [Караушев, 1977]), РМ10–100 – пылеватые (10–100 мкм), РМ100–1000 – песчаные (100–1000 мкм), РМ1000–10000 – гравийные (1000–10000 мм)

и РМ10000–100000 – галечные (10000–100000 мм). Отдельный класс частиц размером менее 1 мкм (РМ<1) соответствует классу глинистых частиц по классификации [Караушев, 1977].

Таблица 1.3

Основные подходы к классифицированию речных наносов

Классификация	Критерий выделения	Выделяемые типы наносов	Пример классификации
Гидромеханическая классификация частиц речных наносов	Диаметр частиц, мм	Глина Ил Пыль Песок Гравий. Галька валуны	[Караушев, 1977]
Механическая классификация элементов почвенной массы	Диаметр частиц, мм	Крупнозем, Мелкозем (глина, пыль, мелкий песок, крупный и средний песок)	[IUSS..., 2015]
Механическая классификация почв	Диаметр частиц, мм (соотношение доли физического песка, пыли и глины)	Тяжелые глины Средние глины Легкие глины Тяжелый суглинок Средний суглинок Легкий суглинок Супесь Связный песок Рыхлый песок	[Глазовская, Геннадиев, 1995]
По физической форме миграции	Форма миграции	Грубодисперсное Коллоидно-дисперсное	[Янин, 2002]

1.3 Особенности формирования химического состава взвешенных наносов

Рассматриваемые в предыдущем разделе характеристики стока наносов оказывают непосредственное влияние на сток химических веществ в растворённой и взвешенной форме в речном бассейне. При этом, растворённая, коллоидная и твёрдая формы транспорта химических веществ постоянно взаимодействуют между собой (рис. 1.7). Перенос вещества в каждой из форм зависит как от условий среды (гидрофизические и гидрохимические факторы), так и свойств самих веществ. Наиболее интенсивное взаимодействие происходит между растворёнными и коллоидными формами. Активно вовлекаются и глинистые и илистые частицы взвеси, тогда как с увеличением крупности частиц интенсивность взаимодействия снижается. Хотя ряд исследователей относит коллоиды к твёрдому химическому стоку [Иванов, 1994; 1996, 1997; Венецианов, Лепихин, 2017; Langmuir, 1997], в данном исследовании мы будем рассматривать процессы взаимодействия и миграции химических веществ в наносах с крупностью более $PM_{0.45}$. При этом, основное внимание уделяется фракциям $PM_{0.45}$ - PM_{150} , как наиболее химически активным.



Рисунок 1.7. Схема взаимодействия компонентов в системе «вода-наносы-донные отложения».

Поведение химических элементов в реках определяется сложным взаимодействием разнонаправленных процессов, которые способствуют относительно долговременной миграции элементов в водной толще, перераспределению их между различными компонентами речной

среды и временному выводу из миграционного потока, а также обуславливают поступление химических элементов в миграционный поток, прежде всего, из донных отложений и водной биоты [Крайнов, Швец, 1992].

Значимость гидродинамического фактора в существенной мере определяется гидравлическими и морфометрическими характеристиками водного потока (и их изменениями по длине реки). Это, прежде всего, ширина и глубина русла, площадь его живого сечения, смоченный периметр, гидравлический радиус, уклон свободной поверхности, скорость течения, расход воды, а также рассмотренные ранее свойства речных наносов. Пространственная неоднородность, влияние факторов точечного и диффузионного стока веществ, локальные условия и антропогенная деятельность могут приводить к изменению концентраций веществ в одном и том же створе в 10-100 раз. Поскольку в речном потоке всегда существует градиент концентрации некоторых химических веществ, то получает развитие так называемая турбулентная диффузия, когда процесс смешения, связанный с турбулентным течением, вызывает перенос растворенного вещества из области высокой в область его низкой концентрации (процесс происходит наряду с конвекцией, т. е. переносом вещества при физическом перемещении среды, его содержащей). Турбулентная диффузия является важнейшим динамическим процессом распределения примесей внутри водной массы [Мур, Раммамурти, 1987].

Водный поток обладает целым рядом особых физических свойств, оказывающих влияние на транспорт наносов и соответственно на миграцию химических элементов. Среди таких свойств кавитационный и флотационный эффекты. Кавитация развивается на участках значительного и резкого увеличения скорости течения и стимулирует размыв отложений, слагающих русло и берега. Флотация, т. е. перенос частиц твердого материала пленкой поверхностного натяжения, довольно часто наблюдается на различных по своим характеристикам реках [Папина 2001]. Этот эффект проявляется в случае быстрого поднятия уровня воды (вызванного, например, дождями), что приводит к затоплению осушенных прирусловых отмелей. Рыхлый поверхностный материал, слагающий их, в данном случае не смачивается водой и плавает по ее поверхности. Ещё одним значимым фактором миграции химических веществ в реках является гравитационное осаждение взвеси. Этот процесс может усиливаться вследствие коагуляции, приводящей к укрупнению тонких (особенно коллоидных) частиц и к их последующему осаждению. Для растворенных форм, и в меньшей степени взвешенных форм, важную роль играют процессы гидродинамического перемешивания и разбавления, приводящие к их однородному распределению в толще потока.

Важнейшим фактором, оказывающим влияние на химический состав взвешенных наносов, является удельная поверхность наносов. Эта величина рассчитывается для допущения,

что сферические частицы наносов плотно упакованы в сферическом объёме определённого диаметра. При увеличении размеров частиц от фракции к фракции изменения удельной поверхности могут изменяться на порядок [Поздняков, 2011]. Согласно исследованиям [Horowitz, Elrick, 1987] при увеличении среднего диаметра частиц взвешенных наносов с PM17 до PM607, удельная поверхность наносов уменьшилась с 18.7 м²/г до 0.4 м²/г. При этом, концентрации металлов и металлоидов (ММ) Cu, Zn, Cr, Fe, Al имели высокий ($R^2 > 0.9$) коэффициент корреляции с удельной поверхностью частиц. Большая площадь поверхности мелких частиц и большое количество свободной потенциальной энергии, накапливающейся на межфазной границе, приводит к тому, что именно мелкие фракции интенсивно сорбируют наибольшее количество химических веществ. Именно этим обусловлена важность учёта гранулометрического состава при анализе факторов формирования химического состава взвешенных наносов.

Несмотря на важность гидродинамических и гидравлических факторов, химические процессы, влияющие на изменчивость форм транспорта химических элементов в водных объектах крайне важны. Эти процессы, характерные системы: «вода-наносы-донные отложения» имеют различные временные рамки (рис. 1.8) и в конечном итоге приводят к установлению равновесия скоростей перехода химических веществ из растворённой формы во взвешенную и обратно [Langmuir, 1997].

Формирование химического состава наносов связано с их генезисом. Важнейшими физико-химическими и химическими процессами, влияющими на концентрацию элементов в частицах взвеси, поступающей с водосбора, являются растворение, гидратация и выщелачивание. Значимую роль играют гидробиологические (биохимические) процессы, определяющие изменение концентраций химических веществ, особенно органических соединений, за счет жизнедеятельности микроорганизмов и других гидробионтов [Папина 2001].

Процесс гидратации заключается во вхождении молекул воды в структуру минералов в виде координационно связанных молекул или не связанных с решеткой молекул. Растворение представляет собой процесс перехода вещества из твердой фазы в жидкую, сопровождаемый разрушением его кристаллической структуры. Этим оно отличается от процессов выщелачивания, т.е. избирательного извлечения какого-либо компонента из твердого тела, сохраняющего при этом свою кристаллическую структуру. Как правило, при взаимодействии твердого вещества с водой наблюдаются два одновременно протекающих процесса: переход ионов из твердой фазы в раствор и обратно.

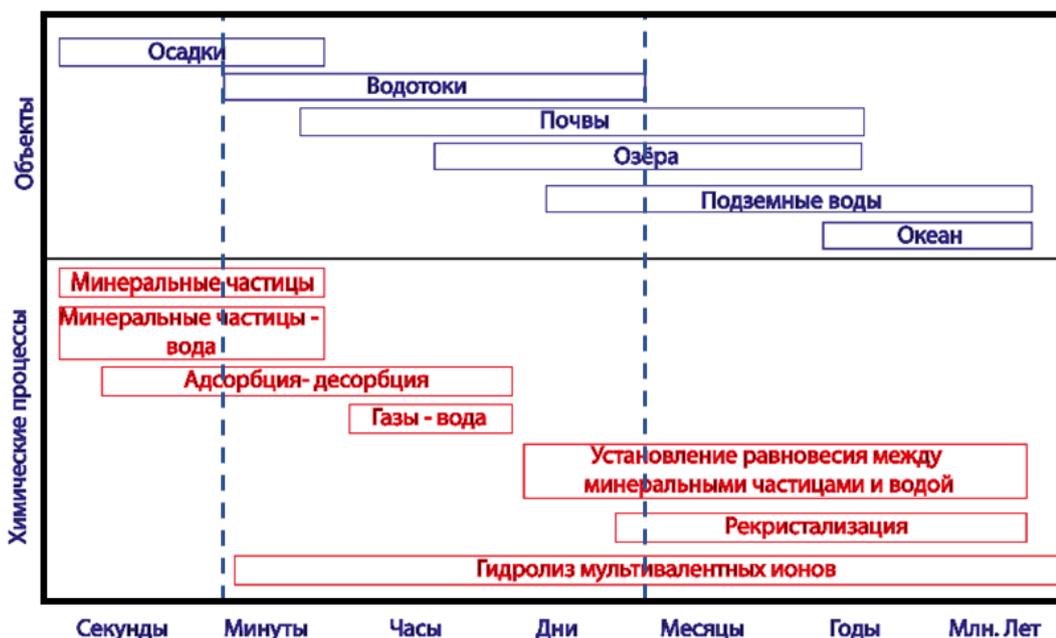


Рисунок 1.8. Характерные скорости протекания химических процессов в природных водах [Langmuir, 1997].

Изменчивость концентраций химических веществ в составе наносов в процессе их переноса в водном объекте определяется рядом химических процессов – сорбционными взаимодействиями (адсорбция, абсорбция, хемосорбция), комплексообразования и гидролиза [Иванов, 1994; 1996; 1997 Папина, 2001; Никаноров, 2010].

Гидролиз металлов в природных водах – процесс образования нерастворимых гидроксидов в условиях слабощелочной реакции среды. Окислительные условия природных вод обуславливают нахождение в них металлов с переменной валентностью в высоких степенях окисления. Характеристика pH среды крайне важна. Растворённые формы металлов находятся в водных растворах в виде гидратированных катионов или в случае переходных ММ, в виде гидратированных анионов. В результате, любое изменение pH среды приводит к изменению формы транспорта. При уменьшении pH катионогенные формы металлов поступают в растворённую форму, а при увеличении – адсорбируются на частицах взвеси. Анионные формы имеют противоположно направленные зависимости.

Процессы комплексообразования выступают конкурирующими по отношению к гидролизу и сосаждению элемента в составе взвешенных наносов. Комплексообразование приводит к связыванию ионов металлов в растворимые соединения, характерные для растворённой формы транспорта. Комплексообразователи могут быть как неорганическими (OH^- , HCO_3^- , Cl^-), так и органическими (гуминовые и фульвокислоты). Наиболее прочные и распространённые комплексы в природных водах образует Fe(III), Hg(II), Cu(II), Pb(II). Высокие

концентрации Fe(III) и Cu(II) определяют их преимущественное связывание в комплексы, вследствие конкурирующих взаимодействий между металлами.

Сорбционные взаимодействия являются важнейшим фактором изменчивости содержания химических элементов в составе наносов. При абсорбции происходит поглощение вещества всем объемом твердого тела, то при адсорбции осуществляется его концентрирование только на поверхности последнего [Никаноров, 2010].

Для речной среды ведущее значение имеет адсорбция, которая возникает в результате поверхностных явлений, протекающих на границе раздела двух фаз (жидкой и твердой). Силы притяжения, действующие на частицу (молекулу, ион), находящуюся на поверхности твердого тела, отличаются от сил, действующих в объеме воды, где они компенсируются со всех сторон другими частицами. На поверхности они не скомпенсированы, и равнодействующая направлена перпендикулярно поверхности внутрь. В результате поверхность получает возможность притягивать и удерживать частицы вещества из раствора. В зависимости от характера взаимодействия адсорбента с поглощенными частицами различают физическую и химическую адсорбцию. При химической адсорбции между твердым веществом и сорбируемыми частицами происходят химические реакции, в результате которых возникают новые соединения. При физической адсорбции совершается только физическое поглощение частиц на поверхности. Склонность к адсорбции у разных растворенных в воде ионов различная, а в общем случае она пропорциональна заряду иона и величине его радиуса [Langmuir, 1997].

Как уже было сказано, наиболее интенсивно протекающим химическим процессом является сорбция химических элементов из раствора на поверхности мелких частиц взвеси и коллоидных частиц [Gaillardet et al., 2013]. Коллоидные частицы несут электрический заряд, знак которого не одинаков для различных веществ, но одинаков для всех частиц одного и того же коллоида [Gustafsson et al., 2014]. В речных водах отрицательными электрическими зарядами обладают глинистые и гумусовые коллоиды, кремнезем, диоксид марганца, сульфиды тяжелых металлов и др.; положительными – водные оксиды Fe, Al, Cr, Ti, Zr и др. Наличие одноименных электрических зарядов является препятствием к сближению, агрегации и оседанию коллоидных частиц. Вследствие электростатического притяжения коллоиды адсорбируют противоположно заряженные ионы. В то же время ионы, имеющие тот же заряд, что и поверхность пород, в силу тех же причин занимают место, примыкающее к первому адсорбционному слою. В результате образуется неподвижный двойной электрический слой, состоящий из внутренних потенциалзадающих частиц и внешнего компенсирующего слоя. К двойному электрическому слою примыкает подвижный внешний диффузионный компенсирующий слой, в котором обмен частиц с находящимися в растворе ионами протекает значительно интенсивнее [Kabata-Pendias, Szteke, 2015]. Согласно данной модели, взаимодействие между адсорбируемым веществом и

поверхностью адсорбента всегда является чисто электростатическим. Существует также гипотеза, согласно которой адсорбция почти аналогична комплексообразованию в растворе (на поверхности сорбента образуются комплексы) [Папина 2001]. Известные экспериментальные данные согласуются с обеими моделями, т.е. в природных условиях сорбция может, судя по всему, осуществляться обоими механизмами [Gustafsson et al., 2014].

Химические элементы в составе взвешенных наносов могут транспортироваться в составе различных соединений (табл. 1.4). Их концентрации зависят от распространённости химических элементов и от особенностей их коэффициента подвижности в данных условиях. Химические элементы подразделяются на макроэлементы – наиболее распространённые элементы в земной коре, определяющие 90-99% от её общего состава, микроэлементы, встречающиеся в земной коре в долях процента от общего содержания и редкоземельные элементы – группу из 17 элементов, концентрации которых крайне малы и которые отличаются специфическими химическими свойствами.

Характеристикой содержания химических элементов в породах, слагающих водосборный бассейн выступают кларки химических элементов. В геохимических работах, посвящённых исследованиям химического состав взвешенных наносов, часто используются кларки, полученные для среднего состава верхней части земной коры [Rudnick, Gao 2003; Hu, Gao, 2008] (рис.1.9). Согласно обобщению J. Gaillardet [Gaillardet et al., 2013], к наиболее подвижным элементам в речных системах относятся Mg, Mo, Sb, As, Se, B, Cd, Re, Pb. Эти концентрации описывают источники поступления наносов, однако в результате трансформации химического состава взвешенных наносов в водных потоках концентрации химических элементов во взвеси приобретают иное распределение (рис. 1.10). Рассматриваемые обобщения химического состава взвешенных наносов выполнены на обширной базе данных с более чем 140 опробованиями для различных рек мира. В данной работе были использованы данные В.С. Савенко [Савенко, 2006; Viers et al., 2009], поскольку в его обобщении больший акцент сделан на реки российской Арктики. В целом, во взвешенных наносах, относительно кларков верхней части земной коры, наблюдаются повышенные в 1.3-2.5 раза концентрации микроэлементов, и заниженное содержание редкоземельных элементов и макроэлементов 0.5-0.8.

Таблица 1.4

Выделяемые фазовые формы переноса микроэлементов в составе речных наносов

Источник	Оксиды и гидроксиды металлов			Адсорбированные ионы	Свободные ионы	Минеральные комплексы				В составе минеральных частиц		Органическое вещество		
	в т.ч. оксиды и гидроксиды Fe и Mn*					Карбонатные	Сульфатные, сульфидные	Силикатные	Фосфатные	Глинистые минералы	Кристаллическая решётка минералов	Органоминеральные	Мелкие живые организмы (вирусы,	Крупные живые организмы
Gaillardet et al. 2013	+	+	+	+	+	+	+			+		+		+
Gustafsson, 2014	+			+	+	+	+	+			+		+	
Aquatic chemistry..., 1996	+	+	+	+	+			+		+		+		+
Merkel et al., 2008	+	+	+	+	+			+			+		+	
Nordstrom, Campbell, 2014		+		+	+			+			+		+	
Крайнов и др., 2012		+		+	+			+			+		+	
Černý et al., 1993		+		+	+			+			+		+	+
Янин, 2002	+	+	+		+	+	+	+			+		+	
Horowitz, 1987		+				+	+		+				+	
Веницианов, Лепихин, 2017.		+		+	+							+		
Singh et al., 2005		+			+	+	+					+		
Демина, 1982		+	+									+		
Линник, Набиванец, 1986		+				+	+					+		

Петрогенные элементы являются нанообразующими веществами, наиболее широко представленными в земной коре и составляющими основу первичных и глинистых минералов. Группа петрогенных элементов образуют оксиды, наиболее распространённые из которых: SiO_2 , Na_2O , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , K_2O . Они образуют характерные соотношения $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Na}_2\text{O}$; $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$; которые могут использоваться для характеристики интенсивности протекания процессов выветривания на водосборе ($\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Na}_2\text{O}$) или миграционной активности ($\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$). Петрогенные элементы Si, Na, Ca преимущественно мигрируют во фракциях $\text{PM}>20$, тогда как Al, Fe, K, Mg – во фракциях $\text{PM}10$ [Савенко, 2006; Bouchez et al., 2011; Lupker et al., 2011]. Из-за этого отношения $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ будут находиться в зависимости от характеристик крупности наносов, например величины d_{90} [Lupker et al., 2011]. Известно, что увеличение доли SiO_2 в составе взвешенных наносов приводит к уменьшению концентраций микроэлементов и редкоземельных элементов, в результате их «разбавления» кремнезёмом. Напротив, повышенные концентрации Al_2O_3 и Fe_2O_3 в тонких фракциях взвеси свидетельствуют о концентрировании микроэлементов [Poulton, 1999, Escoube et al., 2015]. Поэтому отношение содержания SiO_2 к Al_2O_3 или Fe_2O можно рассматривать как маркер повышенного содержания микроэлементов.

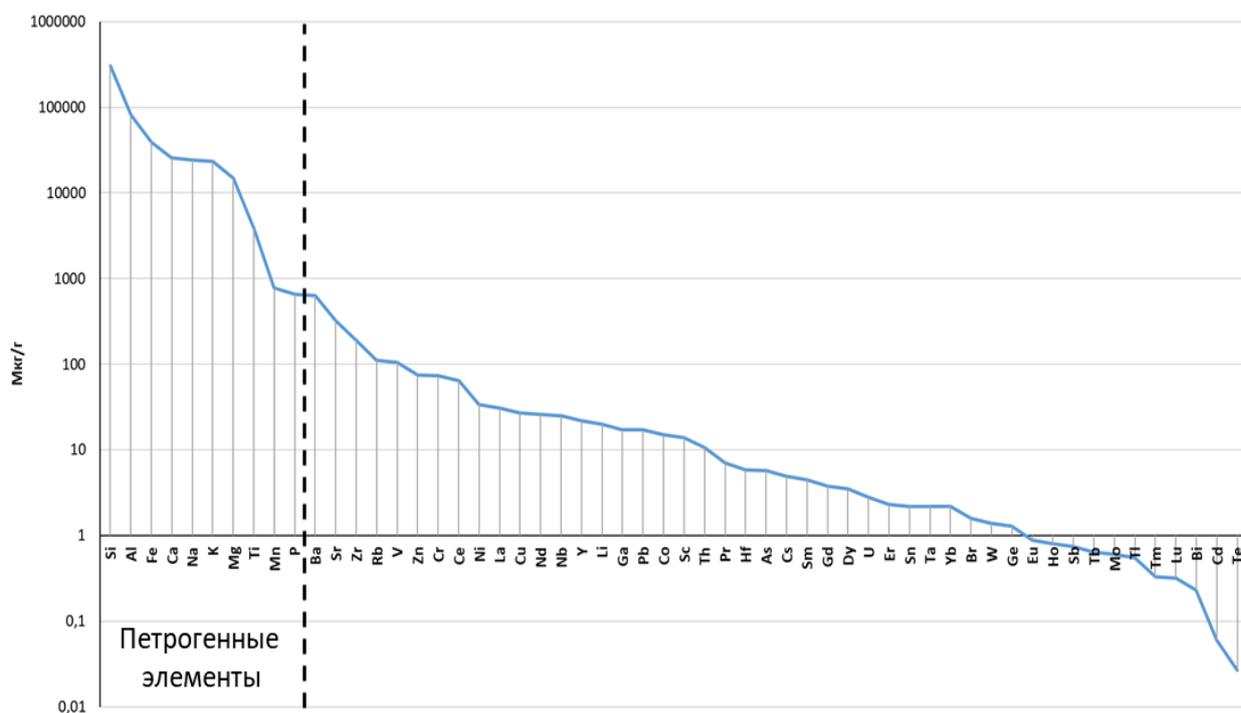


Рисунок 1.9. Кларки верхней части земной коры.

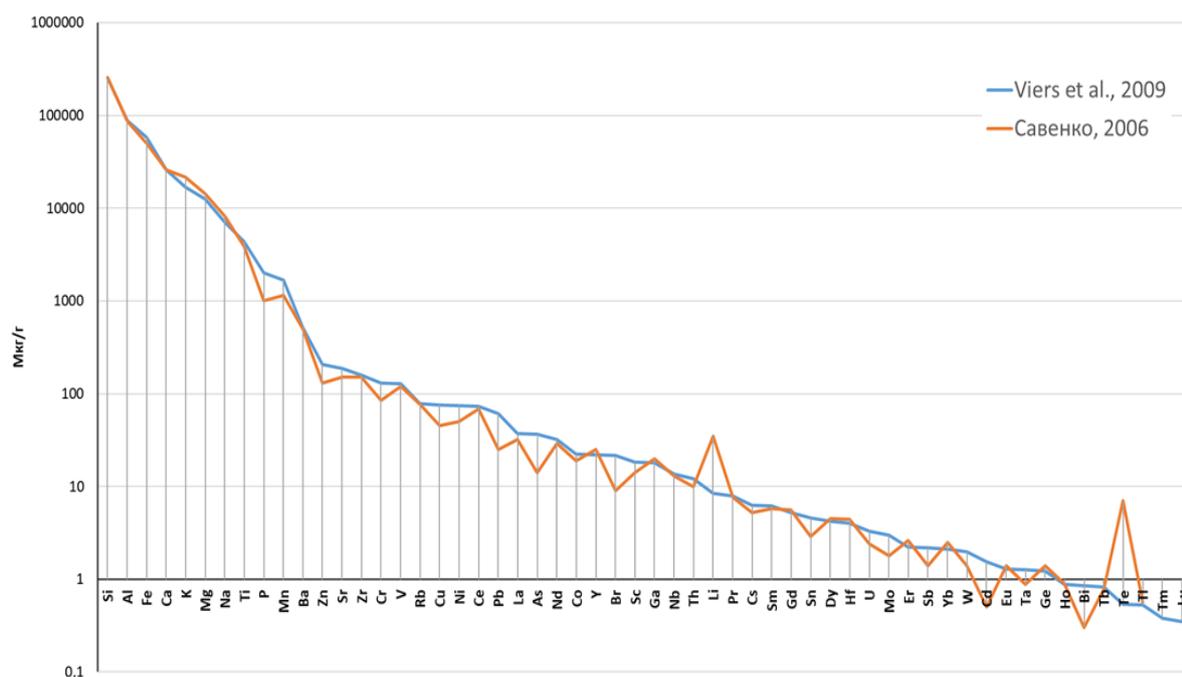


Рисунок 1.10. Концентрации химических элементов в речной взвеси.

К микроэлементам относятся металлы и металлоиды (ММ), среди которых можно выделить группу тяжёлых металлов (ТММ). Это химические элементы, атомная масса которых превышает 50 или же те элементы, удельный вес которых более 5 г/см^3 [Meade, 1995]. Это наиболее токсичные химические элементы, являющиеся важнейшим нормируемым показателем при мониторинге. Поступление ТММ в природные воды проявляется в результате воздействия как природных, так и антропогенных источников. В результате разработки полезных ископаемых, развития транспорта и сложностей очистки коммунально-бытовых стоков, в мире фиксируется рост поступления ТММ, связанный с деятельностью человека (рис. 1.11). При этом, можно выделить специфические группы ТММ, особенно характерные для тех или иных видов производства. Такие металлы называют технофильными [Касимов, Власов, 2012]. Технофильность элемента показывает связь интенсивности использования химических элементов с их средним содержанием в литосфере. Для её характеристики был предложен коэффициент T (12) (рис. 1.12)

$$T = 100 \cdot Di / (Ki \cdot M), \quad (12)$$

где Di — добыча i -го элемента, т/год; Ki — кларк элемента в литосфере, %; M — масса земной коры, равная $2,8 \cdot 10^{19}$ т.

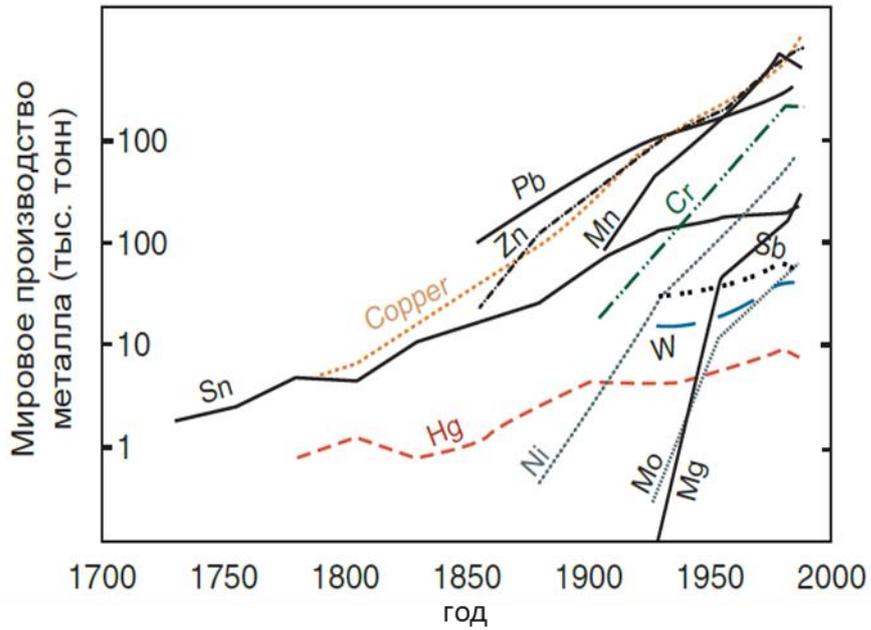


Рисунок 1.11. Современные тенденции производства цветных металлов [Mossa, James, 2013].

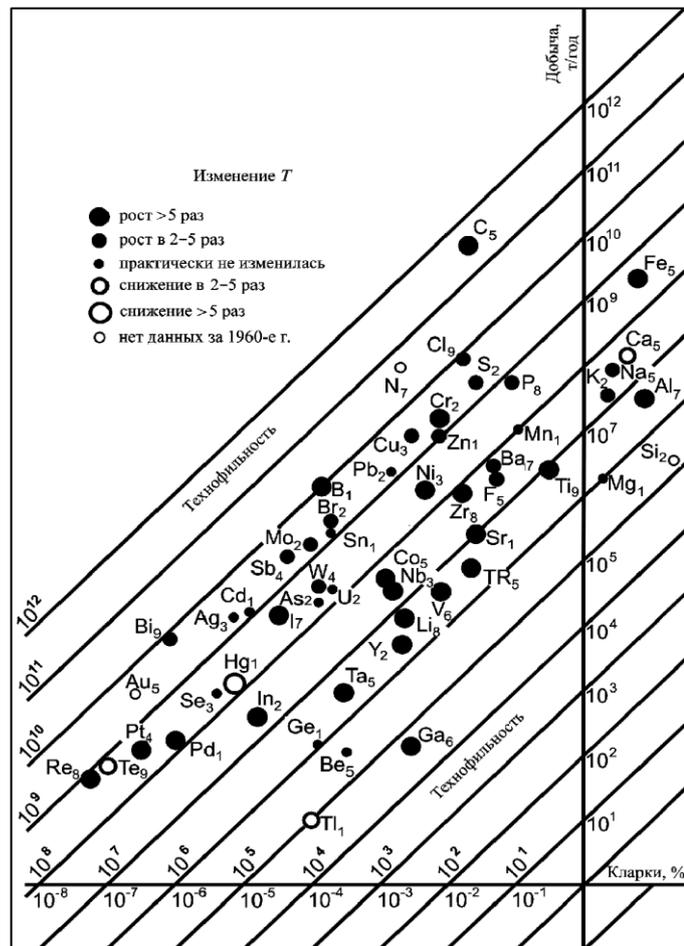


Рисунок 1.12. Изменение технофильности с 1960-х по 2000-е гг. Положение кружка — уровень технофильности в 2008 г. Размер кружка — величина изменения T элемента. Цифра — множитель уровня T [Касимов, Власов, 2012].

Присутствующие во взвешенных наносах химические элементы можно разделить на группы, имеющие схожие химические свойства, согласно классификации В. М. Гольдшмидта [1937] по преимущественным средам концентрирования на сидерофильные, литофильные, халькофильные и атмофильные (Н, N, инертные газы) элементы (табл. 1.5). В результате анализа кислотно-основных свойств элементов, определяемых по таким показателям как ионный потенциал и электроотрицательность, химические элементы подразделяются по вероятным миграционным формам на катионогенные элементы, элементы комплексообразователи и анионогенные элементы [Крайнов и др., 2012] (табл.1.5).

Обобщение информации о химическом составе наносов и свойствах элементов позволили выделить 4 группы по типу их геохимической дифференциации, которые были соотнесены с различной крупностью наносов:

- Элементы, полностью принадлежащие к нерастворённой форме, содержание которых возрастает при увеличении порядка реки и крупности частиц. К ним относятся SiO_2 , Na_2O , Eu , Hf , Nb , Zr , Be . Эти элементы входят в состав первичных минералов и отличаются слабой миграционной способностью.
- Элементы, преобладающие в нерастворённой форме, для которых характерно концентрирование во фракции PM_{10} . Это оксиды Al_2O_3 , Fe_2O_3 , MgO и K_2O катионогенные металлы – Mn , Pb и некоторые элементы комплексообразователи – Bi , W , сорбированные на взвешенных наносах.
- Элементы, которым свойственно нахождение во фракциях граничного диаметра ($\text{PM}_{0.45}$). Это биогенные элементы, халькофильные тяжелые металлы Zn , Cd , Cu , а также Sn , фракционирование которых больше зависит от мутности воды SSC , сезонных колебаний стока, а также ландшафтно-геохимических условий водосборов.
- Элементы, преимущественно мигрирующие в растворённой форме – металлоиды Mo , U , Sb , As , V .

Элементы, не упомянутые в данной классификации могут изменять группу в зависимости от внешних гидрогеохимических условий. Данные ассоциации элементов были подтверждены на широкой выборке водных объектов (бассейн р. Селенга, бассейн р. Москва, бассейны Арктических рек) с помощью DS -анализа, который будет описан в главе III.

Исследование совокупности гидрологических процессов, условий миграции наносов и происходящих в них химических процессов позволяет получить подробные данные о содержаниях химических элементов во взвешенной форме транспорта и оценить долю от общего транспорта химических веществ в речном бассейне. Полученные закономерности распределения химических веществ позволяют через характеристики концентрации и крупности взвеси оценить их пространственно-временную изменчивость, что особенно важно для бассейнов с

ограниченной сетью мониторинга. В результате, гидролого-геохимический подход позволяет существенно увеличить точность оценок стока химических веществ в составе наносов в Мировой Океан. В данной работе этот комплексный подход был применён для оценки потоков химических веществ в крупнейших реках российской Арктики.

Таблица 1.5

Классификация химических элементов по В.М. Гольдшмиту С. Р. Крайнову (цветом)

Тип	Элемент
Халькофильные	S, Cu, Zn, Ga, Ge, As, Se, Ag, Cd, In, Sn, Sb, Te, Hg, Tl, Pb, Bi, Po.
Литофильные	Li, Be, B, C, O, F, Na, Mg, Al, Si, P, Cl, K, Ca, Ti, V, Cr, Mn, Br, Rb, Sr, Zr, Nb, I, Cs, Ba, Hf, Ta, W, At, Fr, Ra, Ac, Th, Pa, U.
Сидерофильные	Fe, Co, Ni, Mo, Ru, Rh, Pd, Re, Os, Ir, Pt, Au

Цветом обозначены: **красный** – катионогенные элементы; чёрный – переходные элементы;

зелёный – анионогенные элементы

ГЛАВА 2. ИЗУЧЕННОСТЬ РАСТВОРЁННЫХ И ВЗВЕШЕННЫХ ФОРМ МИГРАЦИИ ХИМИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ В РЕКАХ РОССИЙСКОЙ АРКТИКИ

2.1 Общие сведения о гидрологическом режиме рек российской Арктики

К территории российской Арктики относятся водные объекты, расположенные на водосборах Баренцева, Белого, Карского, Лаптевых, Восточно-Сибирского и Чукотского морей. Общая площадь водосборов этих морей равна 13.3 млн. км² [Магрицкий, 2010]. Из них около 12.1 млн км² приходится на долю Российской Федерации. В Северный Ледовитый океан поступает 11% (4.58 тыс. км³/год) мирового материкового стока. На долю рек Обь, Енисей, Лена и Колыма приходится более 58% водного стока рек российской Арктики или около 32% от общего водного стока в Северный Ледовитый океан. Твёрдый сток составляет около 63.5 млн. т/год или 58.5% от общего твёрдого стока рек российской Арктики [Шикломанов, 2008]. На рассматриваемой территории насчитывается около 1630 тыс. малых, средних и больших рек, из которых только небольшая часть впадает непосредственно в Арктические моря. Химический состав взвешенных наносов и вод этих рек определяется в первую очередь различиями в размерах их бассейнов и крайней неоднородностью гидрологических условий, литологии и интенсивности протекания эрозионных процессов в них. Согласно Д.В. Магрицкому [2010], к бассейнам Арктических морей относится около 110 средних рек (площадь водосборов от 2 до 50 тыс. км²). Площадь бассейна более 50 тыс. км² имеют такие реки, как Северная Двина, Печора, Хатанга, Оленек, Яна, Индигирка, Колыма, Онега, Мезень, Надым, Пур, Таз, Пясина, Нижняя Таймыра, Анабар и Алазея. Водосборы рек Обь, Енисей и Лена имеют площадь более 1 млн. км². Водность крупнейших рек, в нижнем течении которых осуществлялся государственный мониторинг химического состава вод, показана на рисунке 2.1 и в таблице 2.1. Годовой сток воды этих рек находится в диапазоне от 609 до 1.6 км³/год. В данной работе в расчётах используются значения среднемноголетнего стока р. Обь – 540 км³/год, р. Енисей - 584 км³/год, р. Лена - 533 км³/год, р. Колыма – 118 км³/год. Арктические реки обладают пониженными средними значениями мутности воды (менее 20-30 мг/л), что в значительной мере связано с продолжительными осенним и зимним межленными периодами, распространением мерзлоты, заболачиванием и высоким коэффициентом озёрности территории, и другими факторами, которые ограничивают эрозию на водосборе [Holmes et al., 2002; Gordeev, 2006]. При этом, отмечаются периоды интенсификации процессов термоэрозии - т.н. «чёрная вода» [Толстихин, Шпелёв, 2014] - период повышенной (до 130 мг/л) мутности реки в начале лета. Значительная часть (30-50%) наносов [Magritsky et al., 2013] аккумулируется в дельтах. При сохранении тенденции к увеличению максимальных расходов и водного стока рек, а также температуры воздуха и воды по приблизительным оценкам, годовой сток взвешенных наносов рек Северной Двины, Оби,

Оленека, Лены, Яны и Индигирки может увеличиться (в случае увеличения среднего стока воды на 5 и 10%) на 8%/17%, 6.8%/13.7%, 2.7%/5.3%, 12%/25%, 12%/24% и 5.8%/11.5% соответственно [Magritsky et al., 2013]. Возрастанию стока наносов может способствовать антропогенная деятельность, в особенности разработка полезных ископаемых.

Выбор для анализа материалов о стоке наносов и их химического состава обусловлен их крупными размерами, а также наличием данных эпизодических гидрохимических наблюдений за ММ [Коновалов и др., 1968; Савенко 2006; Геоэкологическое..., 2007; Pokrovsky et al. 2012; Pokrovsky, 2016; Krickov et al., 2019; Savenko et al., 2020; 2023].

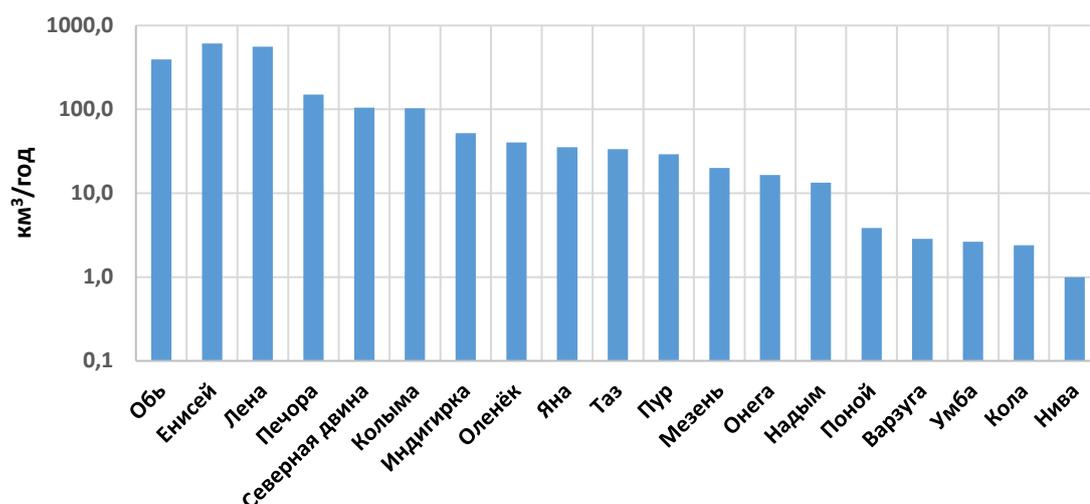


Рисунок 2.1. Объём стока крупнейших рек, обеспеченных данными гидрохимических наблюдений (с 1979 по 2019гг.) [Атлас... 2017; Magritsky et al. 2013].

Таблица 2.1

Характеристики рек водосбора Северного Ледовитого океана

Длина реки – L ; годовой сток – W ; площадь водосбора – F ; сток взвешенных наносов – W_S ; сток влекаемых наносов – W_b ; твёрдый сток – ($W_\Sigma = W_S + W_b$)

	Тип устья	L , км	W , км ³ /год	W_S , 10 ⁶ т/год	W_Σ , 10 ⁶ т/год	$F \times 10^3$, км ²	Источник
Енисей	Эстуарно-Дельтовое	4100	584	13/4.9	15/7.3	2580	Magritsky et al. 2013, Атлас... 2017; Долгополова, 2015
Обь (Иртыш)	Эстуарно-Дельтовое	5410	540	16	18.9	2990	Magritsky et al. 2013, Атлас... 2017; Долгополова, 2015
Лена	Дельтовое	4260	533	22.7	27	2490	Magritsky et al. 2013, Атлас... 2017; Долгополова, 2015
Печора	Дельтовое	1809	130	6.4	8.7	322	Атлас... 2017; Долгополова, 2015
Колыма	Дельтовое	2129	118	12.3	16	647	Magritsky et al. 2013, Атлас... 2017; Долгополова, 2015
Хатанга	Эстуарное	1636	105	1.8	5.2	364	Атлас... 2017; Долгополова, 2015
Анаырь	Эстуарное	1150	68	3.6	—	191	Атлас... 2017; Долгополова, 2015
Пясина	Дельтовое	818	56	3.4	—	182	Атлас... 2017; Долгополова, 2015
Индиگیرка	Дельтовое	1790	54	11.7	15.2	362	Magritsky et al. 2013, Атлас... 2017; Долгополова, 2015
Таз	Дельтовое	1400	34	0.7	1.2	150	Геозкологическое...2007
Оленёк	Дельтовое	2270	37	1.3	2.4	219	Атлас... 2017;
Яна	Дельтовое	872	33	4.4	—	238	Атлас... 2017;
Пур	Дельтовое	389	32	0.8	1.2	112	Атлас... 2017; Долгополова, 2015
Анабар	Эстуарное	939	19	1.2	—	104	Атлас... 2017; Долгополова, 2015
Мезень	Эстуарное	966	20	—	—	78	Атлас... 2017; Долгополова, 2015
Онега	Эстуарное	416	16.4	—	—	56.9	Атлас... 2017;
Надым	Дельтовое	545	13.3	—	—	64	Атлас... 2017; Геозкологическое...2007
Поной	Эстуарное	391	3.8	—	—	15.5	Атлас... 2017;
Варзуга	Эстуарное	254	2.9	—	—	9.84	Атлас... 2017; Геозкологическое...2007
Умба	Эстуарное	123	2.6	—	—	6.25	Атлас... 2017;
Кола	Эстуарное	83	2.4	—	—	3.85	Атлас... 2017;
Нива	Эстуарное	36	1	—	—	12.83	Геозкологическое...2007

2.2 Сводная база данных о химическом составе воды и наносов рек российской Арктики

Для характеристики химического стока были проанализированы материалы исследований нижнего течения Арктических рек РФ, а также их устьевых областей [Алёкин, Бражникова, 1964; Коновалов и др., 1968; Геоэкологическое..., 2007; Савенко и др. 2009; Магрицкий, 2010, 2016; Магрицкий и др., 2019; Shiklomasnov, Skaklsky, 1994; Bryzgalov, Ivanov 2000; Gordeev., 2000; Galimov et al, 2006; Nikanorov, Bryzgalov, 2010; Makkaveev et al. 2010; 2015; Savenko, Pokrovsky, 2019; Krickov et al., 2019; Savenko et al., 2020; Soromotin et al., 2022; Krickov et al., 2023]. Большинство исследователей описывают результаты эпизодических наблюдений, для одной конкретной фазы водного режима. Крупные обобщения с периодами пробоотбора приходящимися на различные фазы водного режима представлены для крупнейших рек региона, в особенности для бассейнов Оби и Енисея [Savenko, Pokrovsky, 2019; Krickov et al., 2019; Soromotin et al., 2022; Krickov et al., 2023;]. Базы гидрохимических данных позволяют сделать заключение об объёмах химического стока, однако дискретность наблюдений за характеристиками химического состава составляет 2-3 измерения в месяц, что затрудняет учёт таких событий, как, например, прохождение паводков или залповые сбросы сточных вод, а также спуски систем термокарстовых озёр, которые периодически фиксируются на Арктических реках.

В большей части литературных источников рассмотрены растворённые формы транспорта химических веществ. При этом, в анализ обычно включаются основные гидрохимические показатели (рН, электропроводность, цветность, мутность, температура, содержание растворённого кислорода), главные ионы (HCO_3 , SO_4 , Cl , Ca , Na , Mg , K), биогенные элементы (P-PO_4 , NH_4 , NO_3) и наиболее токсичные металлы и металлоиды (As , Sr , Cu , Zn , Pb , Hg). Значительная часть металлов, которые могут встречаться в малых концентрациях, но при этом могут поступать в результате антропогенной деятельности, в исследованиях не рассматриваются (рис. 2.2). Материалы крупных обобщений, такие, как ArcticGRO, BESTSiberian, «Качество поверхностных вод Российской Федерации», дают более подробную информацию о химическом составе речных вод, однако содержание элементов в этих источниках представлены величинами кратности превышения ПДК или индексами, что затрудняет анализ и расчёт стока химических веществ. Информация о химическом составе взвешенных наносов практически отсутствует в открытом доступе и предоставляется лишь по запросу. Значительный объем информации доступен по результатам анализа химического состава донных отложений, однако с его помощью сложно характеризовать химический состав наносов. Данные мониторинга в районах сброса сточных вод рядом с крупными промышленными предприятиями практически отсутствуют. Так, например, в бассейнах рек, впадающих в оз. Имандра, где сосредоточены предприятия по добыче и переработке апатит-нефелиновых и медно-никелевых

руд, мониторинг химического состава вод производится на ведомственных постах, а наблюдения за стоком наносов вообще не ведутся. При этом, залповые сбросы сточных вод из рудника Центральный в реки Хибинского горного массива могут иметь мутность более 150 мг/л и состоять из взвешенных частиц PM0.5-20, наиболее интенсивно сорбирующих ММ на поверхности [Malinovsky et al., 2002 Efimov et al. 2018]. В районах месторождений полезных ископаемых, добываемых из россыпей, данные мониторинга также практически отсутствуют или недоступны, при том, что шлейфы мутных вод, сбрасываемых с них, могут достигать сотен километров и регистрироваться даже в замыкающих створах крупнейших рек [Школьный и др, 2017].

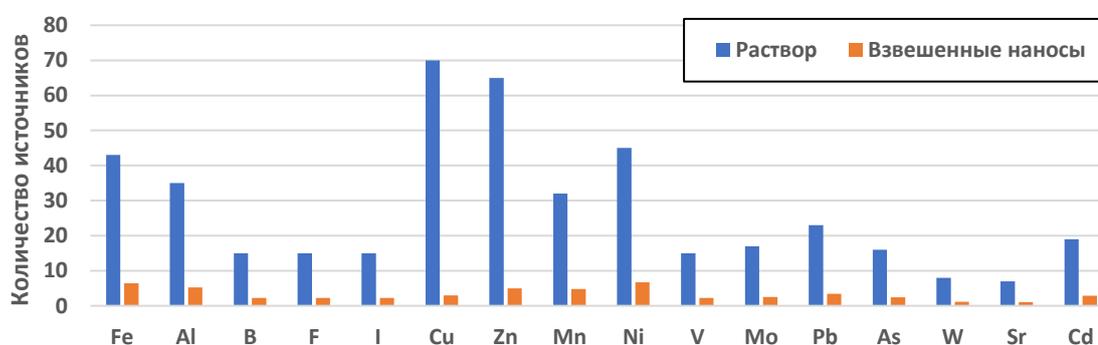


Рисунок 2.2. Изученность химического состава растворённых и взвешенных форм металлов и металлоидов в бассейнах Арктических рек.

Оценки объёмов стока химических элементов в 33 бассейнах крупнейших, крупных и средних Арктических рек были получены на основании рассмотренных литературных источников, а также базы гидрологических данных, собранных сотрудниками кафедры гидрологии суши (рис.2.3).

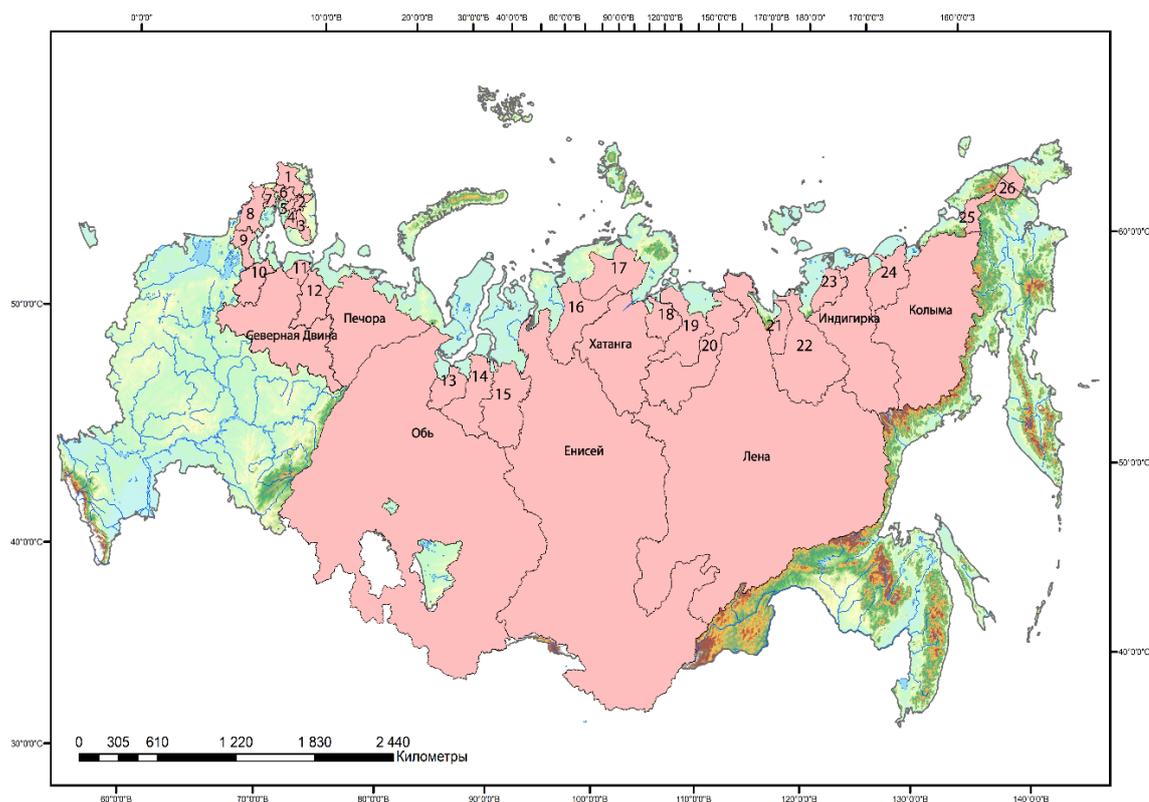


Рисунок 2.3. Бассейны рек, впадающих в Северный Ледовитый Океан, для которых выполнялся анализ литературных данных о химическом составе воды и наносов. Цифрами обозначены: 1) Тулома; 2) Териберка; 3) Поной; 4) Варзуга; 5) Умба; 6) Нива; 7) Ковда; 8) Кемь; 9) Выг; 10) Онега; 11) Кулой; 12) Мезень; 13) Надым; 14) Пур; 15) Таз; 16) Пяси́на, 17) Таймыра; 18) Попига́й 19) Анабар 20) Оленёк; 21) Омоло́й; 22) Яна; 23) Хрома; 24) Алазея; 25) Палываам; 26) Амгуэма.

Информация, посвящённая качеству воды, базируется на данных гидрологических постов сети Росгидромет и литературных источников. Концентрации химических элементов усреднялись для всего периода наблюдений, а затем рассчитывался средний сток ММ в год. Полученные значения представлены в таблице 2.2. Для сравнения концентраций ММ брался $\log_{10}(C)$, где C – средняя концентрация элемента в мкг/л. Потоки ($W_{хим}$) были рассчитаны как средняя концентрация химического элемента (C), умноженная на среднемноголетний сток воды (W) для данной реки (13):

$$C * W = W_{хим} \quad (13)$$

Максимальные концентрации Fe характерны для бассейнов рек, имеющих высокий процент заболоченной территории (рис. 2.4-2.5). В результате, вынос растворённого железа с заболоченных бассейнов рек Западной Сибири превышает вынос с бассейнов Европейской части РФ в 10-15 раз. Диапазон концентраций Fe среди всех рассмотренных рек превышает 20 раз. Максимальное содержание элемента отмечено в р. Пур (1229 мкг/л).

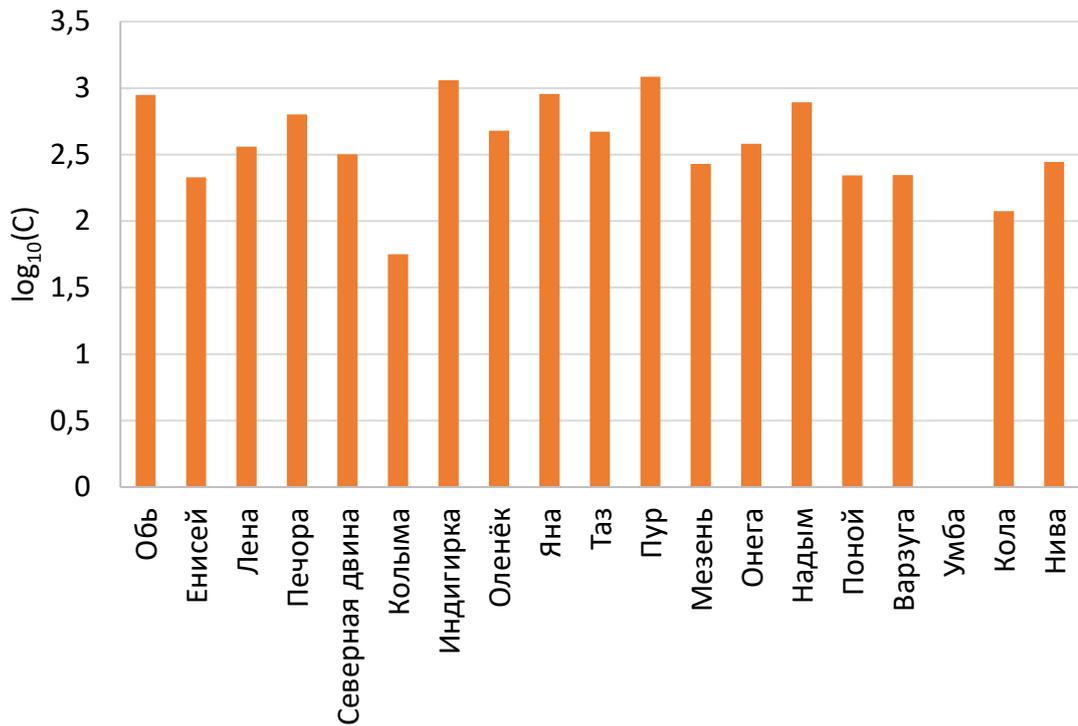


Рисунок 2.4. Средние концентрации растворённой формы Fe по данным литературных источников ($n=43$).

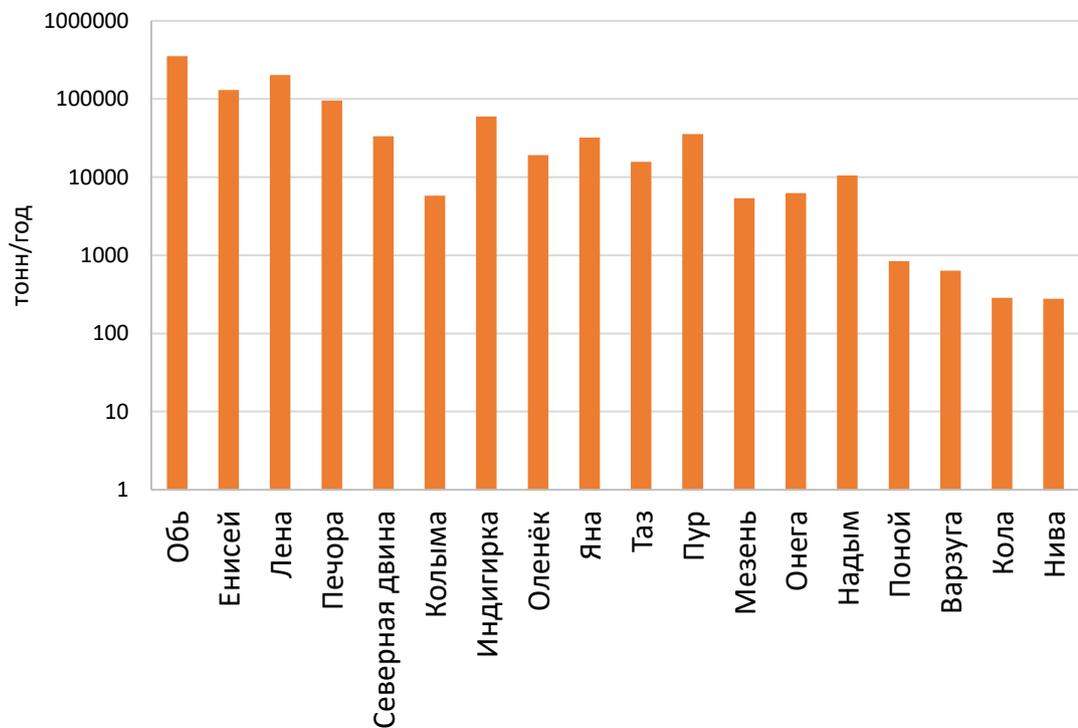


Рисунок 2.5. Потоки растворённого Fe по данным литературных источников ($n=43$).

Таблица 2.2

Общая таблица потоков химических веществ в растворённой форме

Река	Сток, км ³ /год	Сток растворённых ММ, тонн/год															
		Fe	Al	B	F	I	Cu	Zn	Mn	Ni	V	Mo	Pb	As	W	Sr	Cd
Обь	395	351714		6700	55000	3700	1492	7275	24789	927	260	370	31	230	—	45415	2777
Енисей	609	130108	17493	10000	59000	2500	3177	13776	6775	802	600	470	43	206	—	88161	2
Лена	561	203500		4600	21000	2700	1484	4665	48650	960	330	250	22	185	—	93182	3
Печора	150	95300	11600	210	1100	940	413	2337	4140	441	46	10	7	—	—	—	1
Северная Двина	105	33374	5821	3000	20000	200	437	1124	2485	209	90	39	13	69	37	—	1
Колыма	107	5795	—	360	6200	200	463	988	980	110	110	24	—	37	—	7955	—
Индиگیرка	52	59600	—	140	7100	240	280	864	1200	93	30	42	—	—	—	—	—
Оленёк	40	19200	—	—	—	—	184	511	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Яна	36	32100	—	220	3100	94	204	424	420	94	20	33	—	—	—	—	—
Таз	33	15753	1086	410	3200	140	81	284	1049	43	10	99	2	21	—	—	—
Пур	29	35588	1039	410	2700	100	122	965	1160	495	10	7	5	9	—	—	—
Мезень	20	5380		680	7700	83	55	388	385	44	20	10	215	29	7	—	0.08
Онега	16	6254	2054	300	1900	49	36	228	394	29	10	10	1	8	3	—	0.07
Надым	13	10463	1668	—	—	—	33	120	114	13	—	—	1	7	2	—	—
Поной	4	846	—	—	—	—	18	32	—	27	—	—	—	—	—	—	—
Варзуга	3	633	240	—	—	—	27	26	22	45	—	0.05	0.04	1	1	—	—
Умба	3	—	—	—	—	—	28	92	—	32	—	—	—	—	—	—	—
Кола	2	285	—	—	—	—	8	12	—	7	—	—	—	—	—	—	—
Нива	1	278	—	—	—	—	25	53	—	31	—	—	—	—	—	—	—

Оценки потоков ММ, относимых к техногенным элементам (V, Pb, As, W), значительно реже встречаются в литературных источниках. Их мониторинг приурочен к крупным промышленным центрам. Собранные данные показывают повышенные концентрации элементов в устьях рек севера Европейской части России, поскольку здесь находится несколько крупных промышленных центров и развита транспортная отрасль (рис. 2.6-2.7).

Повышенные концентрации химических элементов находят отражение в величинах стока растворённых ММ. Так, по выносу Pb заметно выделяется р. Мезень. Высокие концентрации Cu, Zn, Ni, Mo приурочены к горным районам, а также к бассейнам, в которых располагаются предприятия по переработке полезных ископаемых (рис. 2.8-2.9). Поступление сточных вод Мончегорского и Ловозёрского ГОКов в р. Умба и р. Нива приводит к повышению в их устьевых створах Cu и Ni. Это приводит к контрастным значениям концентраций и различиям в них для Cu в 4 раза, для Ni в 18 раз, для Zn в 4 раза и для Mo в 49 раз. В результате, даже при значительно меньших расходах воды и меньших площадях бассейнов, вынос ММ реками Кольского полуострова относительно крупнейших Арктических рек понижен всего в 5-10 раз.

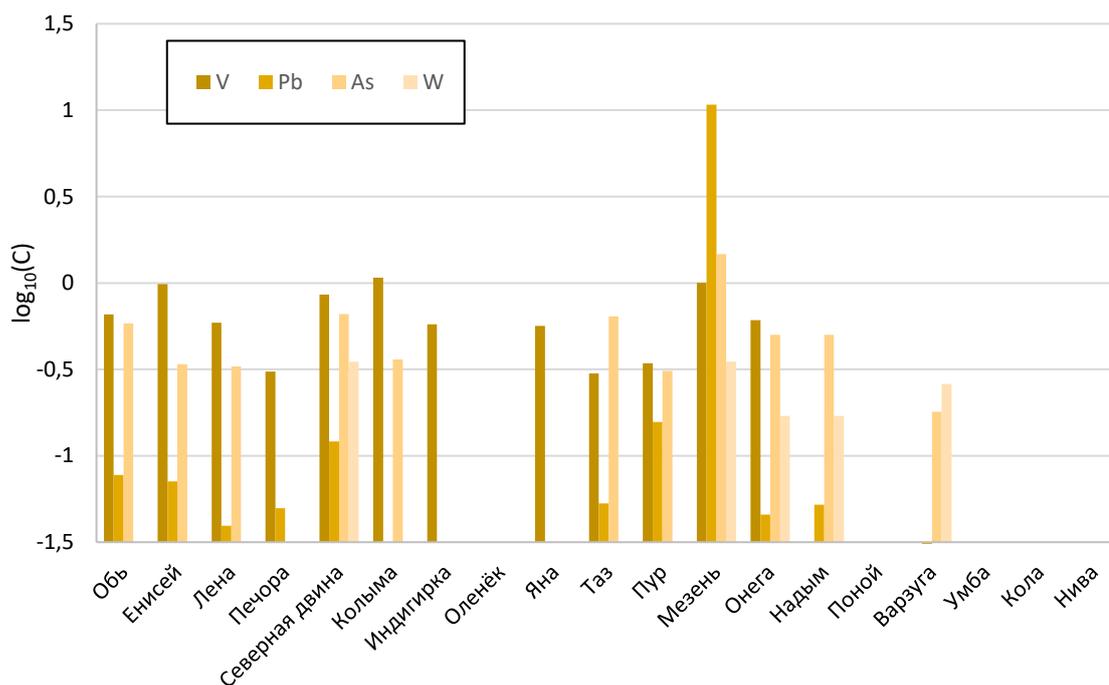


Рисунок 2.6. Средние концентрации растворённых форм V, Pb, As, W по данным литературных источников ($n=17$).

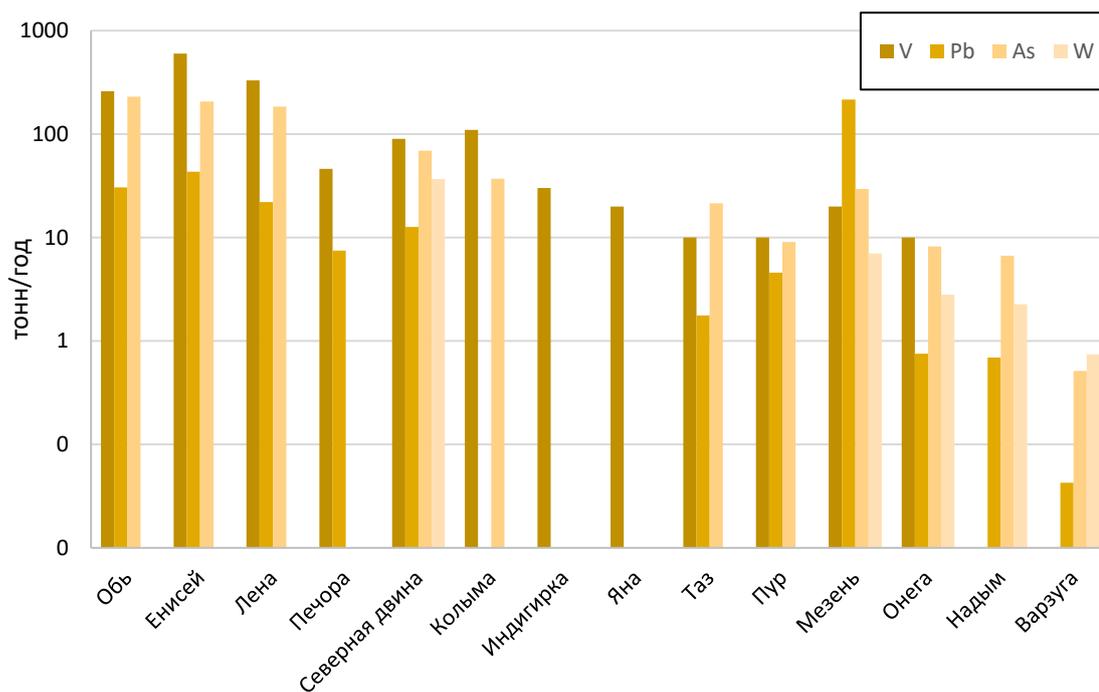


Рисунок 2.7. Потoki растворённых форм V, Pb, As, W по данным литературных источников ($n=17$).

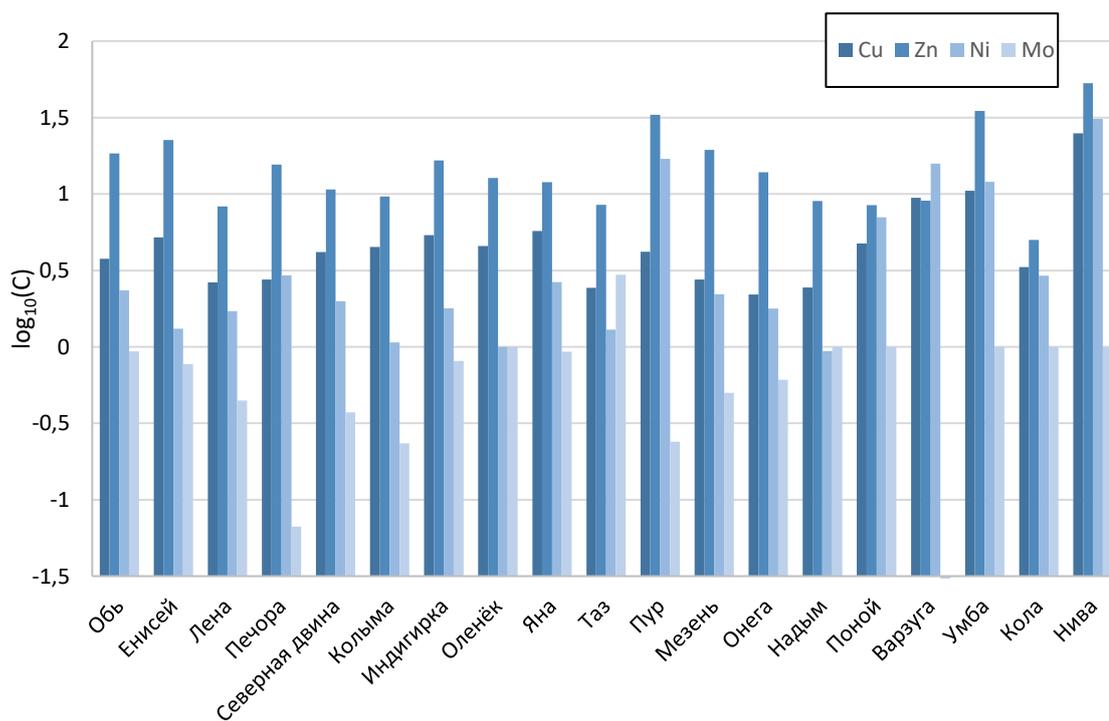


Рисунок 2.8. Средние концентрации растворённых форм Cu, Zn, Ni, Mo по данным литературных источников ($n=32$).

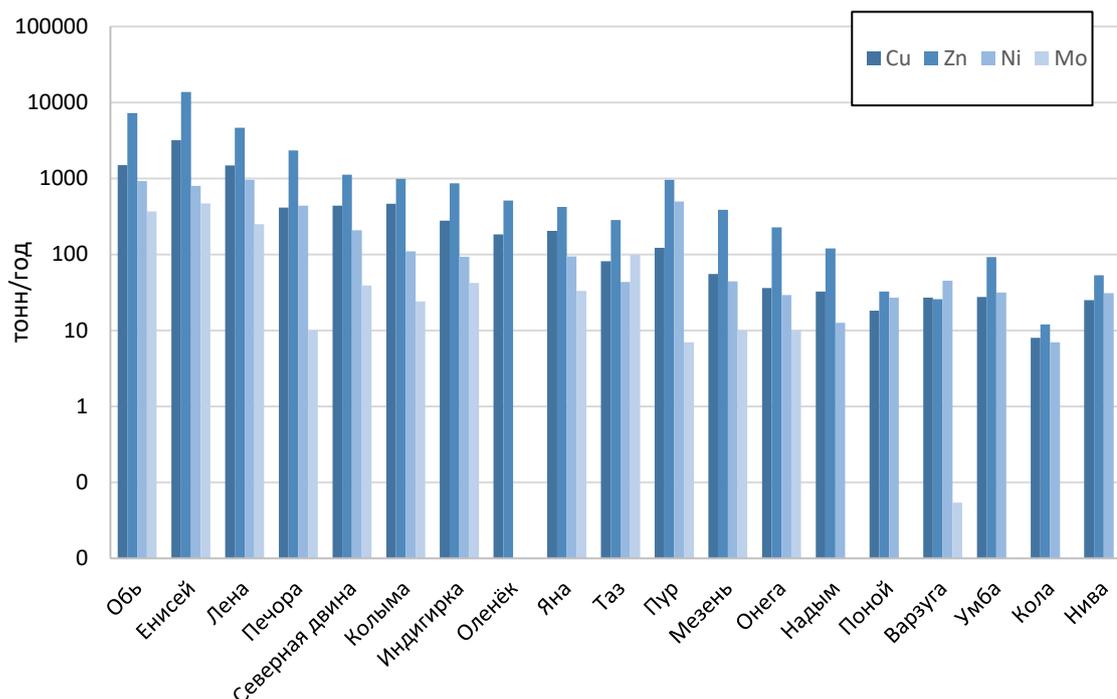


Рисунок 2.9. Потоки растворённых форм Cu, Zn, Ni, Mo по данным литературных источников ($n=32$).

Согласно данным В.С. Савенко [Савенко и др., 2023], между концентрациями ММ и величиной минерализации речных вод наблюдается значимая корреляция. Также установлены связи между концентрациями ММ в бассейнах рек Карского, Белого, Баренцева и Восточно-Сибирского морей. Коэффициенты пропорциональности между содержанием ММ в этих бассейнах близки к отношению величин минерализации соответствующих речных вод. В результате, при нормировании на величину минерализации (суммарное содержание растворенных веществ) микроэлементный состав речного стока со всего арктического побережья России должен быть примерно одинаков. Отличия концентраций могут быть связаны с наличием крупных источников загрязнения вод, а также со временем пробоотбора.

Химический состав наносов на гидрологических постах не измеряется, а сами данные о стоке наносов доступны всего по 400 постам рек Российской Федерации (АИС ГМВО). В Арктической зоне расположена их мала часть, а в устьях рек доступна обновляемая информация всего по 6 постам. В результате, лишь небольшая часть рассмотренных литературных источников содержит информацию о стоке химических веществ в составе взвешенных наносов [Коновалов и др., 1968; Ivanova, Konovalov, 1971; Martin et al., 1979; Gordeev et al., 1998; Савенко 2006; Pokrovsky, 2016; Krickov et al., 2019; Soromotin et al., 2022; Krickov et al., 2023; Корнеев А.П. (неизданные материалы)]. Измерения концентраций ММ в составе взвешенных наносов носят несистемный характер и часто выполняются исключительно для характеристики условий

транспорта тех или иных поллютантов в речной системе. Отсутствие данных о стоке наносов не позволяет получить потоки ММ в составе взвешенных наносов даже для крупных рек, за исключением Оби и Енисея. Относительно хорошо изученные распределения техногенных химических элементов (Pb, Cu, Zn, Cd) связаны с их значительной опасностью для населения и принадлежностью к основным нормируемым показателям. В результате анализа литературных источников были составлены карты распределения их концентраций (рис. 2.10-2.13).

Согласно материалам исследования, наибольшие концентрации Pb, а также значительные концентрации Zn свойственны рекам бассейна Белого моря и крупнейшим речным бассейнам. Основными факторами поступления данных металлов могут служить промышленные объекты, такие как порты, развитое судоходство, а также размер и заболоченность водосбора. В реках Центральной и Восточной Сибири концентрации Pb в составе взвешенных наносов постепенно снижаются, достигая минимума в бассейнах рек Таз и реках Яна и Амгуэма. Zn во взвешенных наносах транспортируется в органо-минеральных комплексах и на частицах органических взвесей. Высокие концентрации характерны для бассейнов со значительными заболоченными территориями. Для Cu в составе взвешенных наносов характерны высокие концентрации в устье р. Енисей и р. Мезень. Высокие концентрации в устье р. Енисей, вероятно, связаны со специфическими условиями пробоотбора и малым количеством наблюдений ($n=5$), тогда как для р. Мезень, повышенные концентрации отмечаются ежегодно ($n=18$). Высокие концентрации Cd в составе взвешенных наносов также характерны для рек Европейской части России и Западной Сибири из-за наличия большого количества антропогенных источников поступления. Среди рек Восточной Сибири выделяются Лена и Колыма, где повышенные концентрации, вероятно, связаны с подстилающими породами на водосборах рек.

В отличие от растворённой формы, состав взвешенных наносов Арктических рек отличается неоднородностью, связанной со строением водосбора. Основными факторами, определяющими эту неоднородность, служат интенсивность процессов эрозии, площади заболоченных территорий, наличие многолетнемёрзлых пород (ММП). Важнейшим фактором является антропогенная деятельность. При рассмотрении изменчивости концентраций ММ с Запада на Восток отмечается постепенное снижение их концентраций, однако данных для получения устойчивых закономерностей и расчётов потоков химических элементов во взвешенной форме пока недостаточно.

Слабая развитость системы мониторинга химического состава вод крупных рек, разреженность сети наблюдений и отсутствие измерений химического состава наносов значительно затрудняет использование этих данных для оценки химического стока даже наиболее крупных рек. Сокращение пунктов наблюдений за мутностью воды, трудоемкость методов приводит к необходимости поиска альтернативных средств измерений. В этой связи

основную информационную составляющую исследований стока наносов представляют собой полевые измерения.

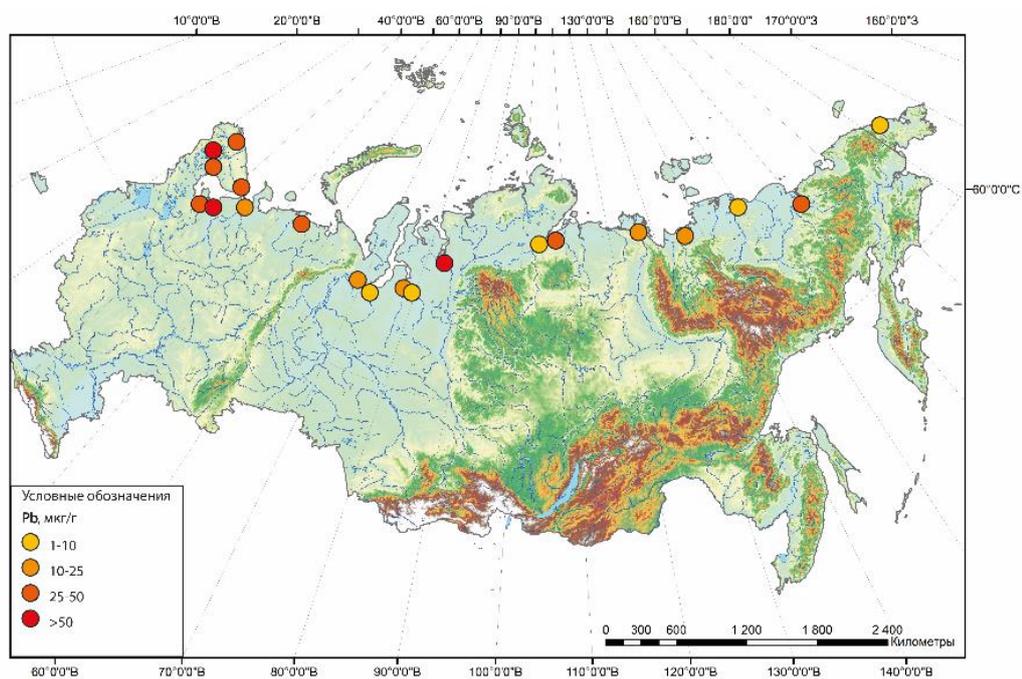


Рисунок 2.10. Содержание Pb в составе взвешенных наносов рек арктической зоны РФ.

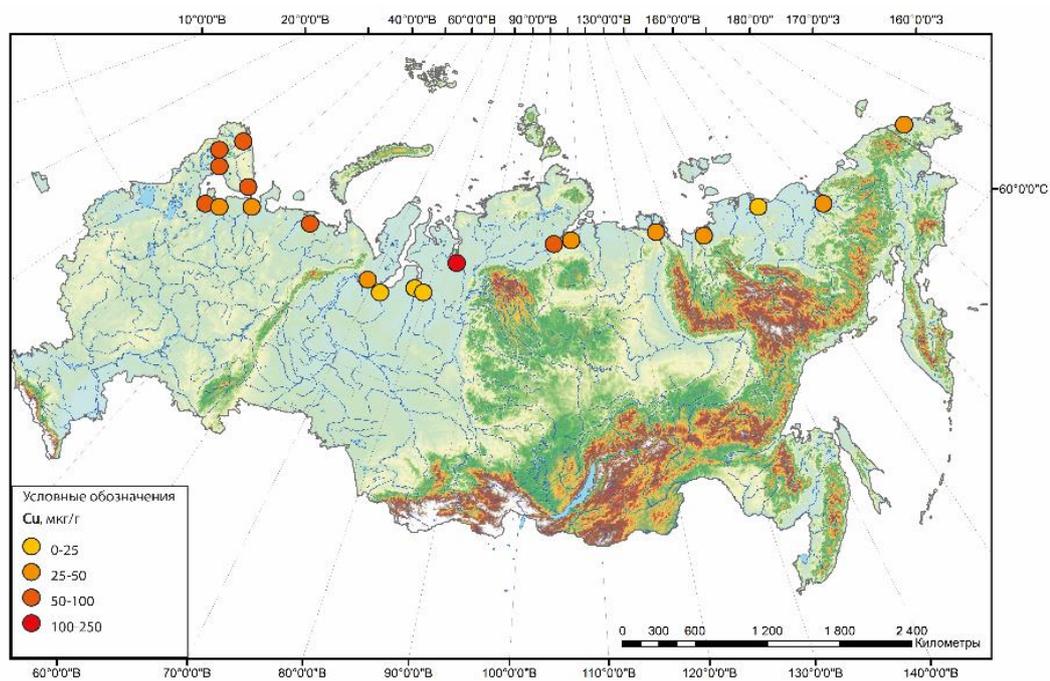


Рисунок 2.11. Содержание Si в составе взвешенных наносов рек арктической зоны РФ.

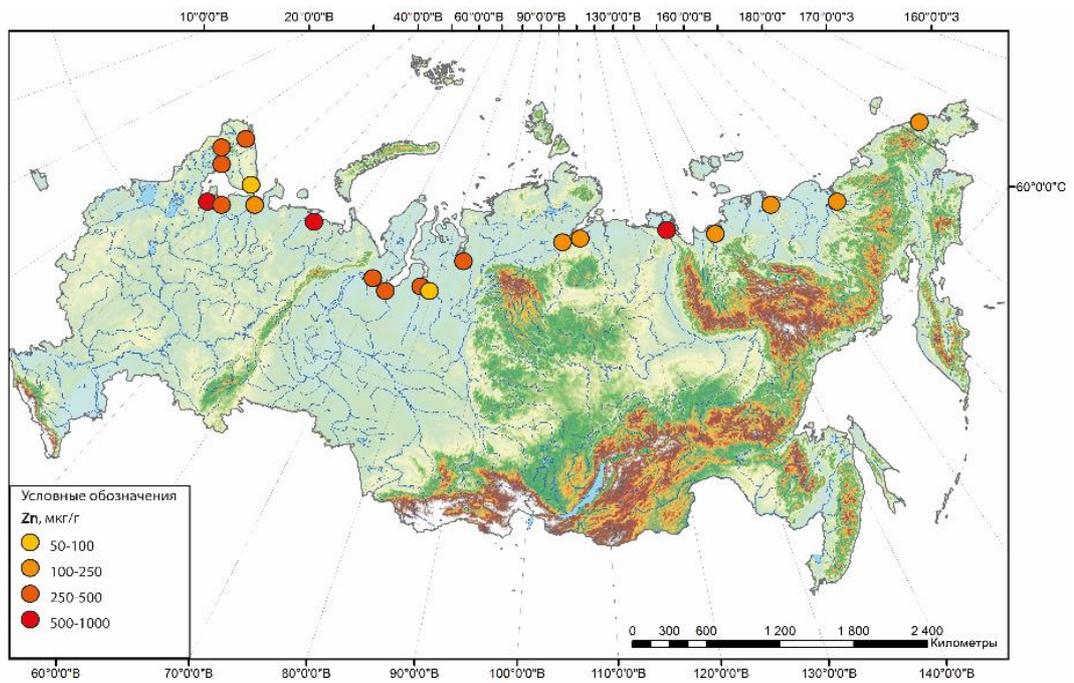


Рисунок 2.12. Содержание Zn в составе взвешенных наносов рек арктической зоны РФ.

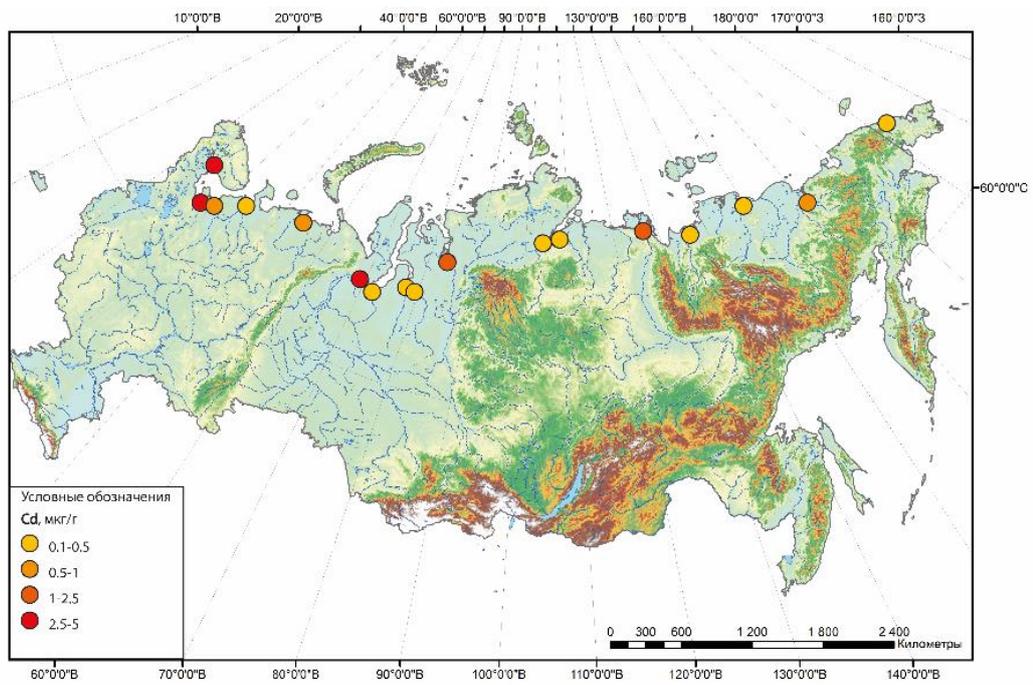


Рисунок 2.13. Содержание Cd в составе взвешенных наносов рек арктической зоны РФ.

2.3 Условия формирования потока и химического состава наносов в бассейнах рек Обь, Енисей, Лена и Колыма

В рамках работы были детально рассмотрены характеристики химического состава наносов крупнейших рек Арктической зоны РФ. Это реки Обь, Енисей, Лена. Также рассматривалась р. Колыма, для которой в рамках экспедиций была собрана обширная база гидрологических и гидрохимических данных. Бассейны рек Обь, Енисей, Лена имеют сопоставимые размеры водосборных бассейнов, однако различаются долей равнинных и горных территорий. Так бассейн р. Обь преимущественно сложен озёрно-аллювиальными, аллювиальными и флювиогляциальными отложениями (78% площади бассейна – равнинные территории), которые на юге переходят в элювиально-делювиальные отложения и скальные породы. Бассейн р. Енисей образован преимущественно горными территориями (64% площади бассейна), представленными скальными выходами, коллювиальными, делювиальными и солифлюкционными отложениями. Только левый берег реки сложен озёрно-аллювиальными и флювиогляциальными отложениями. Бассейн р. Лена также представлен преимущественно областями высотной поясности (около 50% площади бассейна). Состав отложений схож с отложениями р. Енисей, озёрно-аллювиальные и флювиогляциальные отложения локализуются в среднем течении реки в районе впадения р. Вилюй. Бассейн р. Колыма в 4 раза меньше наиболее крупного из рассматриваемых – бассейна р. Обь. 81% территории бассейна – горные области, которые сменяются флювиогляциальными отложениями лишь в нижнем течении. Спецификой распределения интенсивности эрозии в пределах крупных Арктических речных бассейнов является ее увеличение в субширотном направлении с севера на юг, соответствующее общему усилению сельскохозяйственного использования земель и увеличению высот рельефа (рис. 2.14). Наиболее сильно в этом отношении освоены верхнее и среднее течение рр. Обь и Енисей. В этих условиях, ввиду активной с/х деятельности, накладывающейся на фактор рельефа, происходит интенсивная эрозия водосборов рек, что значительно увеличивает сток наносов [Иванов, Чалов, 2019]. Так, в южной части бассейна р. Енисей смыв почв увеличивается в 15 раз по сравнению с северными, что связано с расположением верховьев бассейна р. Енисей в Монголии и КНР, активно развивающих с/х. На этом фоне отмечены обратные тенденции внутри бассейна р. Лена, связанные с влиянием фактора рельефа в северной, возвышенной, части бассейна (Верхоянский хребет). Однако в бассейнах рек расположены крупные водохранилища, задерживающие наносы и влияющие на сглаживание пиков фаз водного режима (табл.2.3). Наименее освоенными являются бассейны рек Восточной Сибири, однако, в них расположено большое количество россыпных месторождений полезных ископаемых, что приводит к значительному количеству залповых сбросов неочищенных вод. Шлейфы мутности таких сбросов фиксируются на

Типы русел крупнейших рассматриваемых рек [Chalov et al., 2018]

Тип Река	Ограниченные, %			Широкопойменные, %		
	Прямые	Меандрирующие	Разветвлённые	Прямые	Меандрирующие	Разветвлённые
Обь	нет	нет	Нет	35	45	20
Енисей	13	16	11	5	6	31
Лена	18	12	34	15	нет	21
Колыма	4	5	13	25	45	8

Бассейны рассматриваемых рек полностью или практически полностью расположены в зоне распространения многолетнемерзлых породы (ММП) (рис.2.15). Для устьев с ММП характерен сравнительно малый сток наносов, основная часть которого поступает в устье в периоды половодья. Во время летней межени малый уклон устьевых долин способствует отложению большей части мелких речных наносов в рукавах приустьевого участка, а также на поверхности дельты (песок) и в озерах (ил, глина), что приводит к образованию в устьях обширных областей, сложенных легкоразмываемыми грунтами, которые интенсивно промерзают в зимний период. Весеннее половодье на реках с ММП происходит при замерзших берегах, что сдерживает эрозию берегов рек и рукавов дельт [Dolgopolova, 2018], которая затем усиливается в период спада половодья.

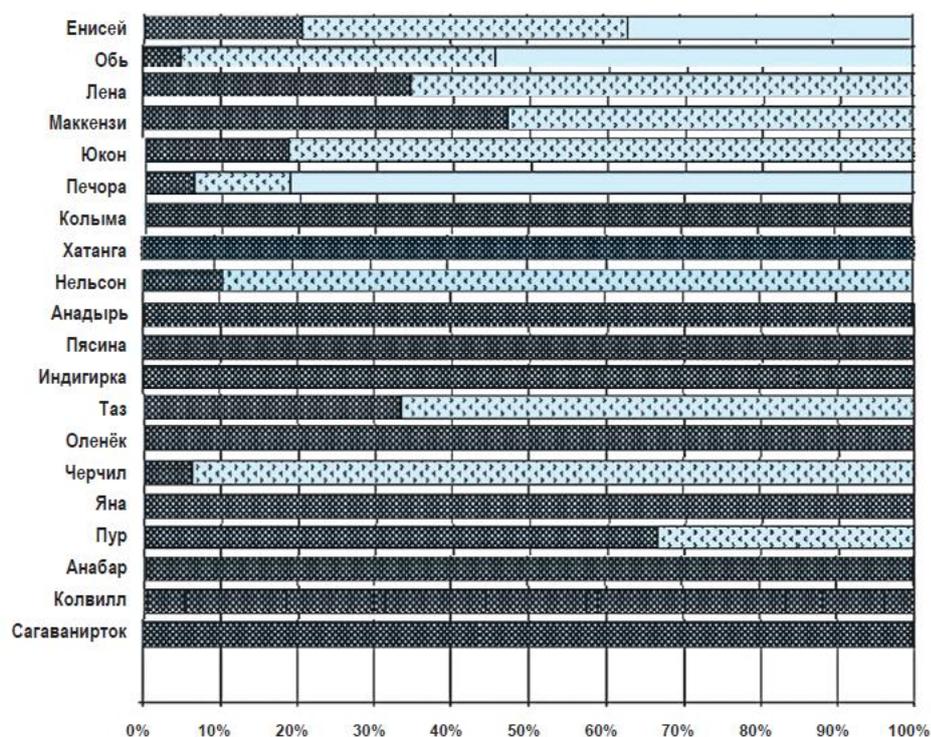


Рисунок 2.15. Относительная длина участков рек, находящихся в мерзлых грунтах разных типов: темные — сплошные, галочки — прерывистые, без заливки — вне зоны ММП [Dolgopolova, 2018].

Одна из отличительных черт устьев рек криолитозоны — морозобойные трещины и ниши размыва, наличие которых способствуют обрушению больших объёмов береговых отложений ММП, в результате чего происходит переформирование русел, характерное для рукавов дельт Лены, Яны, Индигирки. Обрушение берегов, происходящее обычно после прохождения пика половодья, приводит к повышенному содержанию наносов в потоке и увеличению их переноса в реках и рукавах дельты [Lurachev et al. 2020]. На равнинных берегах рек зоны ММП находятся многочисленные термокарстовые озера, часть которых расположена вблизи рукавов. Эрозия берегов этих озёр приводит к присоединению к потоку наиболее близко расположенных озёр. В результате, в руслах рукавов появляются области с большими глубинами, в которых оседает повышенное количество наносов, препятствуя их продвижению к устьевому взморью и формированию дельты выдвигания. Озеро постепенно мелеет, и на его месте зимой образуются положительные формы рельефа с ледяным ядром, перекрытым слоем наносов, часто не тающие летом. Присоединение озёр к потоку может сопровождаться интенсивным промывом перемычки и выносом тонкодисперсных озёрных отложений, что проявляется в кратковременном и значительном (в 10-100 раз) увеличении мутности реки без существенного подъёма уровня воды.

Несмотря на значительные изменения водного режима вследствие потепления климата и интенсификации антропогенной деятельности, сток наносов и химический состав русловых потоков даже крупнейших рек Российской Федерации исследуется значительно меньше, чем в середине XX века. В частности, в последние 20–30 лет происходило сворачивание исследовательской деятельности, закрытие части гидрологических постов и прекращение мониторинга за наносами на многих оставшихся. На части рек Арктической зоны последние наблюдения проводились в конце 1980-х – первой половине 1990-х гг., на р. Колыме – 1997 г., р. Лене – 2010 г. В результате, возрастает ценность мониторинговых исследований, выполненных в различные фазы водного режима по единой методике на репрезентативных станциях измерений.

ГЛАВА 3. МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ СОСТАВА ВЗВЕШЕННЫХ НАНОСОВ КРУПНЕЙШИХ РЕК РОССИЙСКОЙ АРКТИКИ

3.1 Материалы и методы исследования

Работы на крупнейших реках российской Арктики потребовали разработки специальной методики исследования, позволяющей учесть значительную пространственную и временную неоднородность потоков химических веществ в створах рек.

Известно, что даже в пределах одного створа р. Колыма, различия между концентрациями наносов у правого и левого берегов могут достигать 50-60% [Магрицкий и др. 2019], а поступление материала из точечного источника, такого, как ручьи, дренирующие участок таяния многолетней мерзлоты может оказывать влияние на мутность воды и её химический состав на 60 км ниже по течению в районе створа измерений [Чалов и др. 2022]. При этом, скорость таяния очень сильно зависит от погодных условий. В 2021, за самые жаркие месяцы лета отступление бровки тающего склона обнажения ММП – Дуванного Яра на р. Колыма, составило более 3 м (рис. 3.1). Кроме увеличения мутности в результате таяния ММП у одного из берегов, в случае прохождения крупных паводков или прорыва каскада пойменных озёр может начаться размыв берегов (до 1,5м за событие (04.08.19)), что также приводит к повышению мутности воды для отдельных участков поперечного створа в 5-7 раз (рис. 3.2).



Рисунок 3.1. Процесс термоэрозии в районе обнажения ледового комплекса (едомы) Дуванный Яр на р. Колыма.

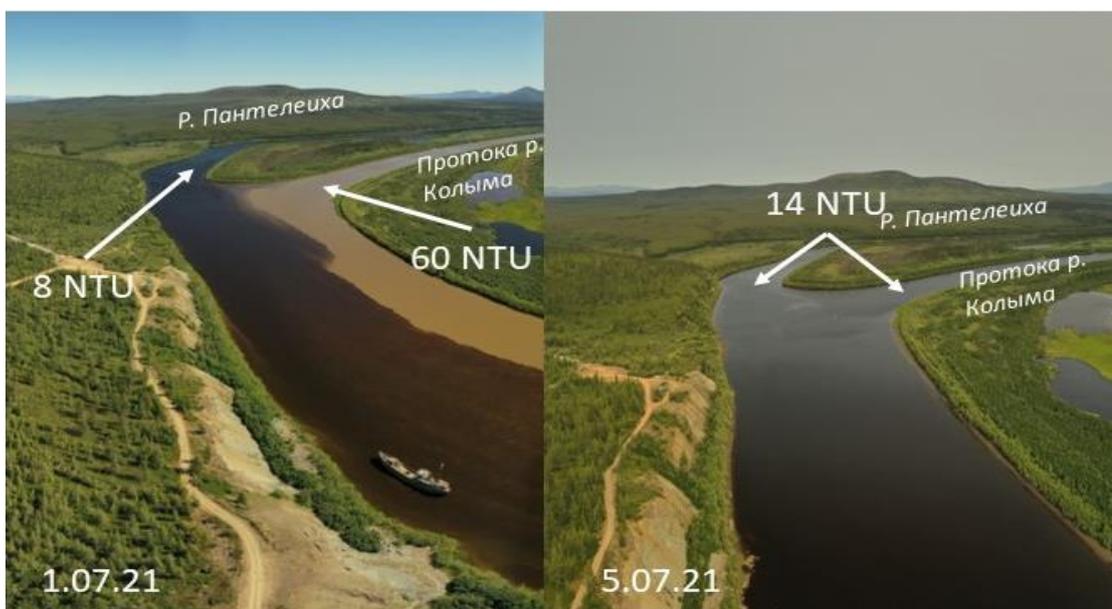


Рисунок 3.2. Различие мутности воды в р. Пантелеиха (слева) и протоке р. Колымы Амболиха (справа) во время прохождения паводка в июле 2021 года.

Обобщение опыта работ на крупных реках (бассейн р. Селенга, р. Москва, р. Западная Двина) позволило выработать единый подход к организации полевых работ и последующему анализу образцов. Методика состоит из: полевого этапа, основанного на детальном пробоотборе в пределах контрольных створов, аналитического этапа (определения расхода воды, физических, химических свойств воды и наносов) и этапа обработки и определения потоков наносов.

Полевой этап пробоотбора (рис. 3.3) направлен на изучение особенностей распределения концентраций ТММ в составе наносов по всему поперечному сечению крупных рек. Была отработана стандартная программа измерений, направленная на отбор проб воды и взвешенных наносов на трех вертикалях (А, В, С) и трех горизонтах (0 – приповерхностный, 1 – средний, 2 – придонный) (рис.3.3).

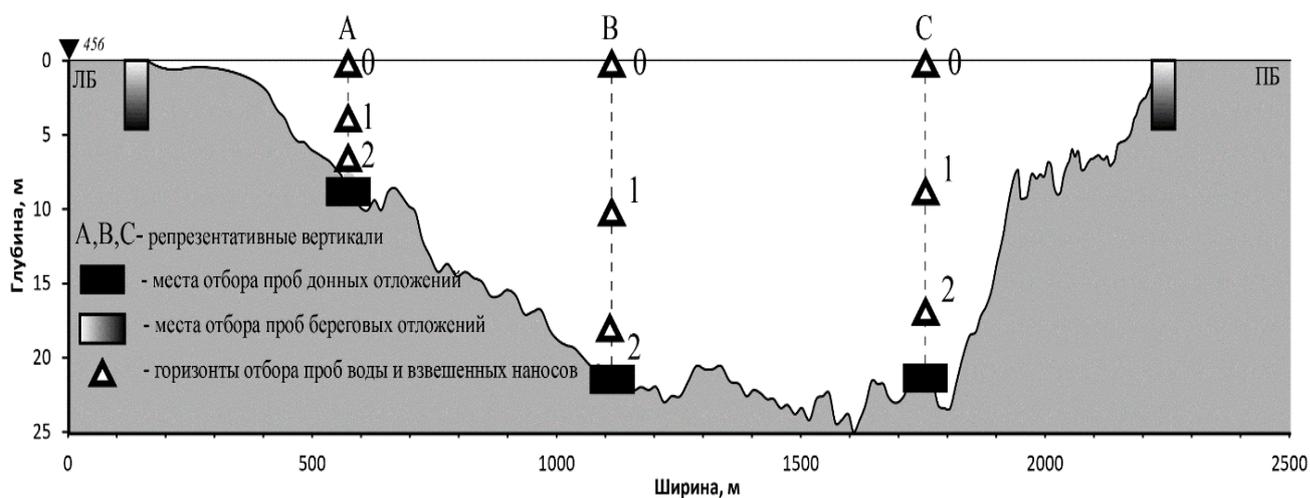


Рисунок 3.3. Схема выполнения работ в репрезентативных створах.

В каждом выбранном створе выполнялись следующие работы:

1. Организация временного водомерного поста. Ежедневные наблюдения за уровнем, мутностью, температурой, рН, электропроводностью воды.
2. Измерения и отбор проб по программе комплексного руслового гидролого-геохимического профиля с параллельным измерением расхода воды ADCP. Расходы измеряются каждый день на профиле, зафиксированном с помощью системы GPS.
3. Отбор интегральных проб взвешенных наносов на разных горизонтах осуществляется с помощью авторской установки С.Р. Чалова (патент № 201927 от 21.01.2021) - зонда-ловушки взвешенных наносов, представляющей собой систему из устанавливаемых в речном потоке на разной глубине (1 – приповерхностный слой; ловушка 2 – середина; ловушка 3 – придонный слой) ловушек наносов (рис. 3.4). Перехват взвешенных наносов осуществляется с помощью мелкоячеистой сетки (мельничный газ с диаметром пор 28 мкм). С помощью зонда-ловушки производится отбор репрезентативных проб взвешенных наносов разной крупности, общим весом до нескольких сот грамм. Собранная взвесь в дальнейшем используется для сепарирования проб на разные классы по крупности и дифференцированного химического анализа этих классов. Отобранные навески разделяются на классы крупности (PM1 и PM1-10) методами отмучивания [Вадюнина, Корчагина, 1986]. Отработанная глубина инсталляции зонда – до 20 м. Зонд-ловушка позволил впервые в мировой практике получать образцы взвешенных наносов с разных глубин речного потока крупных рек без привлечения специализированного дорогостоящего оборудования.
4. Повторные детальные промеры (ширина пролета между галсами 10-20 м) участка русла длиной, равной ширине русла – для оценки расхода влекомых наносов и динамики гряд. Выполняется раз в 5 дней.
5. Съёмка участка реки с помощью летального аппарата для построения карты распределения мутности (длина участка 500 м) с проведением измерения оптической мутности.
6. Организация наблюдений высокого разрешения за динамикой размываемых берегов с помощью летального аппарата.
7. Отбор проб мутности воды из поверхностного слоя разного типа водных объектов (отмирающие рукава, старицы, приток) для калибровки спутниковых снимков и дистанционного определения мутности.
8. Построение калибровочных кривых между косвенной характеристикой мутности воды – интенсивностью обратного рассеяния (backscatter intensity) по измерениям ADCP и мутностью воды (оптический и весовой) на основе синхронного отбора с разных глубин проб мутности воды. Сопоставление профиля мутности по ADCP с съёмкой поверхности воды с помощью летального аппарата и натурными измерениями.

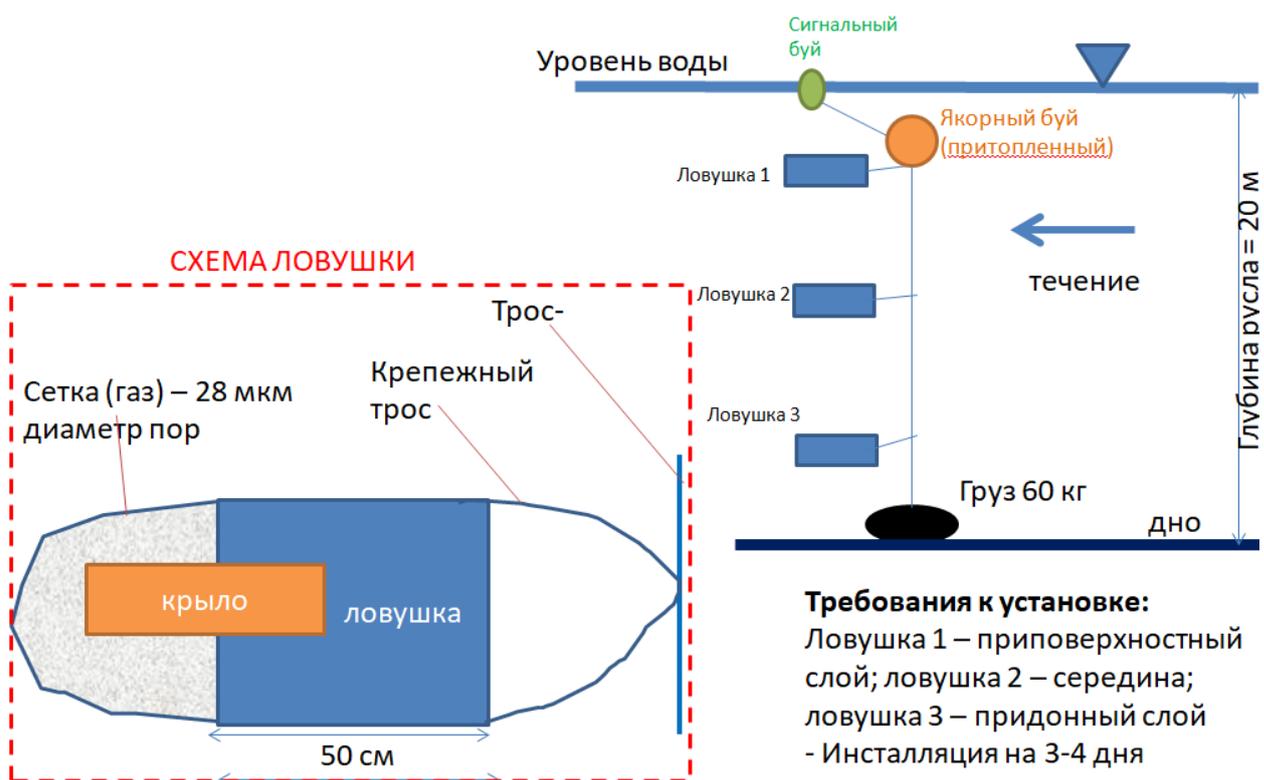


Рисунок 3.4. Схема зонда-ловушки для взвешенных наносов (патент № 201927 от 21.01.2021) [Чалов, 2021].

Полевые исследования проводились в замыкающих створах рек Обь, Лена, Енисей, Колыма в период с августа 2018 года по август 2021. Всего проведено 50 измерений в створах, отобрано более 450 проб воды и наносов, в которых проанализированы весовая мутность, гранулометрический и химический состав (табл. 3.1). С помощью ловушек взвешенных наносов было отобрано 56 интегральных проб (р. Енисей – 17, р. Обь – 6, р. Лена-9, р. Колыма-24).

Таблица 3.1

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

Год	Река	Месяц	Даты	Обозначение	АДСР/Гидрохимия	Пробы ММ	Пробы ГС
				Сезон	работы в створе г/п	проб	проб
2018	Обь	Сентябрь	22-24/09	О1	2	15	15
2018	Обь	Ноябрь	24-26/11	О2	1	7	7
2019	Обь	Июнь	22/06-9/07	О3	3	20	25
2020	Обь	Август	23-29/08	О4	2	18	18
2021	Обь	Январь	30/01-4/02	О5	2	18	18
Всего					10	78	83
2018	Лена	Август	15/08-17/08	Л1	2	11	11
2019	Лена	Июнь	7-17/06	Л2	3	27	25
2020	Лена	Июль	17/06-9/07	Л3	2	29	41
Всего					7	67	77
2019	Енисей	Июнь	2/06-16/06	Е1	4	41	40
2021	Енисей	Июль	1/08-8/08	Е2	3	19	19
Всего					7	60	59
2019	Колыма	Август	25/07-17/08	К1	12	86	86
2020	Колыма	Июль	1/07-9/07	К2	4	40	40
2021	Колыма	Май-июнь	25/05-25/06	К3	4	37	37
2021	Колыма	Июнь-июль	25/06-8/07	К4	3	30	30
2021	Колыма	Июль-август	8/07-15/08	К5	3	37	37
Всего					26	230	230
Всего за 2018-2021гг.					50	435	449

3.2 Характеристики замыкающих створов в период проведения работ

Экспедиционные исследования в бассейнах рек проходили в периоды половодья, летней межени, летне-осеннего паводочного периода, осенней и зимней межени (рис. 3.5). В качестве пунктов наблюдения выбирались створы в вершине дельты (выше крайней точки проникновения солёных вод и выше начала дельтовых разветвлений русла). Створы выбирались на прямолинейных участках, для которых отсутствует многорукавность. В этих створах на р. Обь, Енисей, Колыма расположены гидрологические посты УГМС.

Створ на р. Обь расположен в районе г. Салехард (66°36'39.07"С; 66°30'38.44"В). На р. Енисей створ расположен в районе г. Игарка (67°25'51.78"С; 86°29'2.31"В). Для р. Лена, в качестве замыкающего створа изначально был принят пгт. Кюсюр, однако, вследствие его труднодоступности, измерения проводились выше по течению в районе пгт. Жиганск (66°50'35.60"С; 123°26'27.22"В). Поскольку ниже пгт. Жиганск в р. Лена впадают небольшие притоки, было принято решение считать данные г/п Кюсюр репрезентативными для нижнего течения реки. На р. Колыма в качестве опорного створа был выбран пгт Черский (68°45'14.25"С; 161°15'16.71"В). Данные посты, кроме г/п Черский являются действующими, на них регулярно проводятся измерения расхода воды, а также стока наносов и определяется химический состав воды, и содержание наносов, согласно [РД 52.08.104-2002 «Методические указания. Мутность воды...»]. На г/п Черский наблюдения за расходом воды были прекращены в 80е годы XX века, однако производятся наблюдения за уровнем воды. На р. Колыма, в качестве репрезентативных данных расходов воды были приняты показатели г/п Колымское, расположенного в 150 км выше по течению. При этом, учитывался вклад притоков рр. Омолон (1000 м³/с), Большой и Малый Анюй (суммарно 600 м³/с), которые впадают между г/п Колымское и пос. Черский [Магрицкий и др., 2019]. Гидрологические характеристики опорных постов представлены в табл. 3.2.

На р. Лена измерения в створе пос. Жиганск выполнялись только в 2019 году. Из-за труднодоступности нижнего течения, полевые компании 2020-2021 года проходили на участке между г. Якутск (61°54'29.56"С; 129°44'21.44"В) и пгт. Жиганск. Расходы и уровни воды в районе г. Якутск дополнительно оценивались по данным г/п Табага, выше города.

Таблица 3.2

Основные характеристики опорных г/п

ГП	Салехард	Игарка	Кюсюр	Колымское
Площадь, тыс. км ²	2950	2440	2430	526
Ср. расход, м ³ /с	12512	19302	17770	3253
Объём стока, км ³ /год	540	584	533	118
Сток взвешенных наносов, млн. т/ год	15.6	12.4	22.1	11.7

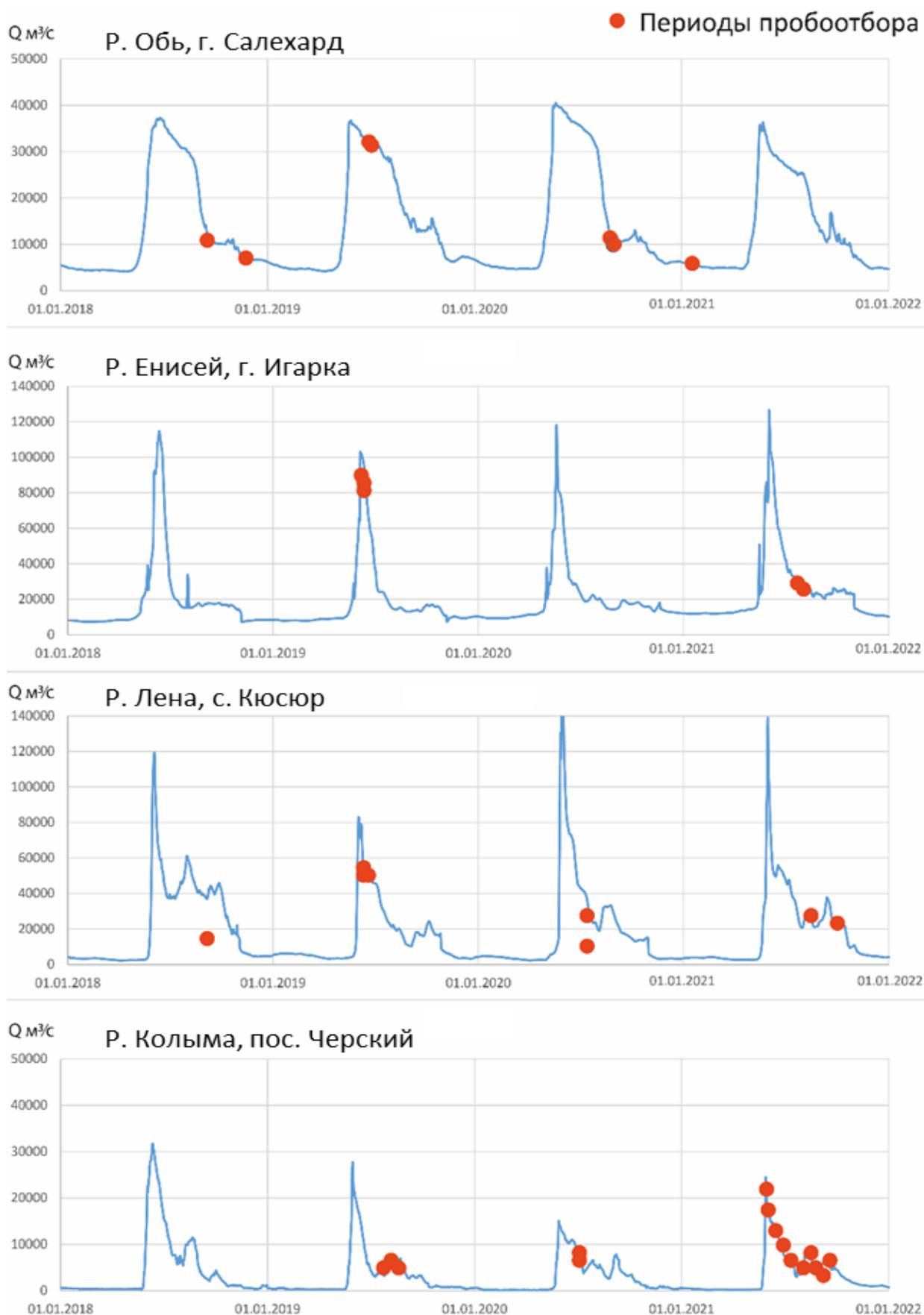


Рисунок 3.5. Гидрографы рек Обь, Енисей, Лена и Колыма для репрезентативных створов, в которых проводились исследования за период с 1.01.2018 по 1.01.2022 (по данным ГБД Arctic GRO [<https://arcticgreatrivers.org/>]).

Гидрологические исследования охватывают как периоды повышенной, так и пониженной водности. Для характеристики сезонов использовались данные гидрологических постов и фактические расходы воды, измеренные акустическим доплеровским профилографом измерителем течений (ADCP). В работе использовались профилографы RioGrande и Sontek M9. Для характеристики каждого из периодов были рассчитаны модульный коэффициенты водности Km (13) (рис. 3.6):

$$Km = \frac{Q_{\text{факт}}}{Q_{\text{ср}}}, \quad (13)$$

где $Q_{\text{факт}}$ - расход воды, полученный при полевом измерении ADCP, $Q_{\text{ср}}$ – среднегодовой расход воды в данном створе. Условия пробоотбора сильно различаются по водности, что может оказывать значительное влияние на мутность воды и на концентрации в ней химических элементов. Проведение экспедиционных исследований как в многоводные, так и в маловодные фазы ВР позволило значительно уточнить характеристики стока наносов и уточнить общий поток наносов в течении года.

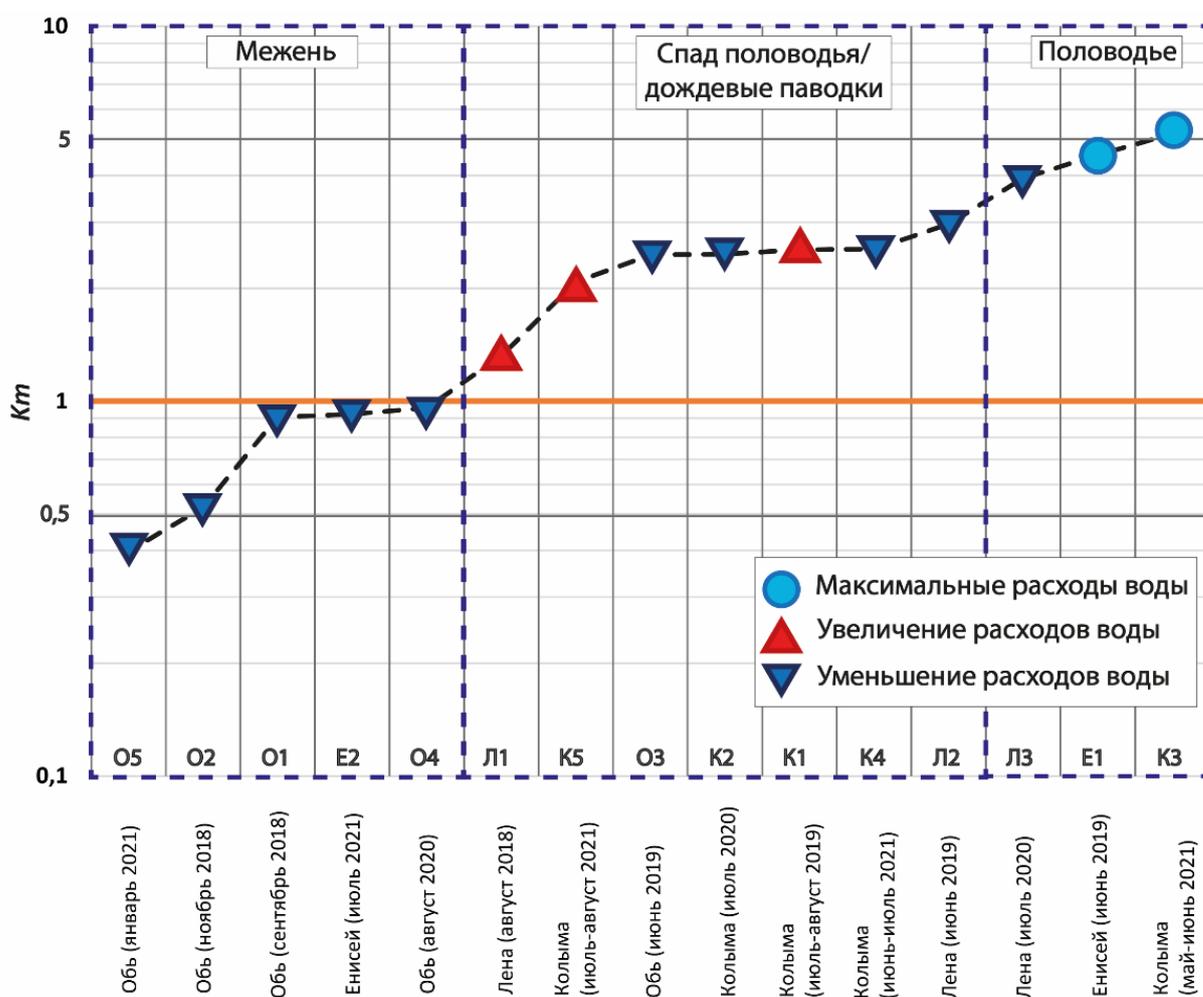


Рисунок 3.6. Модульный коэффициент водности для рассматриваемых рек в период проведения экспедиций.

3.3 Аналитические методы и статистическая обработка данных

Аналитический этап основывался на делении отобранных проб на нерастворенные и растворенные формы путём фильтрования через мембранные фильтры с диаметром пор 0.45 мкм. Использовалась вакуумная фильтровальная установка. Применение мембранных фильтров с диаметром пор 0.45 мкм (PM0.45) связано с необходимостью подробного рассмотрения самой мелкой фракции взвешенных наносов PM0.45-10 которая является наиболее химически активной, вследствие чего именно в её составе переносится значительное количество элементов-загрязнителей. Фильтры с осадком просушивались для последующего определения мутности воды весовым методом и взвешенных форм MM, а также концентраций взвешенного органического вещества. Профильтрованная вода разливалась в пластиковые пробирки объёмом 15 мл и консервировалась концентрированной азотной кислотой (HNO_3 65%) для последующего анализа MM в растворённой форме. Также отбирались фильтрованные пробы воды для определения органического углерода, фосфора и макрокомпонентного состава.

Гранулометрический состав взвешенных частиц определялся методом лазерной дифракции на лазерном гранулометре (Fritsch Analysette 22, Германия). Перед этим пробы высушивались и взвешивались на аналитических весах для определения весовой мутности. Гранулометрический анализ с помощью лазерного гранулометра существенно уменьшает время определения концентраций фракций взвешенных наносов по сравнению методом фракционирования взвеси А.Н.Сабанина (отмучивание) или пипеточным методом. Для проведения работ требуется предварительная пробоподготовка, состоящая из снятия осадка с фильтров при помощи 4% раствора $\text{Na}_4\text{P}_2\text{O}_7$. В случае, если в пробе присутствуют крупные песчаные или гравийные фракции ($D > 2\text{мм}$), необходимо просеивание образцов через сито. Отделённые крупные фракции учитываются в итоговом процентном распределении проб (рис. 3.7). К недостаткам метода можно отнести погрешности, связанные с единичными крупными частицами. Имея диаметр более 750 мкм, они могут попадать в область прохождения лазерного пучка, искажая результат измерения на 10-15%. Однако, в случае проведения большего количества (3-6) измерений погрешность значительно уменьшается.

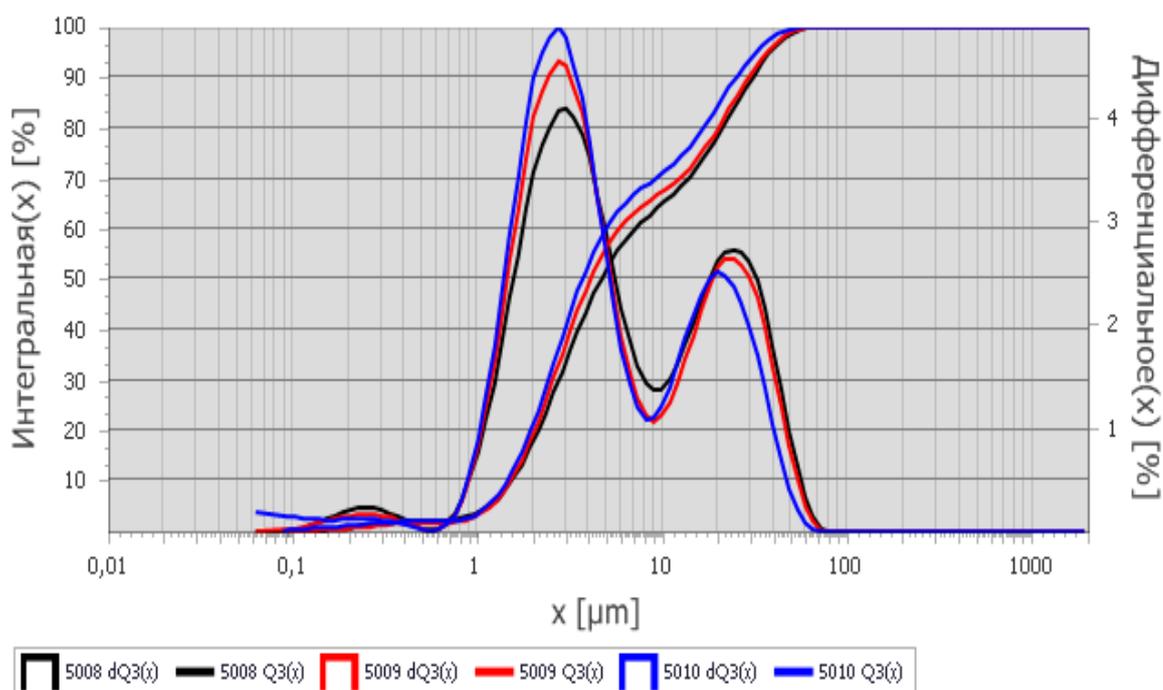


Рисунок 3.7. Пример полученного для р. Лена спектра концентраций фракций взвешенных наносов по данным трёх измерений.

Для полученных результатов измерения подбирается распределение по размерам, необходимое в рамках рассматриваемой задачи. Для изучения гранулометрического состава наносов в данной работе используется распределение в диапазоне 0,5-2000 мкм. Это распределение соответствует глинистой, илистой и мелко- и средне-песчаной фракции. Результатом определения становится процентное распределение доли каждой фракции от общего веса пробы.

Определение микроэлементного состава взвешенных наносов и растворенных форм выполнялось методом масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой и атомно-эмиссионным методом с индуктивно-связанной плазмой (ICP-MS; ICP-AS) (приборы: масс-спектрометр с индуктивно-связанной плазмой Elan-6100 ("PerkinElmer", США); атомно-эмиссионный с индуктивно-связанной плазмой спектрометр Optima-4300 DV ("Perkin-Elmer", США)) в лаборатории Аналитического отдела Федерального государственного унитарного предприятия «Всероссийский научно-исследовательский институт минерального сырья им. Н.М. Федоровского» [Карандашев и др. 2007; Лебедев, 2013] (табл. 3.3).

Определение содержания главных ионов выполняется методом капиллярного электрофореза. Анализ содержания кремния, валового и минерального фосфора производится спектрофотометрическим методом согласно [Лозовик, 2017]. Растворенный кремний определяется по методу Динерта-Ванденбульке (образование желтого кремнемолибденового комплекса). Относительная ошибка метода при концентрации кремния 1,0-1,5 мг/л – 2,5 %, при

концентрации свыше 4.0 мг/л может возрастать до 6 %. Концентрации фосфатов и валового фосфора определяются методом Морфи–Райли. Анализ соединений фосфора выполняется в фильтрованных и в нефилтрованных образцах. Суммарное количество минеральных и органических форм фосфора понимается под термином "общий" или "валовый". При определении общего фосфора проба окисляется персульфатом калия с последующим колориметрированием образовавшегося фосфорномолибденового комплекса. Минимальная определяемая концентрация 0.005 мгР/л. Точность определения при концентрации 0.06 мг/л составляет 1.5 %. Определение растворенного органического углерода и органического азота проводится методом высокотемпературного каталитического окисления на автоматическом анализаторе Liqui TOC [Лозовик, 2017].

Методы, применяемые при изучении химического состава наносов рек российской Арктики, представлены в табл. 3.3. При анализе химического состава воды и наносов выполнено 27389 элементопределений для всех 64 измеряемых показателей, однако в анализе были использованы только 20 химических элементов (глава V). 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; Luchagin et al., 2017]. Часть из этих поллютантов (металлы и металлоиды: As, Cd, Pb, Zn, Co, Ni, Cu, Sb, W, Mo, Cr) опасны для водопользования, поскольку относятся к I-II классам опасности [СанПин 2.1.4.1074-01], а также рассматриваются как приоритетные загрязнители пыли и почв [Касимов и др., 2022].

Для изучения гидролого-геохимической дифференциации потоков наносов и их химического состава применялся комплекс математико-статистических методов обработки информации и гидролого-геохимические коэффициенты.

Для анализа распределений гранулометрического состава взвешенных наносов был использован программный комплекс GRDISTAT V9.1, позволяющий получить статистическую информацию о распределении фракций наносов, а также выделить стандартные диаметры наносов 10%, 50%, 90% обеспеченности. С помощью данного комплекса были определены типы распределений спектров фракций гранулометрического состава наносов, а также выявлены фракции наносов, согласно шкале Уэнтворта [Wentworth, 1922].

Содержание ММ рассчитывалось как для растворённой (мкг/л), так и для взвешенной (мкг/г) форм транспорта. В представленном исследовании основное внимание уделено взвешенной форме транспорта, однако данные о растворённой форме необходимы при выделении преимущественной формы транспорта для каждого из элементов (D/S - анализ).

Методы химико-аналитических работ, задействованных в настоящем исследовании

Объект	Параметры	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
	Макро- и микроэлементы	ICP-MS, ICP-AES
Донные отложения и интегральные пробы наносов	Гранулометрический состав	Лазерная гранулометрия
	Металлы и металлоиды	ICP-MS, ICP-AES

Были рассмотрены кларки концентрации (K_k) (14) и кларки рассеивания (K_r) (15) химических элементов: концентрации ММ в составе взвешенных наносов сравнивалась с кларками верхней части земной коры [Rudnik, Gao 2003, Hu, Gao, 2009].

$$K_k = C_i / C_k, \quad (14)$$

$$K_r = C_k / C_i, \quad (15)$$

где K_k – кларк концентрации элемента, K_r – кларк рассеивания элемента, C_i - концентрация элемента в пробе, C_k – среднемировая концентрация элемента в верхней части земной коры. Граничным значением, выше которого элементы начинают концентрироваться, является $K_k > 2$. Рассеивание элементов происходит при $K_r < 0.5$. В связи с тем, что концентрации химических элементов в речной взвеси [Савенко, 2006] отличаются от кларков земной коры, также был посчитан коэффициент концентрирования (K_c) химических элементов во взвеси (16):

$$K_c = C_i / C_{взв}, \quad (16)$$

где K_c - коэффициент концентрирования элемента, C_i - концентрация элемента в пробе, $C_{взв}$ – среднемировая концентрация элемента в речной взвеси. Для рассматриваемых северных рек также были вычислены обобщённые коэффициенты концентрирования химических элементов:

$$TK_c = \sum(K_c > 1) - (n - 1), \quad (17)$$

где Kc - коэффициент концентрирования элемента, n – количество превышений $Kc > 1$.

Концентрационную функцию взвешенных наносов, можно оценить с помощью коэффициента обогащения (EF), показывающего отличие содержания микроэлемента в наносах от содержания микроэлемента в составе пород, слагающих бассейн, путем нормирования химического состава наносов на содержание опорного элемента, нейтрального к биохимическим процессам (Al, Sc) [Ollivier et al., 2011]. В данной работе за опорный элемент выбран скандий (Sc), характеризующийся малой растворимостью (подвижностью) в пресных водах континентальных водоемов. Коэффициенты обогащения EF наносов и горных пород рассчитаны согласно выражению (18):

$$EF = \frac{\frac{C_{xi}}{C_{Sc}}}{\frac{C_{xg}}{C_{Scg}}}, \quad (18)$$

где, C_{xi} – содержание химического элемента в объекте исследования; C_{Sc} – содержание скандия в объекте исследования, C_{xg} – содержание химического элемента в горной породе; C_{Scg} – содержание скандия в горной породе. Данный коэффициент можно считать репрезентативным для оценки загрязнения взвешенных наносов [Vlasov et al., 2020]. Нормирование поллютантов на основе данного коэффициента позволяет уменьшить влияние гранулометрического состава взвеси на результат и выявить интенсивность антропогенного воздействия. Согласно исследованиям [Sutherland, 2000], загрязнение можно ранжировать как: <2-минимальное, 2-5 – умеренное, 5-20 – высокое, 20-40- очень высокое, >40 – экстремальное.

Для характеристики неоднородности распределения микроэлементов в потоке, рассматривались соотношения концентраций микроэлементов, транспортируемых в составе взвешенных наносов в различных горизонтах. В качестве показателя был выбран коэффициент Kx , показывающий отношение между концентрациями элементов поверхностных ($C_{i surf}$) и придонных ($C_{i bot}$) горизонтах потока [Chalov et al., 2020] (19).

$$Kx = C_{i surf} / C_{i bot} \quad (19)$$

Коэффициент рассчитывался для каждого элемента на каждой вертикали в створе, а затем результаты для нескольких измерений в одну фазу водного режима осреднялись.

В данной работе проводилось определение величины DS (D , растворенная форма; S , взвешенная форма), т. е. распределение концентраций элемента Cx между нерастворенными (мкг/г, $PM > 0.45$) и растворенными формами (мкг/л, $PM < 0.45$) транспорта в общем потоке химических веществ (20):

$$DS = \frac{SSC * Cx_{(PM > 0.45)} * 10^{-3}}{(SSC * Cx_{(PM > 0.45)} * 10^{-3}) + Cx_{(PM < 0.45)}} (\%), \quad (20)$$

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

Таким образом, широкий спектр рассматриваемых параметров позволяет сделать вывод о временном и пространственном распределении наносов в разные фазы водного режима на всех рассматриваемых водных объектах.

При анализе фракций ловушек взвешенных наносов был рассчитан коэффициент интенсивности накопления ТММ во фракциях наносов (Dx):

$$Dx = \frac{C_f}{C_{tot}}, \quad (21)$$

где C_f – содержание элемента во фракции; C_{tot} – среднее содержание элемента в ловушке.

Корреляционный, кластерный, факторный анализы выполнялись в программе STATISTICA. Концентрации элементов и распределения фракций взвешенных наносов соответствуют логнормальному распределению, которое было оценено с помощью критерия Уилка-Шапиро при уровне значимости $p < 0.05$. Для оценки варибельности показателей применялся Т-критерий Вилкоксона, который позволял посчитать значимость различий между выборками концентраций элементов за разные сезоны. Сезонная и локальная изменчивость концентраций рассчитывались с помощью коэффициента вариации (Cv). При расчёте коэффициентов корреляции для характеристики уровня значимости ($p < 0.05$) использовался критерий r Спирмана. Для выявления ведущих факторов накопления ММ в составе интегральных проб наносов был использован анализ методом главных компонент (РСА). Информация о всех периодах пробоотбора была тщательно изучена на предмет наличия выбросов и сомнительных значений. В результате, часть проб из средних и придонных горизонтов р. Лена (2018 г. $n=4$) и Енисей (2019 г. $n=5$) не рассматривались в анализе в связи с избыточными концентрациями части ММ (превышение более чем в 100 раз). Вероятно, при пробоотборе были отобраны частицы донных отложений (Fe-Mn конкреции) или техногенной взвеси (металлическая стружка, частицы краски), которые остались на фильтрах при анализе с помощью метода ICP. Косвенно это подтверждает наличие в пробах пика концентраций фракций в диапазоне PM500-PM2000, что может свидетельствовать о наличии единичной крупной частицы взвеси.

3.4 Особенности применяемой методики измерений наносов

Представленная методика пробоотбора и обработки результатов способствует значительному уменьшению количества погрешностей, связанных с различиями концентрации химических веществ и взвешенных наносов в разных частях потока. Методика сравнивалась с существующими протоколами пробоотбора на реках. Для сравнения были выбраны протоколы пробоотбора и анализа крупных международных проектов: ArcticGRO [<https://arcticgreatrivers.org/>], BESTSiberian [istina.msu.ru/projects/414491904], а также Российские протоколы отбора проб взвешенных наносов и анализа их мутности и химического состава: РД 52.08.104-2002 «Методические указания. Мутность воды...»; РД 52.24.468-2005 «Взвешенные вещества и общее содержание примесей в водах...». В представленных руководствах по определению мутности воды пробы рекомендовано отбирать следующими способами: детальным (в пяти точках), основным (двухточечным), одноточечным и суммарным (интегральным). Лишь на постах I категории пробы наносов отбираются детальным способом с поверхностного, среднего и придонного горизонтов. При этом на крупных и средних реках часто применяется двухточечный или интегральный способ. В результате, значительная часть створа оказывается неосвещённой данными о концентрациях взвеси. Влияние локальных источников взвешенных наносов и ошибка в определении потока наносов может составить от 5% до 25%. Так, например, при рекогносцировочном обследовании р. Колыма, выше контрольного створа пгт Черский была выявлена значительная неоднородность концентраций взвешенных наносов по всей ширине створа. Слабо насыщенные наносами воды правых притоков р. Колыма (5-10 мг/л) на протяжении 50 км не смешиваются с мутными водами реки (50-70 мг/л). На глубине более 2 м по всей ширине створа значения мутности воды приблизительно одинаковые (45-50 мг/л) и незначительно увеличиваются ко дну (на 3-5 мг/л). При этом, поступающие в результате таяния мерзлоты потоки взвешенных наносов формируют дополнительный шлейф мутности у правого берега (до 100 мг/л). В случае применения стандартных протоколов определения мутности вод, данные свойства потока не будут учитываться, что может сильно ухудшить точность и воспроизводимость результатов (рис. 3.8). Также, при отборе проб менее чем на 2-3 вертикалях невозможно калибровать зависимости, получаемые с помощью ADCP для *VI*.

Протоколы, реализуемые в рамках проектов ArcticGRO, BESTSiberian [arcticgreatrivers.org; istina.msu.ru/projects/414491904] предполагают отбор проб исключительно с поверхностных горизонтов в одной или трёх точках. В случае отбора проб в одной точке возможно возникновение погрешностей, связанных с пульсациями мутности, ошибкой выбора репрезентативной точки и т.д. Пробоотбор в трёх точках на поверхности или в среднем горизонте более подробно характеризует пространственную изменчивость концентраций взвешенных наносов, однако, не характеризует придонные горизонты, в которых мутность увеличивается.

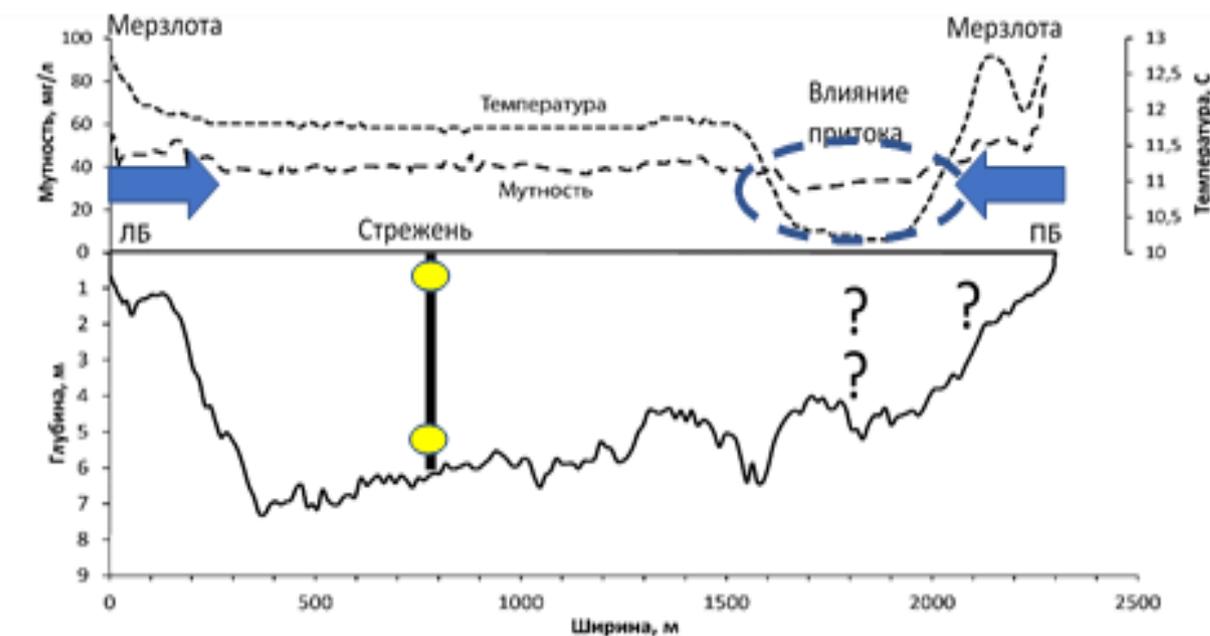


Рисунок 3.8. Схема распределения концентраций взвешенных частиц в поверхностном слое р. Колыма в створе Ермолово, выше контрольного створа пгт. Черский.

В рамках исследования были проведены расчёты отличий измерений средней концентрации химических элементов во взвешенных наносах и потока ММ при использовании одно-, трёх- и девятиточечного метода оценки потоков химических веществ. В качестве репрезентативных условий были выбраны период половодья (р. Енисей – июнь 2019 г.) и летняя межень (р. Колыма – август 2019 г.). Для каждого из створов был посчитан расход наносов девятиточечным методом (с использованием медианных концентраций мутности). Для р. Енисей – 2317 кг/с, для р. Колыма – 312 кг/с. Далее для каждого из створов были получены расходы наносов при учёте мутности только в трёх точках в поверхностном горизонте и в одной точке на стрельне потока. Для р. Енисей расход, измеренный в трёх точках, уменьшается на 38%, в одной точке - на 24%. по сравнению с девятиточечным методом. На р. Колыма, вследствие высокой мутности у левого берега, расход наносов, рассчитанный трёхточечным методом, оказался на 9% выше, чем девятиточечным, однако в случае использования информации только с стрельни потока, расход занижался на 20%. Расход наносов, посчитанный для рек по данным базы данных ArcticGRO [<https://arcticgreativers.org/>] (3 точки в поверхностном слое), также отличается на 20% и 18% соответственно. Для анализируемых ММ были рассчитаны потоки металлов, с учётом их концентраций, полученных для девяти, трёх и одной точек пробоотбора. В период половодья, из-за неоднородности распределения концентраций ММ в толще потока, могут наблюдаться как превышения, так и существенные снижения их величин. В период межени, в результате достаточно устойчивого увеличения концентраций металлов в составе

наносов в придонных слоях, потоки химических элементов, в поверхностных слоях занижены при измерении в одной точке и в 3 точках (рис. 3.9).

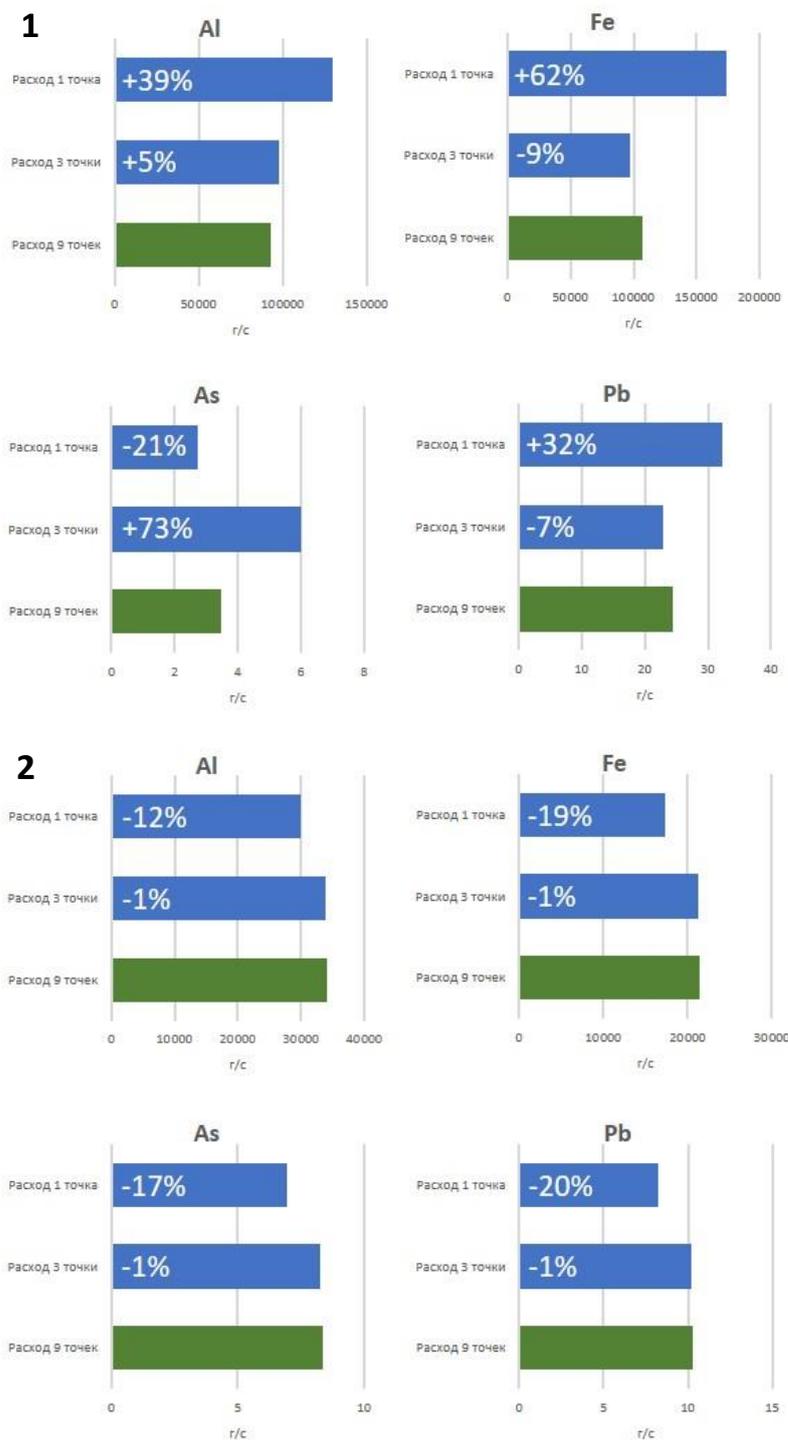


Рисунок 3.9. Потоки ТММ для замыкающих створов р. Енисей (1) и р. Колыма (2).

Ещё одной проблемой, влияющей на результате измерений потоков наносов, можно считать использование при исследованиях различных видов фильтров. Согласно РД 52.08.104-2002, для измерения мутности воды на постах УГМС используются среднефильтрующие беззольные фильтры диаметром 11 см с белой или желтой (№ 89) лентой, что соответствует

размеру пор 8-12 мкм. При таком диаметре пор часть взвеси может теряться при определении, поскольку она проходит транзитом через фильтры и тем самым не учитывается при определении мутности (диаметр частиц меньше диаметра пор «белой ленты» = 10 мкм) (рис. 3.10).

Для оценки влияния типа фильтров на результат измерений мутности воды автором были поставлены лабораторные эксперименты с пробами взвешенных наносов, отобранных в июле 2018 года в бассейне оз. Большой Вудъявр, Хибинский горный массив на р. Юкспорйок, руч. Гакмана и в дренажных каналах участков добычи апатит- нефелиновых руд. Для сравнения была взята методика пробоотбора РД 52.08.104-2002 (фильтр «белая лента», размер пор около 10 мкм) и методика, представленная в данном исследовании (целлюлозный мембранный фильтр 0.45 мкм). Проводилась фильтрация одной и той же пробы. Погрешность (P) фильтрации оценивалась как (22):

$$P = C_m - C_{бл}, \quad (22)$$

где C_m – мутность воды (мг/л) при определении пробы с помощью мембранного фильтра с диаметром пор 0.45 мкм; $C_{бл}$ – мутность воды (мг/л) при определении пробы с помощью бумажного фильтра «белая лента».

Было выявлено, что при увеличении мутности воды, соответствующем снижению среднего диаметра взвешенных наносов, погрешности определения мутности с помощью фильтра «белая лента» увеличиваются. При среднем диаметре ниже 60 мкм (в среднем мутность воды выше 40-70 мг/л), большая доля частиц, транзитом проходящих через бумажные фильтры с диаметром пор 10-12 мкм, приводит к погрешности определения мутности воды по протоколу РД 52.08.104-2002 и РД 52.24.468-2005 в несколько сотен процентов. При этом теряется наиболее химически активная фракция взвешенных наносов, в которой преимущественно протекают сорбционные процессы. Выявленные погрешности существенно влияют на оценку концентраций химических веществ. Как показано в работе [Ерина и др., 2022] именно тонкие фракции, пропускаемые бумажными фильтрами, определяют концентрирование во взвеси большинства химических элементов. Для устранения этой погрешности в данной работе использовались мембранные фильтры из нитрата и смеси эфиров целлюлозы с диаметром пор 0.45мм.

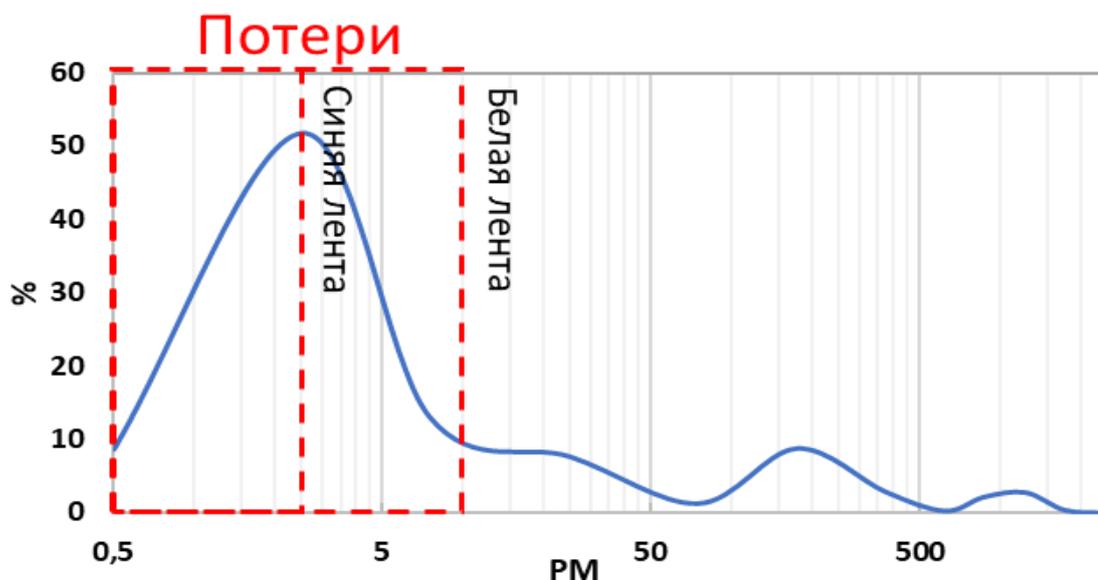


Рисунок 3.10. Часть фракций, теряемая при анализе гранулометрического состава с использованием фильтров «Белая лента», «Синяя лента».

Учёт особенностей отбора и определения проб на крупных равнинных реках, а также применение единой методики пробоотбора, анализа и обработки материала позволил получить уникальную базу данных гранулометрического и химического состава крупнейших рек российской Арктики. Информация, полученная для разных фаз водного режима, позволяет определить особенности стока наносов при различной водности, а детальный подход к изучению пространственного распределения наносов в створе — изменчивость потоков наносов в зависимости от влияния локальных факторов.

ГЛАВА 4. ГРАНУЛОМЕТРИЧЕСКИЙ СОСТАВ ВЗВЕШЕННЫХ НАНОСОВ КРУПНЕЙШИХ РЕК РОССИЙСКОЙ АРКТИКИ

4.1 Общие характеристики концентрации взвешенных наносов в замыкающих створах крупнейших рек российской Арктики

На реках Обь, Енисей Лена и Колыма были произведены 493 измерения концентраций взвешенных наносов. Отбор и фильтрование проб выполнялись, согласно разработанной методике комплексного гидролого-геохимического профиля в различные фазы водного режима. Мутность определялась одновременно как весовым, так и оптическим методом, что позволило сформировать региональные зависимости и получить представления о генезисе взвешенных наносов.

Для увеличения массива данных о концентрациях взвешенных наносов, определения весовой мутности дополнялись измерениями с помощью турбидиметра [Lewis, 1996; Gray, Gartner, 2009;]. В связи с большим количеством локальных факторов – наличия органического вещества, органических кислот, цветности воды, пузырьков воздуха и т.д., зависимости между величиной весовой мутности SSC и оптической мутностью T (НТУ) имеют региональный характер. При построении подобных зависимостей используется линейная аппроксимация между переменными (23):

$$SSC = a + \beta T, \quad (23)$$

где a и β – эмпирические параметры. Влияние диаметра взвешенных наносов [Gippel, 1995] и содержания разных фракций в составе взвешенных наносов [Lewis, 1996] на условия отражения света и величины T является причиной регионального характера связей. Наличие продолжительного ряда измерений в створах рек позволили получить их группировки в зависимости от состава взвешенных наносов (доли мелких частиц PM_{10}) и фазы ВР: точки водоотбора на р. Енисей и р. Обь, которым характерна меньшая средняя крупность взвеси, расположены в левой части на графике; большая доля крупных частиц взвеси р. Лена и Колыма приводят к группировке точек в правой части графика (рис. 4.1; 4.2). В общем случае при четком подборе рек-аналогов, в первую очередь по генезису взвеси и ее крупности, сходных геолого-геоморфологических факторов формирования наносов и режима хозяйственной деятельности, возможно использование типовых региональных зависимостей.

Зависимости между величинами обратного рассеивания (backscatter intensity), полученные с помощью ADCP и весовой мутностью SSC также имеют выраженную региональную специфику, однако, из-за малого количества измерений пока не могут считаться достоверными и требуют увеличения количества измерений. Зависимости имеют вид (24):

$$SSC = 10^{(0.1S_t(R)+K_T)} \quad (24)$$

где $S_t(R)$ - интенсивность полученного сигнала ADCP (дБ); K_T - параметры, зависящие от модели ADCP. Для рек Арктических бассейнов получена зависимость ($R^2=0.77$) с коэффициентом $K_T = 0.914$. Метод оценки потоков наносов с помощью учёта сигнала ADCP позволяет наиболее эффективно определять потоки химических веществ в створе.

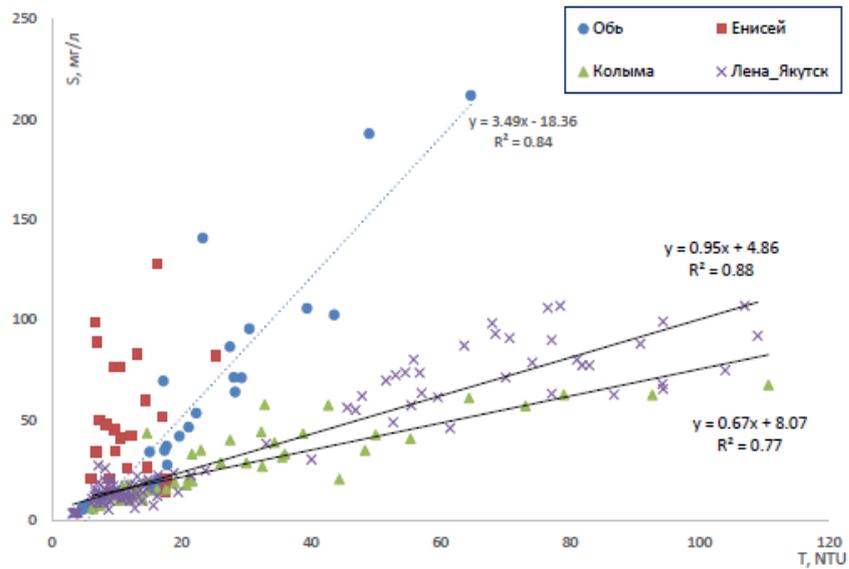


Рисунок 4.1. Зависимости между величинами весовой (SSC) и оптической (NTU) мутности для разных фаз водного режима крупнейших Сибирских рек [Чалов, 2021].

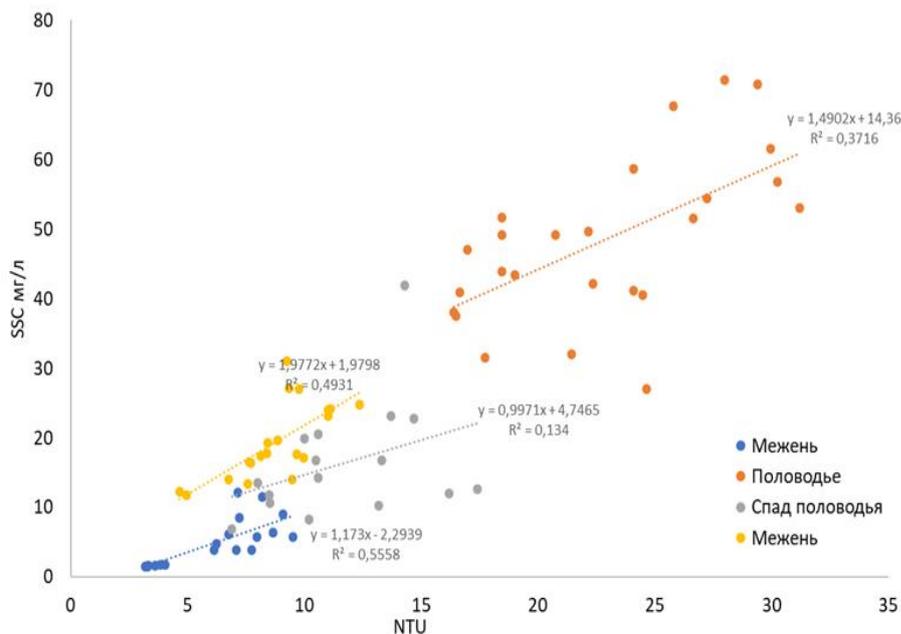


Рисунок 4.2. Зависимости между величинами весовой (SSC) и оптической (NTU) мутности для разных фаз водного режима р. Лена.

Для характеристики химического состава взвешенных наносов в первую очередь важны характеристики весовой мутности, поскольку она определяется параллельно с анализом гранулометрического и химического состава наносов. Результаты определения концентраций взвешенных наносов по сезонам (табл. 3.1) представлены на графиках 4.3-4.6. Полученные значения сравнивались с рядами мутности, полученными в ходе мониторинга участниками проекта ArcticGRO [<https://arcticgreatrivers.org/>] за период с 2002 по 2023гг.. Важно отметить, что в рамках проекта ArcticGRO мутность определялась интегрально по трём точкам измерений, тогда как распределения концентраций нашей базы данных представлены для каждой из 9 точек створа. Для всех рек значения рассчитанных средних концентраций взвешенных наносов близки к среднемноголетним, однако диапазон значений в период половодья и спада половодья для рек Обь, Енисей, Колыма существенно превышает диапазон колебаний мутности ArcticGRO. Именно здесь проявляются различия концентраций взвешенных наносов по всей ширине створа, достигающие 15-50 мг/л.

Максимальная изменчивость (C_v) концентраций в створе наблюдается для р. Колыма в периоды половодья ($C_v = 135\%$) и спада половодья ($C_v = 215\%$). В данном случае проявляется запаздывание прохождения пика мутности воды на р. Колыма, относительно пика расходов воды в связи с оттаиванием ММП на водосборе в середине июня-начале июля. Оно происходит неравномерно по бассейну, в результате чего в створе могут формироваться области с повышенным, относительно среднего и пониженным значением мутности. Максимальная изменчивость содержания взвешенных наносов в створе г/п Черский свойственна средним и придонным горизонтам ($C_v = 208\%$ и 128% соответственно).

Для более крупных рек влияние таяния ММП не столь значительно, максимальная изменчивость концентраций наблюдается на пике половодья: Обь (69%), Енисей (78%), Лена (94%). Для Оби неоднородность концентраций наблюдается по всему створу (110-140%), для р. Лена и р. Енисей – в поверхностном и среднем горизонтах (120-130% и 80-90%) соответственно. В меженьный период, из-за низких концентраций взвешенных наносов, изменчивость в створах крупных рек незначительна и не превышает 30%. Минимальный C_v наблюдается на Оби в период зимней межени – 6-9% во всех горизонтах.

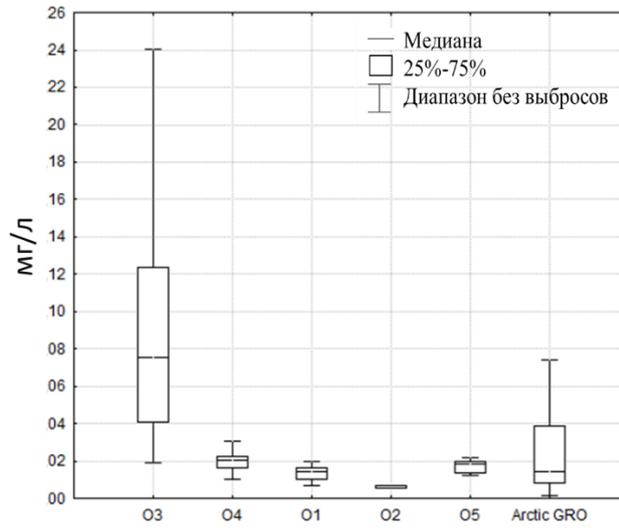


Рисунок 4.3. Диапазоны концентрации взвешенных наносов в р. Обь.

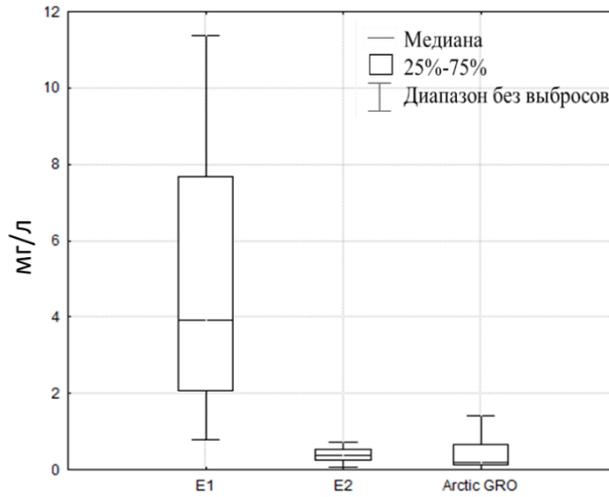


Рисунок 4.4. Диапазоны концентрации взвешенных наносов в р. Енисей.

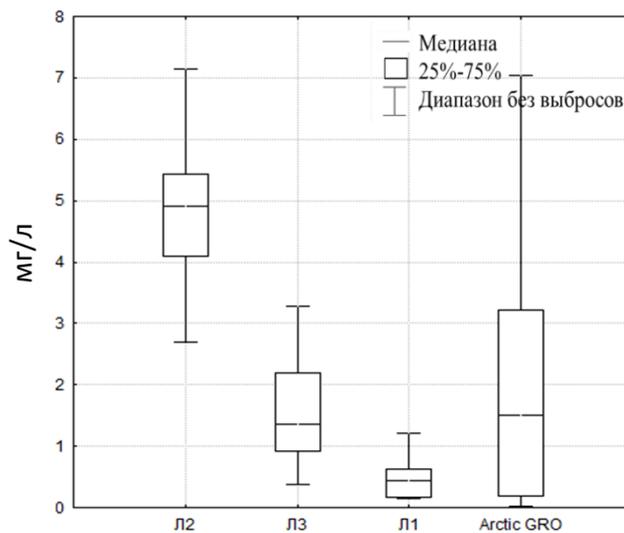


Рисунок 4.5. Диапазоны концентрации взвешенных наносов в р. Лена.

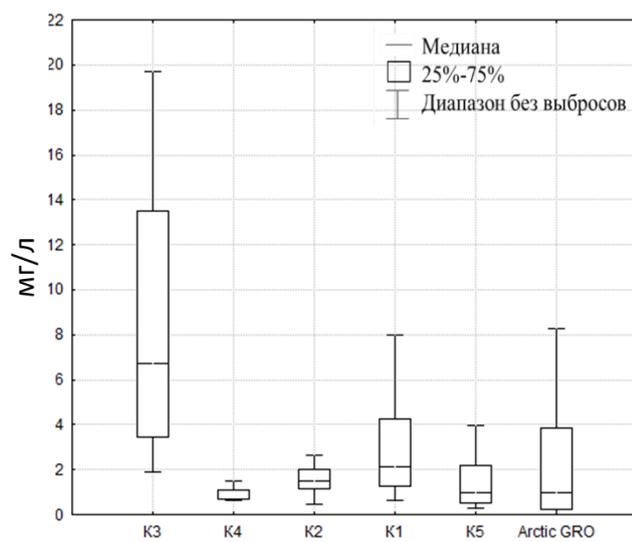


Рисунок 4.6. Диапазоны концентрации взвешенных наносов в р. Колыма.

4.2 Общие характеристики гранулометрического состава наносов в замыкающих створах крупнейших рек российской Арктики

Анализ гранулометрического состава наносов Арктических рек важен в контексте его значимой роли в дифференциации взвесей по химическому составу. Рассматривалась пространственная и временная неоднородность гранулометрического состава, а также распределение фракций в створе наблюдений. Для рек Арктических бассейнов также были проведены рекогносцировочные обследования участков выше и ниже по течению для уточнения локальных факторов формирования потока наносов.

Эрозионные процессы в бассейнах рек Обь, Енисей, Лена и Колыма играют важнейшую роль в формировании потока наносов. Бассейновая эрозия приводит к поступлению в реки частиц взвешенного вещества с $d_{cp} \leq 0.05$ мм [Алексеевский, 1998]. В верховьях рек её доля может достигать 85% от всего стока наносов [Эколого-географический..., 2019]. В нижнем течении крупных рек возрастает вклад русловых деформаций и эрозии берегов в поток наносов. Таким образом, доля частиц с величиной $d_{cp} \geq 0.05$ мм для северных рек возрастает, даже несмотря на то, что также подчиняется законам широтной зональности и возрастает с севера на юг. Определяющим фактором в данном случае будет являться размер реки. Доля бассейновых фракций при этом снижается благодаря аккумуляции в вышележащих участках речной системы (рис. 4.7). Согласно [Чалов, 2021] в Арктических системах только 2% продуктов бассейновой эрозии достигают устья.

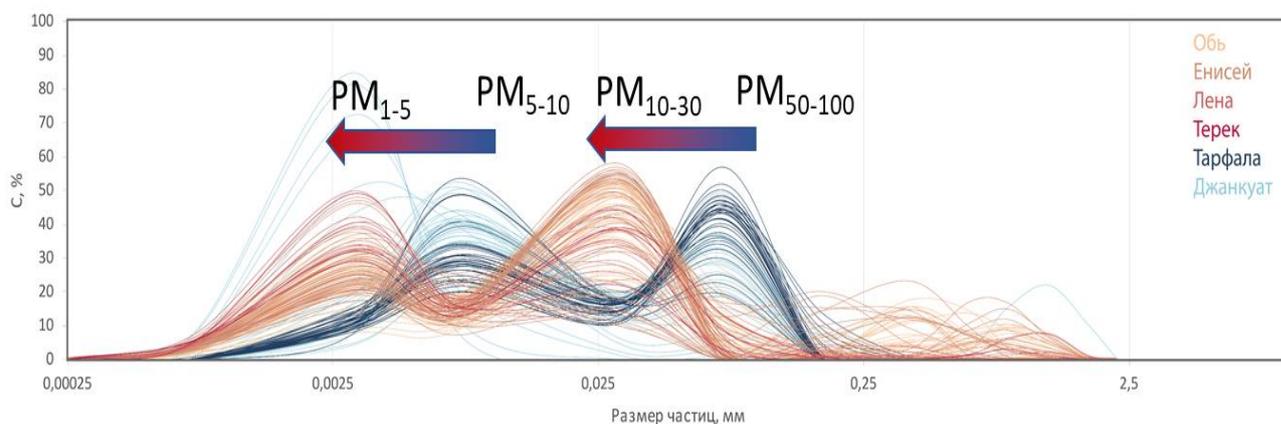


Рисунок 4.7. Изменение кривых распределений гранулометрического состава наносов от рек горных территорий с ледниковым режимом стока (верховья крупных рек) (р. Тарфала и р. Джанкуат) до нижнего течения крупных равнинных рек (Обь, Лена, Енисей и Терек).

Процесс уменьшения стока взвешенных наносов отмечается для крупных водохранилищ. В бассейнах рек Северного Ледовитого океана масштабный коэффициент удержания наносов водохранилищами составил около 29% [Чалов 2021]. При этом, для каждой из речных систем

вклад водохранилищ в общий сток наносов различается из-за размеров самого бассейна. Перехват потока наносов для рек Обь и Енисей составляет 90% и 83% от потенциально возможного потока наносов в речной сети и в значительной степени уменьшает долю бассейновой фракции наносов, поступающих из верховий рек. На р. Лена и Колыма расположено всего 3 крупных плотины (табл. 2.3). По сравнению с другими реками сток р. Колымы максимально зарегулирован. Усть-Среднеканская ГЭС расположена в 1677 км от морского края дельты. Однако, вклад термоэрозии и поступления взвешенных наносов с предприятий увеличивает долю мелких (≤ 0.05 мм) фракций наносов ниже водохранилищ.

Важным фактором, влияющим на гранулометрический состав наносов и их объём является антропогенное воздействие. Увеличение потока наносов связано с расположением в бассейне большого количества крупных горнодобывающих предприятий. Характерной особенностью рек бассейнов Лены и Колымы является наличие разработок россыпных месторождений полезных ископаемых, которые существенно увеличивают долю мелких фракций взвешенных наносов. В результате обработки породы на промприборах и поступления наносов с отвалов пустой породы в приёмный водоём попадают частицы взвеси с характерным диаметром PM5-PM70 (рис. 4.8). При мутности в районе разработок более 50-400 мг/л, мелкие фракции наносов могут поступать в более крупные речные системы, меняя распределение гранулометрического состава даже в устьевых областях (например, при поступлении взвешенных наносов по р. Малый Анюй с месторождений в районе г. Билибино). Также нужно отметить влияние сбросов сточных вод в районе крупных городов. Например, пробы из водовыпуска в районе г. Улан-Уде имеют мутность более 300 мг/л

Воздействие мерзлоты на сток наносов проявляется в виде фактора размыва термоэрозионных и термоабразионных берегов вдоль ледовых комплексов (так называемых едом) (рис 4.8).

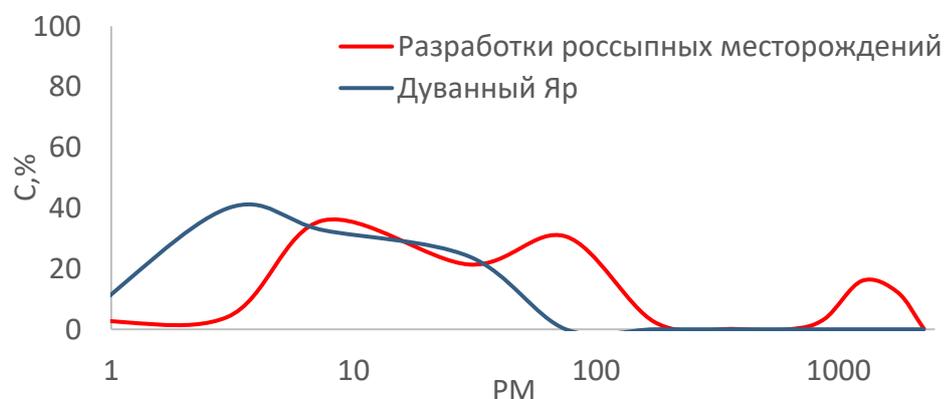


Рисунок 4.8. Средний гранулометрический состав потоков наносов, поступающих с ледового комплекса (Дуванный Яр), с промприборов и отвалов россыпного месторождения (р. Лангери, о. Сахалин).

Таким образом, на сток наносов в устьевых створах крупнейших Арктических рек влияет обширный комплекс факторов, степень воздействия каждого из которых определяется фазой водного режима.

Для характеристики гранулометрического состава Арктических рек было рассмотрено 449 проб наносов, отобранных в период с 2018 по 2021 гг. Из них 344 пробы были проанализированы непосредственно для замыкающих створов Арктических рек, а 105 для притоков и прочих источников поступления в районе устьевых створов. Средняя крупность наносов Арктических рек, составляет 0.04 мм. Вычисление d_{10} , d_{50} , d_{90} производилось автоматически с помощью программы GRDISTAT V9.1., [Blott, 2020], а затем проверялось графическим методом. В результате, для Арктических рек средние диаметры $d_{10} = 4$ мкм, $d_{50} = 27$ мкм, $d_{90} = 241$ мкм. Эти значения несколько ниже средних по России ($d_{cp} = 0,1$ мкм; $d_{50} = 61$ мкм) и в значительной степени связаны с размерами бассейнов и низким стоком наносов большую часть года.

Рассмотрение средних значений для каждого из бассейнов позволяют выделить общие закономерности, свойственные гранулометрическому составу каждой из рассматриваемых рек (табл. 4.1).

Во взвешенных наносах рек Обь и Енисей выше доля тонких фракций PM10, что проявляется в меньших значениях величины d_{10} и d_{50} для рек Обь и Енисей (рис. 4.9). Средний диаметр частиц d_{10} напрямую связан с поступлением материала бассейновой эрозии. На реках Лена и Колыма он больше вследствие меньшего антропогенного влияния (водохранилища задерживают крупные бассейновые фракции в верховьях) и большей доли взвешенных наносов, поступающих в результате термоабразии и представленных органическими веществами, а не крупными минеральными частицами (мелким песком). То же можно сказать и про частицы d_{50} , которые для рек Лена и Колыма представлены более крупной фракцией. На р. Обь возрастает неоднородность диаметра частиц d_{90} . Повышенные значения связаны с пробами, отобранными в период зимней межени, когда при очень низкой мутности (1-5 мг/л), значительную роль играет поступление единичных крупных частиц (PM500-1000), формирующей пик концентраций крупных фракций и увеличивающих средний диаметр частиц. Распределение d_{cp} показывает более крупный средний диаметр наносов р. Лена и р. Колыма. Максимальные значения крупности d_{cp} ; d_{10} ; d_{50} ; d_{90} для р. Лена, вероятно, связаны с большим содержанием крупной бассейновой фракции из-за активных русловых переформирований и поступления вод с разработок россыпных месторождений в бассейне р. Алдан. Указанные распределения не имеют чёткой зависимости от водности ($R^2 < 0.3$), что подтверждает их связь именно с генезисом частиц наносов.

Таблица 4.1

Таблица свойств гранулометрического состава наносов крупнейших рек российской Арктики в разные сезоны

Река	Сезон	<i>K_m</i>	Фаза ВР	Модальность	Бассейновая, %	Русловая, %	<i>SD</i> _{фр} , %	PM разд	<i>d</i> ₅₀ , мкм	<i>d</i> ₁₀ , мкм	<i>N</i> (число проб)	Мутность средняя, мг/л	$\pm SD$
Колыма	К3	5.2	Половодье	2	44	56	5.6	PM10-50	38	5.43	30	114	154
Колыма	К4	2.5	Спад половодья	2	46	54	6.3	PM10-51	28.57	5.46	18	33	72
Колыма	К5	2.1	Межень	2	57	43	3	PM10-52	12.98	5.17	18	24	34
Колыма	К2	2.5	Спад половодья	3	62	38	12	PM10-53	24.72	5.26	31	17	9
Колыма	К1	2.5	Межень	2	52	48	13	PM10-54	26.09	5.49	49	28	19
Енисей	Е1	4.5	Половодье	2	39.9	60.1	10.24	PM5-10	10.95	1.46	54	50	39
Енисей	Е2	0.9	Межень	2	33.8	66.2	6.51	PM5-10	13.79	1.66	19	4	3
Лена	Л2	3.9	Половодье	2	43.7	56.3	15.21	PM10-50	39.35	5.64	22	48	12
Лена	Л3	3	Спад половодья	2	26	74	4.57	PM10-50	63.08	7.66	29	19	17
Лена	Л1	1.3	Межень	2	49.5	50.6	7.89	PM10-50	23.65	5.53	9	5	3
Обь	О3	2.5	Спад половодья	2	49.8	50.2	7.27	PM5-10	13.15	1.84	24	90	62
Обь	О4	1	Межень летняя	2	42.9	57.1	2.97	PM5-10	15.31	1.93	18	17	35
Обь	О1	0.9	Межень осенняя	3	48.2	51.8	7.83	PM5-10	15.2	1.71	15	14	14
Обь	О2	0.5	Межень зимняя	3	39.1	60.9	13.54	PM5-10	20.43	2.7	8	7	1

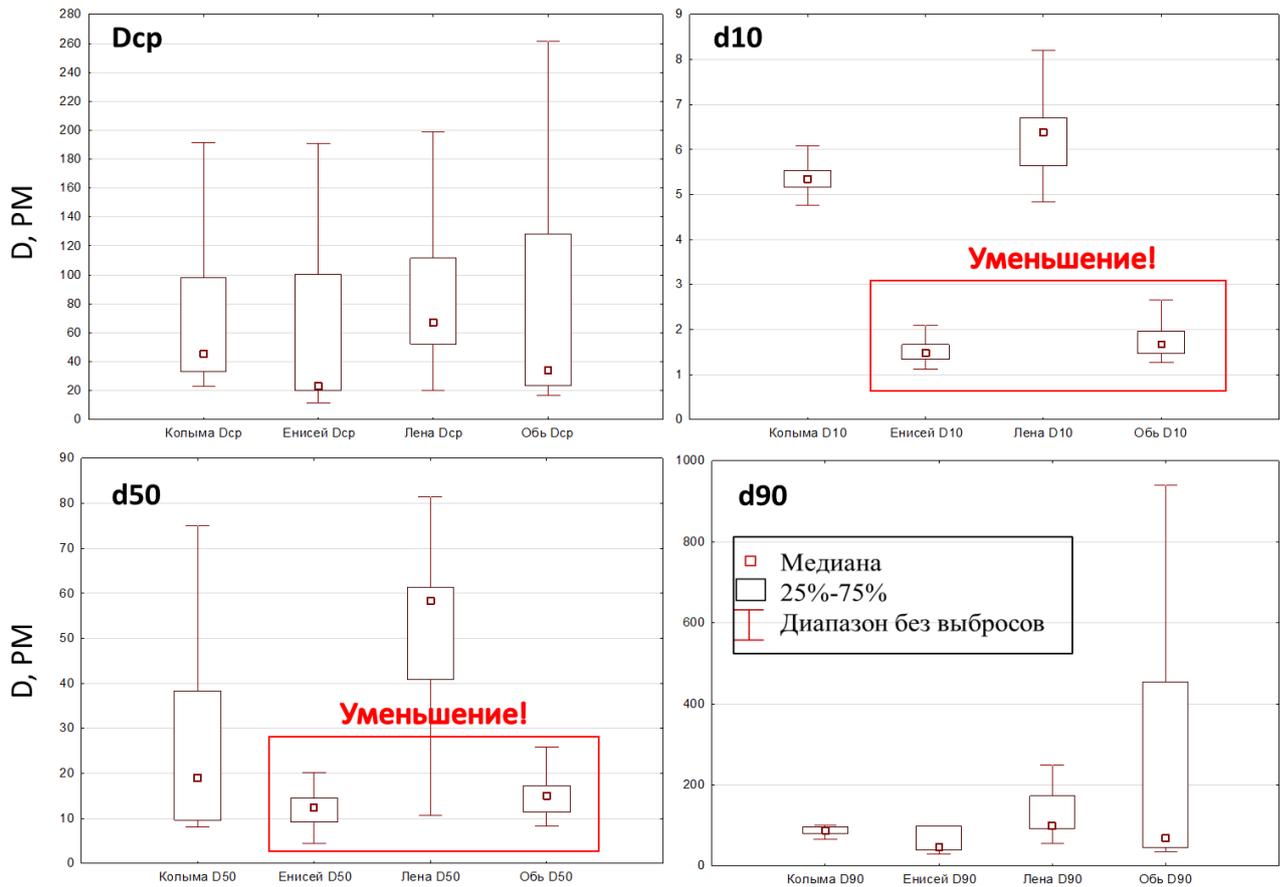


Рисунок 4.9. Распределение размеров d_{cp} ; d_{10} ; d_{50} ; d_{90} для каждой из рассматриваемых рек.

Средние графики распределения фракций гранулометрического состава для каждой из рек представлены на рисунке 4.10. Большинство кривых распределения незначительно (5-10%) отличаются от средних, однако в периоды пониженной водности для всех рек, а также повышенной водности для р. Енисей, отмечаются случайные увеличения концентраций фракций PM500-1500, что приводит к возникновению пика в правой части графика. Для анализа распределения концентраций в исследуемых реках была определена модальность каждой из проб. Определение выполнялось автоматически в программе GRDISTAT V9.1 (табл. 4.1). Состав взвешенных наносов нижнего течения крупнейших рек Российской Арктики характеризуется двухмодальным или трёхмодальным распределением (рис. 4.10). Трёхмодальное распределение наблюдается на р. Обь, р. Енисей и р. Колыма в периоды низкой водности, однако третий пик составляет не более 12%. Взвесь Оби и Енисея более мелкая: в основном представлена фракциями PM1-5 и PM10-50, формирующими пики на кривых гранулометрического состава. Незначительные пики (5-14%) отмечаются для фракций в диапазоне PM500-1000 в пробах, отобранных в периоды пониженной водности. Средний гранулометрический состав р. Лена и Колыма характеризуется наличием пиков концентрации фракций PM5-10 и PM50-100. Второй пик более выражен, чем первый, и составляет до 40-45% от общей концентрации наносов.

Модальность распределения гранулометрического состава обусловлена переносом более мелкой бассейновой и более крупной русловой фракции в составе наносов. Предложена методика определения доли русловой и бассейновой фракции, основанная на анализе граничного диаметра - минимуме функции распределения фракций между двумя пиками концентрации. При анализе всех имеющихся распределений ($n=344$), выполненном по единой методике установлено, что минимум функции для рр. Обь и Енисей находится в диапазоне РМ1-10, для рр. Лена и Колыма – РМ20-47. Единая шкала измерений крупности, применяемая для анализа гранулометрического состава имеет логарифмическое распределение, вследствие чего в качестве граничного диаметра были приняты средние значения 7.5 мкм и 30 мкм соответственно. Бассейновая составляющая стока взвешенных наносов в нижнем течении рек меняется от 34% (Енисей) до 62 % (Колыма). Для р. Колыма граничные значения – 30 мкм (в среднем, бассейновая фракция – 52%, русловая – 48%); для р. Енисей –7.5 мкм (в среднем, бассейновая фракция – 37 %, русловая – 63%); для р. Лена –30 мкм (в среднем, бассейновая фракция – 40 %, русловая – 60%); для р. Обь –7.5 мкм (в среднем, бассейновая фракция - 45 %, русловая - 55 %). В нижнем течении Арктических рек русловая составляющая является основной в формировании стока наносов. Особенности бассейна р. Колымы можно считать высокую долю бассейновой фракции во все рассматриваемые сезоны (при этом нет измерений в зимний период). В период открытого русла время происходит активное поступление бассейновой составляющей из ледового комплекса Дуванный Яр, расположенного всего в 115 км выше створа наблюдений. Характерное распределение фракций для мутьевых потоков, стекающих с Дуванного Яра представлено на рис. 4.8. Также в реку могут поступать мелкие фракции из бассейнов рр. Малый Анюй и Омолон. Пики концентраций взвешенных наносов в этих объектах приходится на диапазон РМ5-50, что соответствует значениям бассейновой фракции для р. Колыма и, из-за более низких объёмов стока Колымы по сравнению с остальными реками, могут оказывать существенное влияние на гранулометрический состав наносов. Характерно, что и массив, и притоки расположены с правого берега. В правой части замыкающего створа, фиксируются повышенные значения мутности и повышенная доля бассейновой фракции (до 67%) во время прохождения «чёрной воды».

В работе рассматривалась изменчивость гранулометрического состава в зависимости от фазы водного режима (рис. 4.11). Характерно отсутствие изменений в границе бассейновой и русловой фракции во все эти периоды.

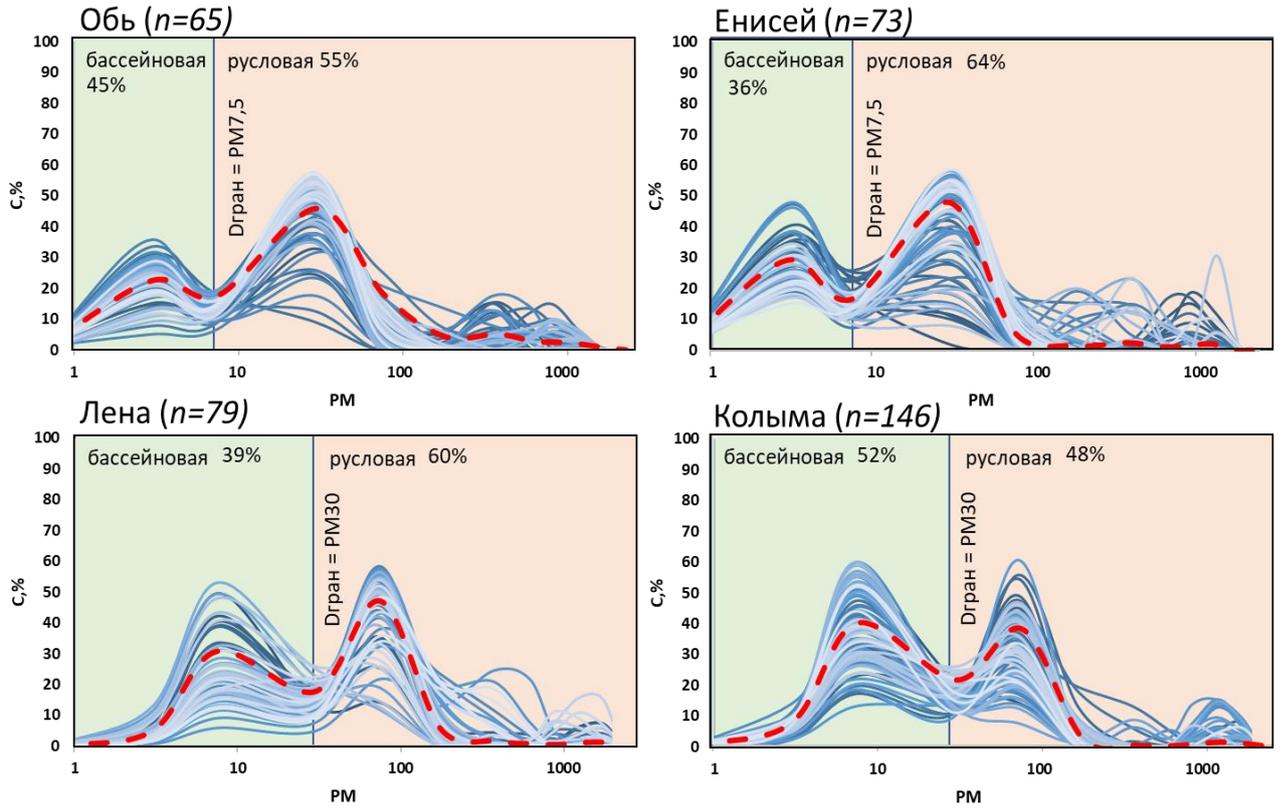


Рисунок 4.10. Распределения среднего гранулометрического состава (пунктирная линия) и границ бассейновой и русловой фракций для каждой из рассматриваемых рек.

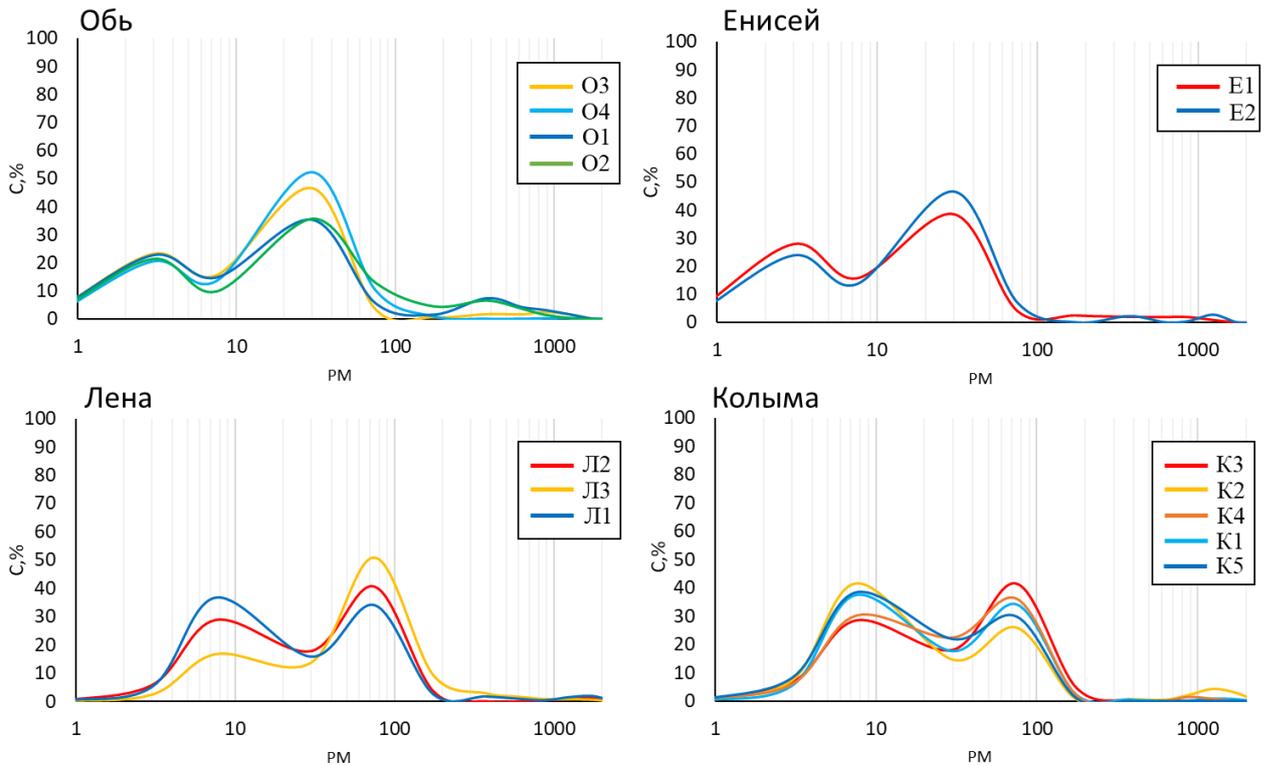


Рисунок 4.11. Осредненные кривые гранулометрического состава наносов в разные фазы водного режима для р. Обь (O3 – спад половодья ($n = 24$), O4 – летняя межень ($n = 18$), O1 – осенняя межень ($n = 15$), O2 – зимняя межень 2018 ($n = 8$)), р. Енисей (E1 – половодье ($n =$

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 ($n = 49$)).

Рассмотрение сезонной динамики следует начать с р. Обь, поскольку для неё есть информация по всем фазам водного режима. Сезонная динамика изменения среднего гранулометрического состава наносов р. Обь характеризуется постепенным уменьшением концентраций частиц взвеси размером РМ10-50 и возрастанием доли более крупных фракций (РМ500-750). В летнюю межень крупные фракции не фиксируются. При этом, концентрации фракций РМ1-10 наблюдается во все сезоны и практически не меняется при уменьшении мутности воды. Отдельно необходимо рассмотреть осенне-зимнюю межень 2018 года. В этот период произошло значительное увеличение доли фракций РМ>500. Вероятнее всего, подобные условия связаны наличием большого количества фитопланктона в водной толще, вследствие осеннего пика цветения воды (высокие температуры, солнечная погода) и малой мутности воды – 4-7 мг/л. В результате, вклад отдельных крупных органических частиц в распределение гранулометрического состава взвешенных наносов достаточно высок, что приводит к формированию пика концентраций. Доля бассейновой фракции наносов снижается с 49% в период половодья до 39% в период зимней межени, а d_{50} увеличивается с 15 мкм до 20 мкм.

Данные о гранулометрическом составе наносов р. Енисей представлены для сезона половодья 2019 г. и спада половодья 2021 г. Хотя, вследствие значительного перемешивания, концентрации взвешенных наносов крайне неоднородны по всему створу, они имеют схожий гранулометрический состав. В половодье отмечается повышенная доля бассейновых фракций 40%, которая снижается до 33%.

Для р. Лена в период половодья характерно значительное количество частиц взвешенных наносов РМ5-30, вероятно поступающих с водосбора. На спаде половодья начинает возрастать доля русловой фракции, достигая 74% вследствие прохождения русловых переформирований при высоких расходах воды. d_{50} возрастает до 63 мкм, а затем в меженный период уменьшается до 23 мкм. В межень 2018гг в верхней части бассейна р. Лена, выше створа измерений, выпадали осадки, что провоцировало поступление мелких фракций РМ1-10 в русло реки с водами притоков. Из-за этого возрастает доля бассейновой фракции (до 49%). Также к одной из причин можно отнести интенсификацию добычи полезных ископаемых в середине-конце лета [Chalov, 2014].

В водах р. Колыма распределение фракций наносов в половодье напоминает р. Лена из-за относительно схожих условий таяния снега на водосборе. Однако, на спаде половодья и в межень наблюдается сильное увеличение доли бассейновой фракции до 60-70%. В это время

температуры воздуха максимальны, что приводит к интенсификации таянья мерзлоты. Активизируются и разработки полезных ископаемых. Разброс концентраций наносов в меженный период также максимален и составляет 1.64-2.39 мг/л. В меженный период на р. Колыма отмечался сброс вод с водохранилища Усть-Среднеканской ГЭС. При кратковременных подъемах воды интенсифицируются процессы размыва берегов и аккумулятивных зон выше створа пгт Черский, что приводит к возрастанию доли русловой фракции (PM50-100). В 2019г. доля русловой фракции при таких подъёмах достигала 74% (1.08.2019). Крупные частицы взвеси – PM>1000 выражены крайне слабо (до 4.3% в р. Колыма во время спада половодья).

При анализе распределений гранулометрического состава наносов была рассмотрена пространственная неоднородность в створе. Для каждого из сезонов выполнялось осреднение ГС для каждой из точек отбора проб на вертикалях, а также рассчитывались средние концентрации взвешенных наносов на станциях. В результате, были получены характерные изменения распределения химического состава для каждой из рек в различные фазы водного режима.

Для р. Енисей в период половодья концентрация взвешенных наносов изменялась в пределах 2 до 50 мг/л. Максимальная глубина реки, измеренная в период экспедиции составила более 42м, а расход воды 90002 м³/с. В результате, на вертикали у левого берега и на стрежне потока не удалось отобрать пробу воды из придонного горизонта, поскольку шланг пробоотборника был ограничен длиной в 24м. В придонных слоях на вертикали у правого берега отмечались значения мутности до 250 мг/л. Распределение взвешенных наносов в створе крайне неоднородное, закономерное увеличение концентраций ко дну не прослеживается. Результаты анализа ГС на вертикалях у ЛБ и на стрежне потока показывают, что он имеет двуимодальную форму, характерную для периодов повышенной водности. При этом, во всех горизонтах форма распределения практически не изменяется. Проба у правого берега реки отобрана на мелководье. Здесь, происходит размыв донных отложений, а также поступление материала из протоки, в результате чего концентрации фракций PM5-7 достигают 20-30%, а пик концентраций PM25-50 менее выражен. Также, для придонного слоя данной вертикали получено несколько ($n=6$) распределений, характеризующихся наличием фракции PM250-500, что свидетельствует о транспорте более крупных частиц и размыве донных отложений. В меженный период концентрации взвешенных наносов составляют 1-10 мг/л (рис. 4.12).

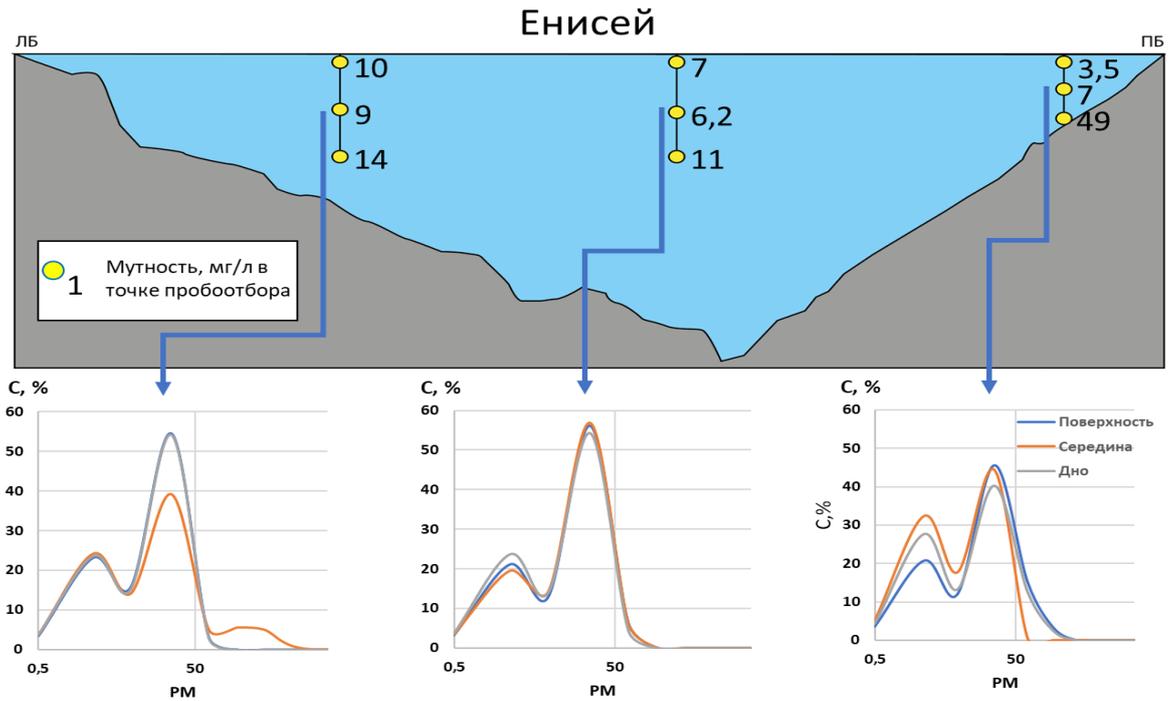


Рисунок 4.12. Распределение концентраций взвешенных наносов и их гранулометрического состава в створе г/п Игарка р. Енисей (13.07.2021).

Река Колыма в районе створа пгт. Черский имеет среднюю глубину 5,2м, а также участки искусственно прорытых прорезей судовых ходов глубиной до 12м. В связи со значительной шириной створа, а также из-за впадения в 1 км выше по течению р. Пантелеиха ($Q=120 \text{ м}^3/\text{с}$), в 2019г. было принято решение назначить 4 репрезентативных вертикали (рис. 4.13), которые затем были сокращены до трёх. Средняя мутность в створе, за период наблюдений не превышала 27 мг/л, однако в период прохождения паводка фиксировались концентрации более 75-80 мг/л. р. Колыма в створе пгт Черский имеет 2 чётко выраженные зоны с различными характеристиками гранулометрического состава. У левого берега прослеживается поступление материала из большого количества небольших проток (15-20 мг/л), дренирующих пойменные и термокарстовые озёра Нижнеколымской низменности, у правого берега – влияние крупных притоков – р. Омолон, Анжуй и Пантелеиха, мутность в которых не превышает 3-6 мг/л. В придонных слоях также фиксируются процессы переноса значительных объёмов взвешенных наносов в русловых прорезях (до 50 мг/л). В результате, мутность в створе может различаться на 50-60 мг/л у разных берегов. Гранулометрический состав наносов у левого берега представлен повышенным содержанием фракций PM5-75, а также PM750 (до 8%) в придонном слое. На вертикалях у правого берега значительно возрастает доля фракции PM10-50, а крупные фракции практически не представлены. Это связано с разбавлением и постепенным перемешиванием шлейфа мутности вод, поступающих с едомы. Более крупные фракции осаждаются выше по течению, тогда как фракции PM1-10 и меньше транзитом проходят в створе пгт Черский.

В период половодья и спада половодья во всех точках пробоотбора возрастает содержание фракций PM1-10 и PM10-25, вследствие поступления материала с водосбора.

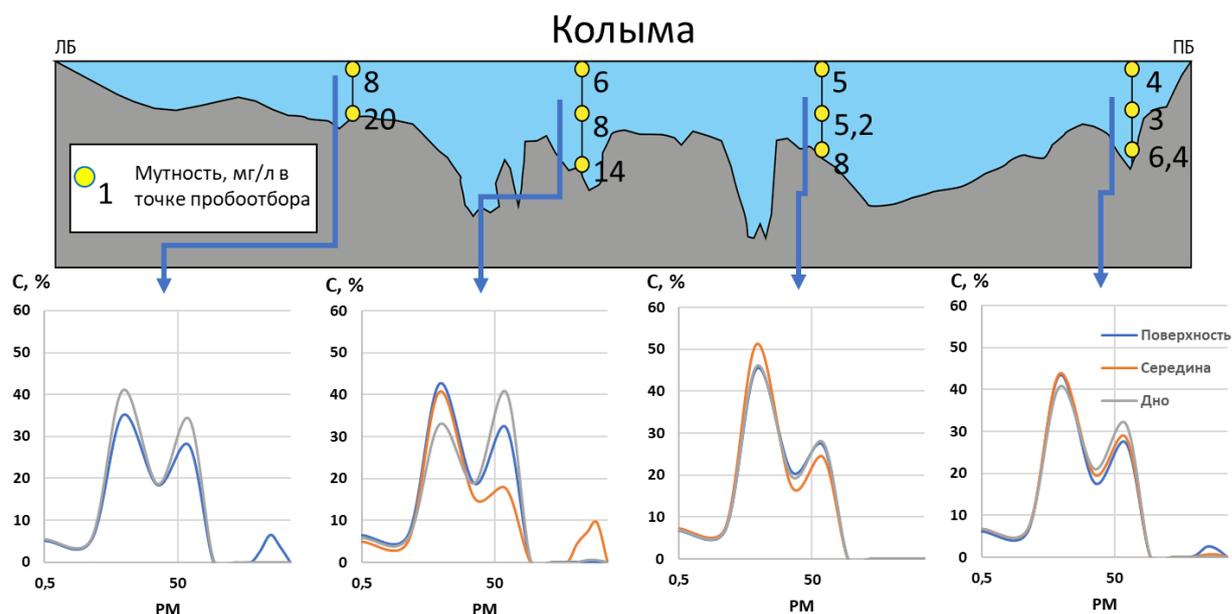


Рисунок 4.13. Распределение концентраций взвешенных наносов и их гранулометрического состава в створе пгт Черский р. Колыма (06.08.2019).

Створ р. Обь в районе г. Салехард имеет максимальную глубину 22м и среднюю глубину 14м. Выше по течению в Обь впадает р. Полуй, на которой находится порт г. Салехард, что может приводить к поступлению в поверхностные горизонты у правого берега взвешенных частиц техногенного генезиса. В целом, наиболее характерные изменения гранулометрического состава взвешенных наносов наблюдаются в меженный период (рис. 4.14). Мутность воды крайне мала и составляет 10-15 мг/л. В створе наблюдается большое количество фитопланктона и частиц детрита, которые могут вносить погрешность в результаты анализа. Вероятно, именно с большим количеством частиц органического происхождения связано трёхмодальное распределение гранулометрического состава взвешенных наносов и пик концентраций в области PM250-500 в поверхностных горизонтах в осенний и зимний периоды. В среднем и придонном горизонтах у левого берега и на стрежне наблюдается стандартное для летне-осенней межени распределение фракций. У правого берега, вследствие влияния р. Полуй увеличивается концентрация PM<5, а также отмечаются песчаные фракции PM250-500 в придонном слое. Для створа р. Обь были выполнены измерения мутности в зимний период (рис.4.15). Концентрации наносов составили 5-7 мг/л. При этом, при анализе ГС отмечается трёхмодальное распределение фракций и существенный рост концентраций мелких песчаных фракций. Высокая доля песчаных фракций объясняется увеличением значимости единичных крупных частиц в пробе. При низкой мутности даже несколько единичных крупных частиц в пробе способствуют значительному (на 15-20%)

увеличению доли крупной фракции (500 мкм). Также, можно отметить, что в связи с уменьшением поступления материала с водосбора, а также уменьшением интенсивности эрозии берегов, в зимний период снижается доля фракций PM1-30.

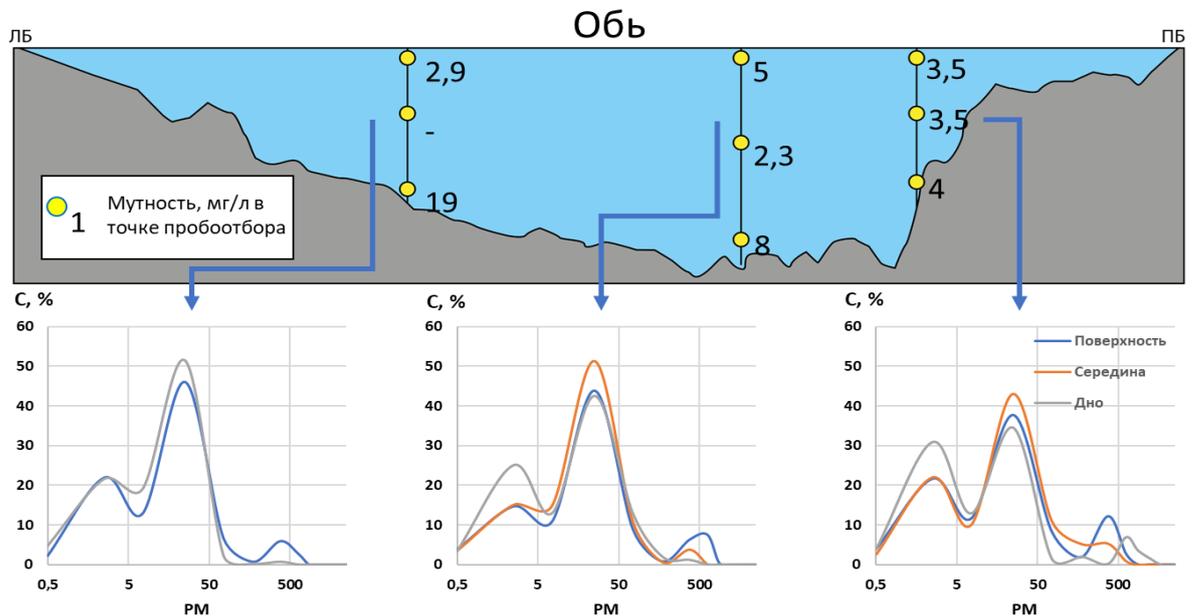


Рисунок 4.14. Распределение концентраций взвешенных наносов и их гранулометрического состава в створе г/п Салехард, р. Обь (22.09.2018).

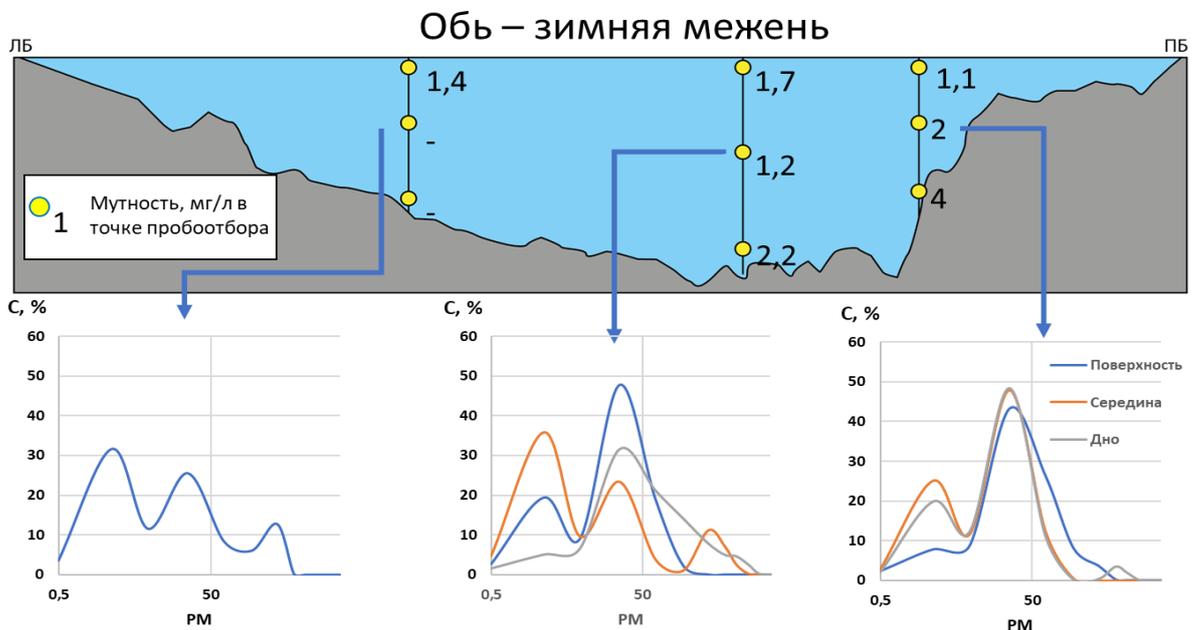


Рисунок 4.15. Распределение концентраций взвешенных наносов и их гранулометрического состава в створе г/п Салехард, р. Обь (25.11.2018).

Для р. Лена вертикальное распределение фракций наносов было измерено на нескольких створах. В результате, оно отличается для разных фаз водного режима. В целом, можно выделить увеличение доли русловой фракции наносов на 10-40% за счёт роста доли фракций PM50-100 и

PM>500. Наиболее сильно значения русловой фракции возрастают в протоках и на вертикалях около берегов, согласуясь с увеличением мутности воды на 1-3 мг/л.

Рассматривая распределение анализируемых проб по фракционному составу (рис. 4.16), по полученным в программе GRDISTAT V9.1 [Wentworth, 1922] диаграммам соотношения песка, ила и глины можно выделить 4 основных типа распределений гранулометрического состава. Для р. Обь – очень крупный ил и очень мелкий песок с примесями мелкого гравия. Для р. Енисей – средний ил с примесями очень мелкого песка и очень мелкого гравия. Для р. Лена – очень крупный ил и очень мелкий песок с примесями мелкого гравия. Для р. Колыма – очень мелкий песок и очень крупный ил (табл. 4.2).

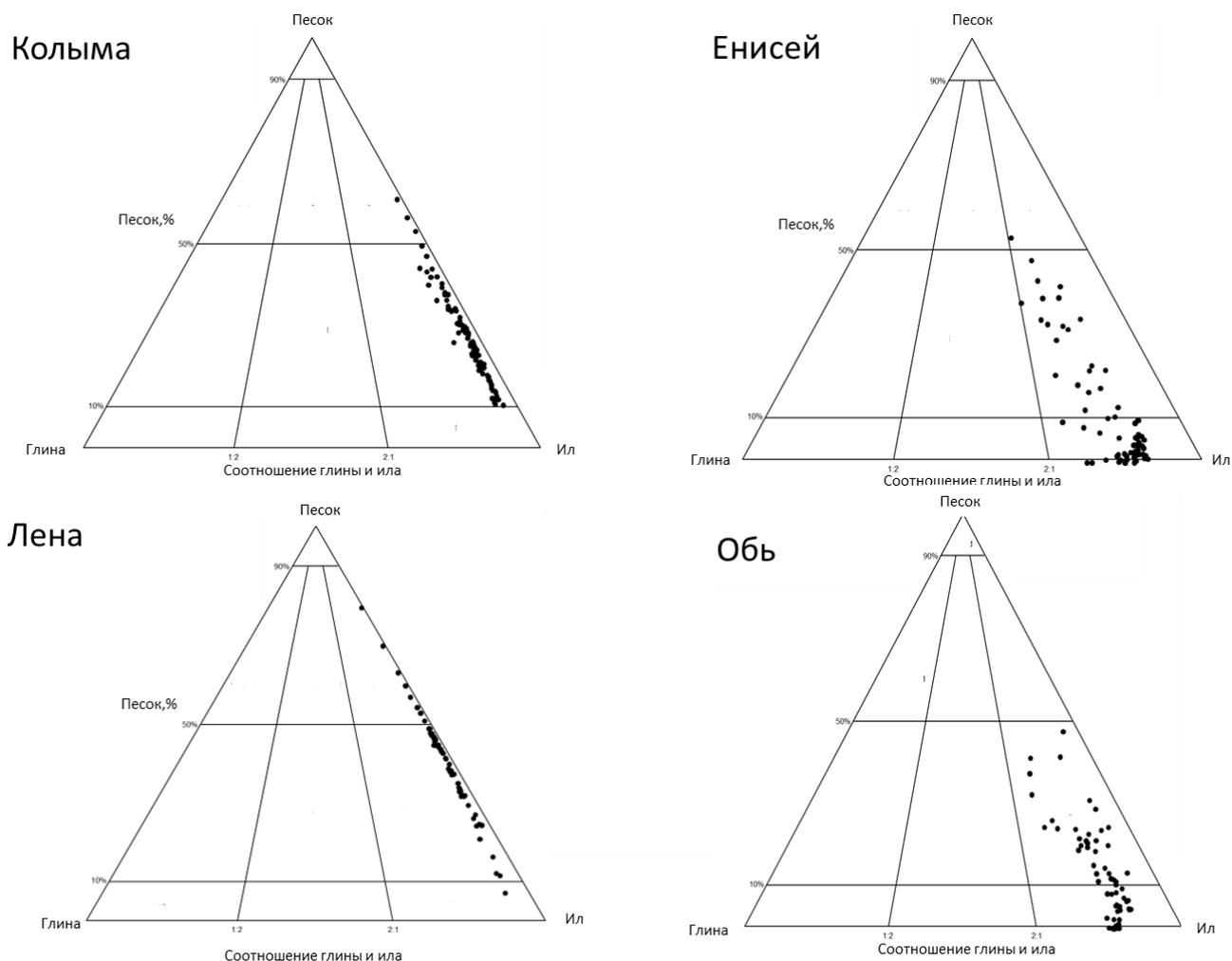


Рисунок 4.16. Диаграмма соотношения долей песка, ила и глины для всех проб, отобранных в рассматриваемых бассейнах.

Для характеристики степени схожести распределений гранулометрического состава за каждый из сезонов был выполнен кластерный анализ (иерархическая классификация, метод полной связи, $p < 0.05$). Распределения грансостава для р. Обь и Енисей подобны ($R^2 = 0.97-0.99$). В одну группу выделяются и р. Лена, и Колыма ($R^2 = 0.75-0.99$) (рис. 4.17). При этом,

трёхмодальные распределения в периоды осенне-зимней межени р. Обь и половодья р. Енисей формируют отдельную ассоциацию внутри первой группы ($R^2=0.98$).

Таблица 4.2

Распределение фракций наносов, полученных по результатам анализа рис. 4.16

	Гравий, %	Песок, %	Ил, %	Глина, %
Обь (О1)	0.05	31	67	2.31
Обь (О2)	0.01	37	61	1.97
Обь (О3)	0.05	21	77	2.28
Обь (О4)	0.04	22	77	1.51
Енисей (Е1)	0.02	21	76	2.83
Енисей (Е2)	0.03	22	76	2.13
Лена (Л3)	1.10	45	54	0.000
Лена (Л2)	0.35	69	30	0.005
Лена (Л1)	0.65	50	49	0.004
Колыма (К3)	0.41	43	57	0.004
Колыма (К2+К4)	1.47	38	60	0.09
Колыма (К1+К5)	0.11	35	64	1.25

Для выявления группировок измерений гранулометрического состава по сходному распределению фракций взвешенных наносов был выполнен дискриминантный анализ в программе Statistica 10. Для проведения дискриминантного анализа выбирались группирующие переменные – сезоны и зависимые, характеризующие доли 12 фракций гранулометрического состава взвешенных наносов. На основе стандартного метода выбора переменных с помощью критерия Уилкса (W) определялся процент верной классификации, проверялся уровень значимости F -критерия ($p < 0,05$) и вычислялись канонические корни – выражения, каждое из которых объясняет уникальную долю изменчивости между двумя наборами переменных [Халафян, 2007]. Рассматривались группировки, имеющие хорошую или среднюю степень дискриминации ($0,2 < W < 0,6$). По двум наиболее значимым каноническим корням, определяющим максимальные доли дискриминирующей мощности, строились графики распределения канонических значений переменных.

Результаты дискриминантного анализа характеризуют различие состава взвешенных наносов рек (рис. 4.18). Выделены 3 сходных по распределению ГС группы проб. К группе 1 преимущественно относятся измерения, выполненные на спаде половодья и в межень для реки Колыма и в межень для реки Лена. Вторая группа образована измерениями, выполненными для р.еках Обь и Енисей. Для этой группы характерен более мелкий диаметр взвешенных наносов и меньшая доля бассейновой фракции. Величины пиков концентраций могут различаться. В группу 3 отнесены пробы рек Колыма и Лена, отобранные в половодье, и р. Лена, отобранные на спаде половодья. Для них характерен повышенный пик концентрации фракций PM50-100 и двухмодальное распределение.

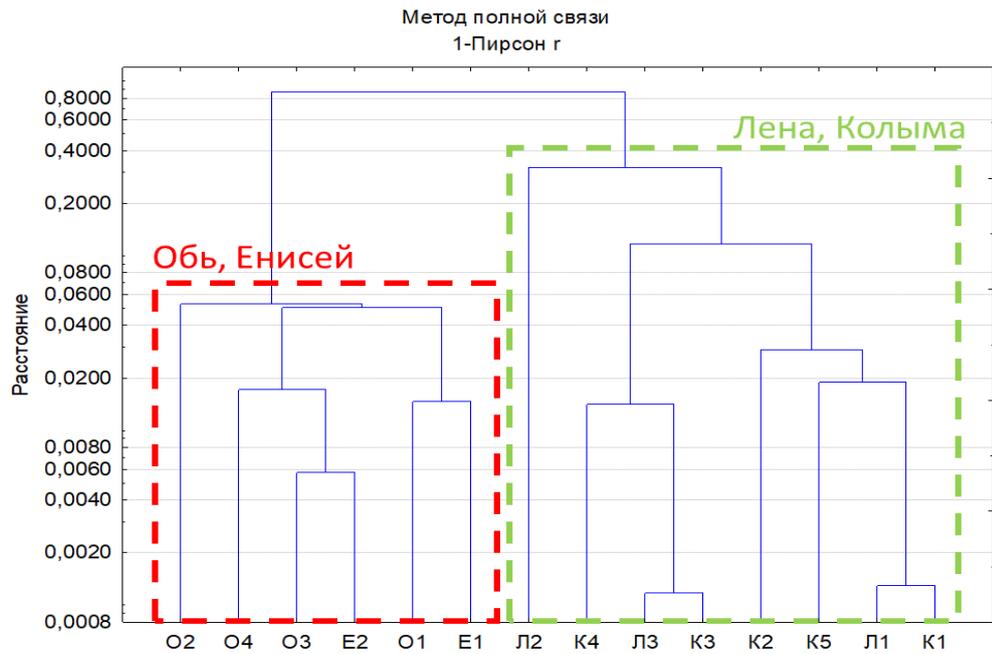


Рисунок 4.17. Группы измерений по сезонам, выделенные в группировки, согласно результатам кластерного анализа.

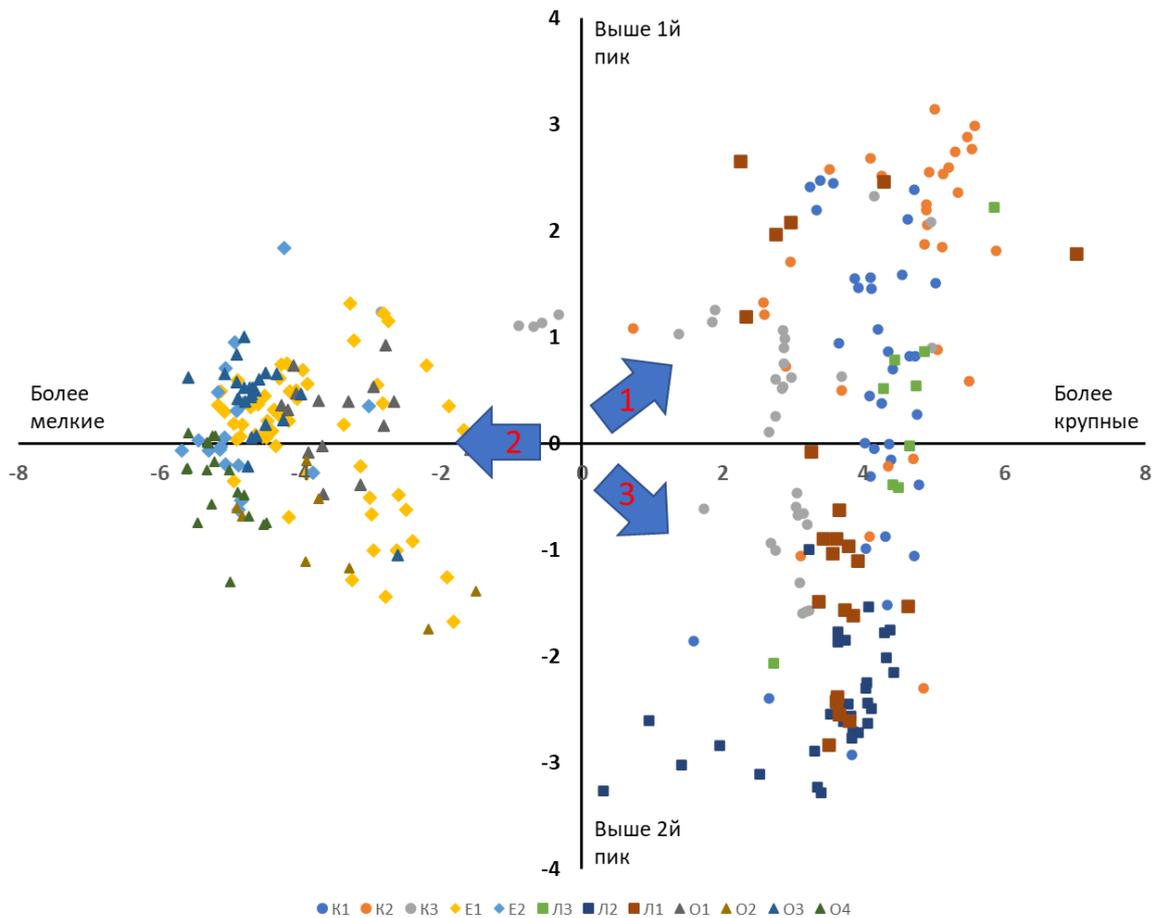


Рисунок 4.18. Совокупность количественных характеристик (диаграмма рассеяния канонических значений) гранулометрического состава наносов Арктических рек в разные фазы водного режима. (обозначения в тексте).

ГЛАВА 5. ОЦЕНКА СОДЕРЖАНИЯ МЕТАЛЛОВ И МЕТАЛЛОИДОВ ВО ВЗВЕШЕННЫХ НАНОСАХ КРУПНЕЙШИХ РЕК РОССИЙСКОЙ АРКТИКИ

5.1 Гидрохимические условия транспорта металлов и металлоидов в реках

Химический состав природных вод исследуемых бассейнов рассматривается в данной работе в качестве характеристики среды, в которой происходит миграция ММ в составе взвешенных наносов. Природные воды рассматриваемых рек в меженные периоды характеризуются гидрокарбонатно - кальциевым, а в половодье и паводочные периоды, смешанным типом химического состава [Алёкин, 1964]

Средние величины рН в воде рек составляют: р. Обь – 7.2, р. Енисей – 7.5, р. Лена – 8, р. Колыма – 7; электропроводности: р. Обь – 188 мкСм/см; р. Енисей – 153 мкСм/см; р. Лена – 179 мкСм/см; р. Колыма – 118 мкСм/см. Сезонная изменчивость показателей представлена в таблице 5.1. Характеристика рН меняется в зависимости от фазы водного режима, ее относительно повышенные значения отмечаются в периоды спада половодья и летней межени, тогда как в период зимней межени наблюдается уменьшение значений до 6.7-6.8 (р.Обь). Электропроводность воды низкая и изменяется в зависимости от преобладающего источника питания реки в течении фазы водного режима. Максимальные значения отмечаются в период летне-осенней (все реки) и зимней (р. Обь) межени, когда начинает преобладать грунтовое питание рек.

В распределении величины рН внутри поперечного створа рек чётких закономерностей выявлено не было. Даже летом, в период активного развития фитопланктона, заметных изменений величины рН на репрезентативных вертикалях не прослеживалось. Электропроводность преимущественно увеличивается от поверхности ко дну, за исключением периодов повышенной водности, когда распределение имеет случайный характер. Электропроводность и мутность воды имеют коэффициент корреляции $R^2=0.38-0.69$. Наиболее тесная связь характерна для вод р. Колыма в период межени ($R^2=0.67$). Также, в створах на характеристики электропроводности влияет местоположение вертикали. Так, в воде р. Колымы электропроводность на вертикалях в правой части створа пгт. Черский на 50-80 мкСм/см выше, чем в его левой части вследствие впадения более минерализованных (270-360 мкСм/см) правых притоков реки.

Характеристики рН и электропроводности воды исследуемых рек для разных фаз водного режима ($n=354$)

Год	Река	Фаза водного режима	рН	σ, мкСм/см
2018	Обь	Межень	6.8-7.1	194±54
2018	Обь	Зимняя межень	7.5-7.2	210±28
2019	Обь	Спад половодья	7.3-7.5	149±17
2020	Обь	Межень	7.1-7.3	187±18
2021	Обь	Зимняя межень	6.7-7.1	200±16
2019	Енисей	Половодье	7.1-7.3	142±21
2021	Енисей	Межень	7.6-7.9	164±21
2018	Лена	Межень	7.5-7.8	202±23
2019	Лена	Спад половодья	7.2-7.6	162±217
2020	Лена	Межень	7.1-7.8	174±235
2019	Колыма	Межень	7.4-8.6	148±27
2020	Колыма	Спад половодья	7.7-8.1	110±30
2021	Колыма	Половодье	6.4-7.6	77±21
2021	Колыма	Спад половодья	7.1-7.6	120±18
2021	Колыма	Межень	7.3-8.25	137±29

Средние медианные концентрации соединений фосфора уменьшаются в восточном направлении (рис. 5.1), что обусловлено снижением скорости биологического круговорота, определяющего трансформацию соединений фосфора. Наиболее контрастное сезонное распределение характерно для р. Оби и, возможно, связано с большим антропогенным воздействием. Для всех рассматриваемых рек, кроме Оби, характерно превышение взвешенной органической формы над взвешенной минеральной. В Оби больше доля взвешенного минерального фосфора, содержание которого зависит от мутности и наличия в воде тонких фракций взвешенных веществ. Повышенные концентрации фосфатов отмечены в воде р. Колыма, где их содержание увеличивается под влиянием притоков, дренирующих тающие отложения едомы (до 840 мкг/л). Поступление этих вод составляет не менее 10-12 м³/с [Чалов и др., 2022], что, при сравнении с расходом воды р. Колымы (7300 м³/с в период съёмки), не оказывает заметного влияния на содержание фосфора ниже по течению реки (средние концентрации 45-60 мкг/л). Концентрации растворённого Si во всех рассматриваемых реках находятся в диапазоне от 1.9 до 5 мг/л. Максимальные концентрации отмечаются в зимний период на р. Обь (7.98 мг/л).

Пробы для анализа содержания растворённого в воде углерода были отобраны во всех исследуемых реках в 2019-2020 гг. (рис.5.2). В период половодья и спада половодья наблюдалось наибольшее содержание Сорг во всех изученных реках (14.1-17.2 мгС/л). Максимальные концентрации были характерны для вод р. Колыма (17 мгС/л) в период наиболее интенсивного

таяния ММП, в межень содержание органического углерода уменьшалось (4-7 мгС/л). В остальных реках концентрации растворенного Сорг варьируют в диапазоне 3-5.7 мгС/л. В межень поступление органического углерода в водный поток регулируется интенсивностью таяния ММП в нижнем течении рек, поступлением вод притоков с заболоченной части водосбора, а также периодическим выносом углерода в результате прорыва пойменных озёр (отмечено для р. Колыма в межень 2019 гг.).

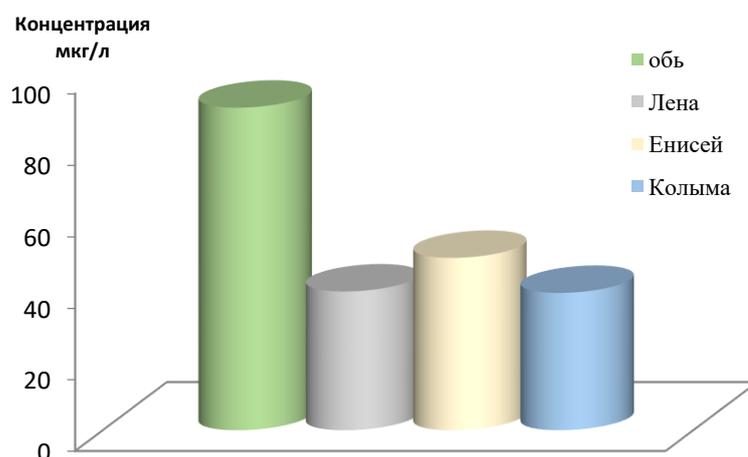


Рисунок 5.1. Медианные концентрации общего фосфора в замыкающих створах рек Обь, Енисей, Лена, Колыма.

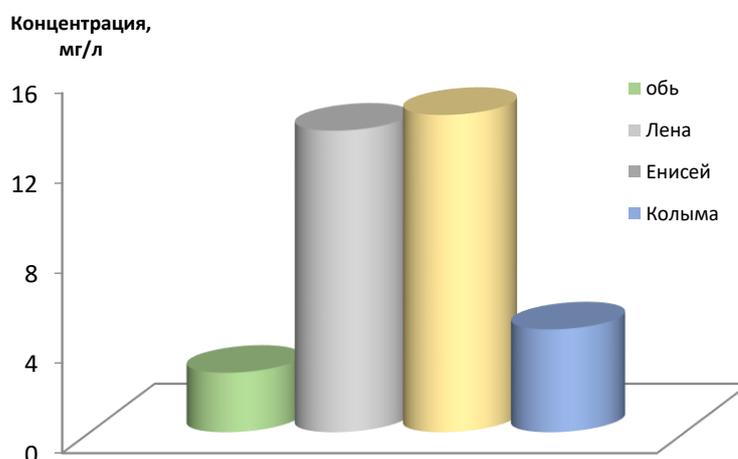


Рисунок 5.2. Средние концентрации Сорб для замыкающих створов рек Обь, Енисей, Лена, Колыма.

Рассмотренные выше гидрохимические характеристики влияют непосредственно на условия протекания процессов гидролиза, комплексообразования и сорбции ММ в потоке. Так, в работе [Савенко и др. 2023] отмечено, что при уменьшении средней минерализации рек от Оби к Колыме пропорционально уменьшается и концентрация растворённых в водах ММ, что в свою

очередь, снижает интенсивность протекания сорбционных процессов для ММ. В работах [Gordeev et al, 2004; Fabre et al., 2019; Krickov et al., 2020] подчёркивается роль органического вещества, как значимого фактора поступления As, Mn, Co, образующих с ним органоминеральные комплексы, а также сорбируемых на поверхности мелкого детрита, поступающего с водосбора. В результате, изменчивости этих гидрохимических показателей в течение года может служить одним из факторов изменчивости концентрации ММ в речных наносах.

5.2 Содержание металлов и металлоидов во взвешенных наносах

При оценке химического состава взвешенных наносов рассматривались концентрации 20 химических элементов: Al, V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, As, Sr, Zr, Mo, Cd, Sn, Sb, Cs, W, Pb, U.

Распределение элементов в потоке сильно зависит от условий водности. Рассматриваемые реки относятся к типу рек с песчаным руслом со смешанным типом транспорта наносов, что приводит к равномерному распределению или повышению концентраций металлов с глубиной [Чалов и др. 2020]. Поэтому, одной из основных задач исследования стала подробная характеристика содержания ММ в различных по крупности фракциях в составе наносов по всему створу. Для этого использовались зонды-ловушки, установленные на разной глубине на репрезентативных вертикалях. По данным с этих ловушек, для рек Обь и Лена были получены соотношения породообразующих компонентов $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$, характеризующие концентрирование ММ в наносах. По сравнению с реками мира [Савенко, 2006], для которых среднее отношение составляет 3,9, для р. Обь оно составило 9,35, для р. Колыма – 6,1, для р. Лена – 5,84, а для р. Енисей – 7,83. Таким образом, для р. Лена и Колыма наблюдается наиболее интенсивное выветривание, которое должно сопровождаться концентрированием ММ в потоке, аналогично увеличению доли Al_2O_3 .

Диапазоны концентраций ММ в составе взвешенных наносов в разные сезоны представлены в приложении 1. Распределение концентраций микроэлементов совпадает с распределением среднемировых концентраций элементов и кларковым рядом для взвешенных наносов.

Максимальные средние концентрации ММ в рассматриваемых реках Арктики отмечаются для петрогенных элементов Al и Fe. Содержание Al повышено в наносах рек Колыма и Лена, относительно рек Обь и Енисей. Содержание Fe, напротив, увеличено в реке Обь, что обусловлено особенностями водосбора. Медианные концентрации Fe в р. Енисей, Лена и Колыма различаются незначительно. Повышенный разброс значений для р. Лена связан с различными створами пробоотбора. Концентрации Al возрастают при увеличении антропогенного влияния. В створе пробоотбора в пгт Жиганск, расположенного в естественных условиях, содержание Al составляет <80000 мкг/г, возрастая к створу пробоотбора у г. Якутск до величин >100000 мкг/г.

Содержание Mn также повышено в нижнем течении р. Обь, поскольку элемент поступает с болотными водами и органической взвесью с водосбора. Медианные концентрации Mn в реках Лена и Колыма схожи, однако для Лены наблюдаются повышенные значения в створах в районе Якутска (антропогенное влияние). Минимальные концентрации характерны для р. Енисей в период межени (>1000 мкг/г), когда уменьшается доля взвешенных частиц бассейнового происхождения.

Содержание Sr повышено в реках Енисей и Лена, и связано с поступлением элемента из горных пород, слагающих водосборный бассейн реки.

Cs – щелочной металл, на распространённость которого влияют сорбционные процессы на мелких частицах взвешенных наносов. Его содержание коррелирует с содержанием Al ($R^2=0,63$) и понижено в реках Обь и Енисей, по сравнению с реками Лена и Колыма.

Элементы V, Cr, Co, Ni, Cu, Zn, Cd, Pb относятся к тяжёлым металлам и часто являются техногенными загрязнителями взвеси. Содержание V минимально в р. Обь и возрастает на восточных реках. Содержание Zn, Pb, Cd в исследуемых бассейнах образует ассоциацию элементов, связываемых [Савенко, 2006; Касимов и др. 2022] с техногенным фактором – транспортной нагрузкой, сгоранием моторного топлива и т.д. Концентрации этих элементов повышены в рр. Обь и Лена. На р. Обь значимое влияние на концентрации этой группы ММ в замыкающем створе оказывает речной порт г. Салехард, на р. Лена – г. Якутск, где для условий межени 2018 гг. наблюдались крайне высокие концентрации элементов ($Cd>1.5$ мкг/л; $Pb>30$ мкг/л; $Zn>280$ мкг/л). Группа элементов Cr, Co, Cu, Ni наследует химический состав основных пород. Именно поэтому для группы элементов Cr, Co, Cu, Ni наиболее высокие концентрации элементов отмечаются в нижнем течении р. Енисей, тогда как для остальных рассматриваемых рек они имеют схожие медианные концентрации.

Группа элементов W, U представлены в речных взвесах в незначительных концентрациях и преимущественно транспортируются в растворённой форме. Во взвешенных наносах наличие этих элементов обусловлено распространённостью в речных бассейнах содержащих их пород. Zr – элемент с низкой подвижностью в водной среде. Он входит в кристаллическую решётку минералов и зависит от распространённости элемента в породах, слагающих водосбор [Савенко, 2006]. Sn, Mo, Sb также преимущественно мигрируют в растворённых формах. Элементы распространены в наносах бассейна р. Колыма вследствие наличия их рудопоявлений в бассейне. В бассейне р. Обь повышенные концентрации Sn и Sb могут быть обусловлены техногенным фактором.

Согласно данным [Krickov et al., 2023] значимым источником As в бассейнах крупных Арктических рек являются воды притоков, дренирующих болотные массивы. As, поступающий с грунтовыми водами, сорбируется на поверхности органических частиц, поступление которых увеличивается в меженный период.

Зависимости концентраций металлов от условий водности (Km), мутности (SSC) и содержания бассейновой фракции наносов (%) были вычислены с помощью корреляционного анализа, выполненного в программе STATISTICA (критерий Спирмана, $p<0.05$). Концентрации элементов (V, Mn, Zr, Cs, W) находятся в прямой зависимости от содержания бассейновой фракции во взвешенных наносах ($R^2 = 0.53-0.8$). Это малоподвижные элементы,

концентрирующиеся в наиболее тонких частицах взвешенных наносов. Отрицательная корреляция с мутностью наблюдается для элементов Fe, Cu, Pb, Cd ($R^2 = -0.4 - -0.6$). Максимальное содержание данных элементов наблюдается в меженный период в результате поступления в воды техногенной пыли [Ерина и др. 2022], а также увеличения доли органических частиц в составе взвеси. Элементы Cr, Mn, Zn, As, Pb, Cu характеризуются отрицательной корреляцией ($R^2 = -0,35 - -0,6$) с коэффициентом водности, что может обозначать накопление данных элементов в меженный период. Особенно заметно этот процесс проявляется для As, Zn в бассейне реки Обь из-за большого содержания органической взвеси.

Химические элементы подразделяются на ассоциации, обладающие сходными условиями миграции. Для их выявления был выполнен кластерный ($p < 0.05$), иерархическая классификация по методу полной связи) и корреляционный анализ (рис. 5.3). Установлено, что наиболее обширные группировки ($R^2 > 0.9$) отмечаются для р. Енисей. Это Al-Zr-Ni-Cr-Cu-V-Co-Mn-Fe-Sr – литофильные и сидерофильные элементы, распространённые в породах бассейна и Zn-Cd-Cs-Pb-U-Sb-As-Mo – смешанная группа, элементы которой могут иметь техногенное происхождение. При этом, концентрации данных элементов в створе понижены относительно их содержания в других речных бассейнах. Для р. Лена выделяются ассоциации Al-Sr-Zr-U-Cs-Pb ($R^2 > 0.8$) – литофильные ММ, V-Fe-Zn-As-Mn-Cd ($R^2 > 0.6$) – смешанная группа элементов, поступающих с техногенной взвесью, Cr-Ni-W-Mo-Co-Cu ($R^2 > 0.9$) смешанная группа элементов, вероятно, поступающих в результате разрушения горных пород. Для р. Обь можно выделить 4 группы элементов: Al-Zr-Co-Cs ($R^2 > 0.8$) – элементы, распространённые в горных породах, но имеющие низкие концентрации в данном бассейне; Zn-Pb-Sr-U ($R^2 > 0.5$) – смешанная группа элементов; Fe-As-Mo ($R^2 > 0.7$) – элементы, переносимые в составе органогенных взвесей, поступающих с водосбора; Ni-Cu ($R^2 > 0.5$) – элементы, связанные с техногенным фактором. Для р. Колыма выделяются группировки элементов: Al-Cs-V-Fe-Co-Zr-U ($R^2 > 0.8$) – ММ, распространённые в породах, слагающих водосбор; Mn-Ni-Cu-As ($R^2 > 0.7$) – элементы, поступающие из ММП; Cr-Mo ($R^2 > 0.8$), Zn-Sb и Sn-Pb ($R^2 > 0.5-0.6$) – литофильные элементы, вероятно поступающие при разработках полезных ископаемых. Рассмотренные группировки схожим образом изменяют свои концентрации при изменении общих гидрогеохимических характеристик потока. Так, элементы, поступающие с поверхности водосбора, увеличивают концентрации при уменьшении водности. Содержание ММ в группе техногенных элементов, свойственных рекам Лена и Обь зависят от близости к источнику загрязнения – портам и транспортным узлам.

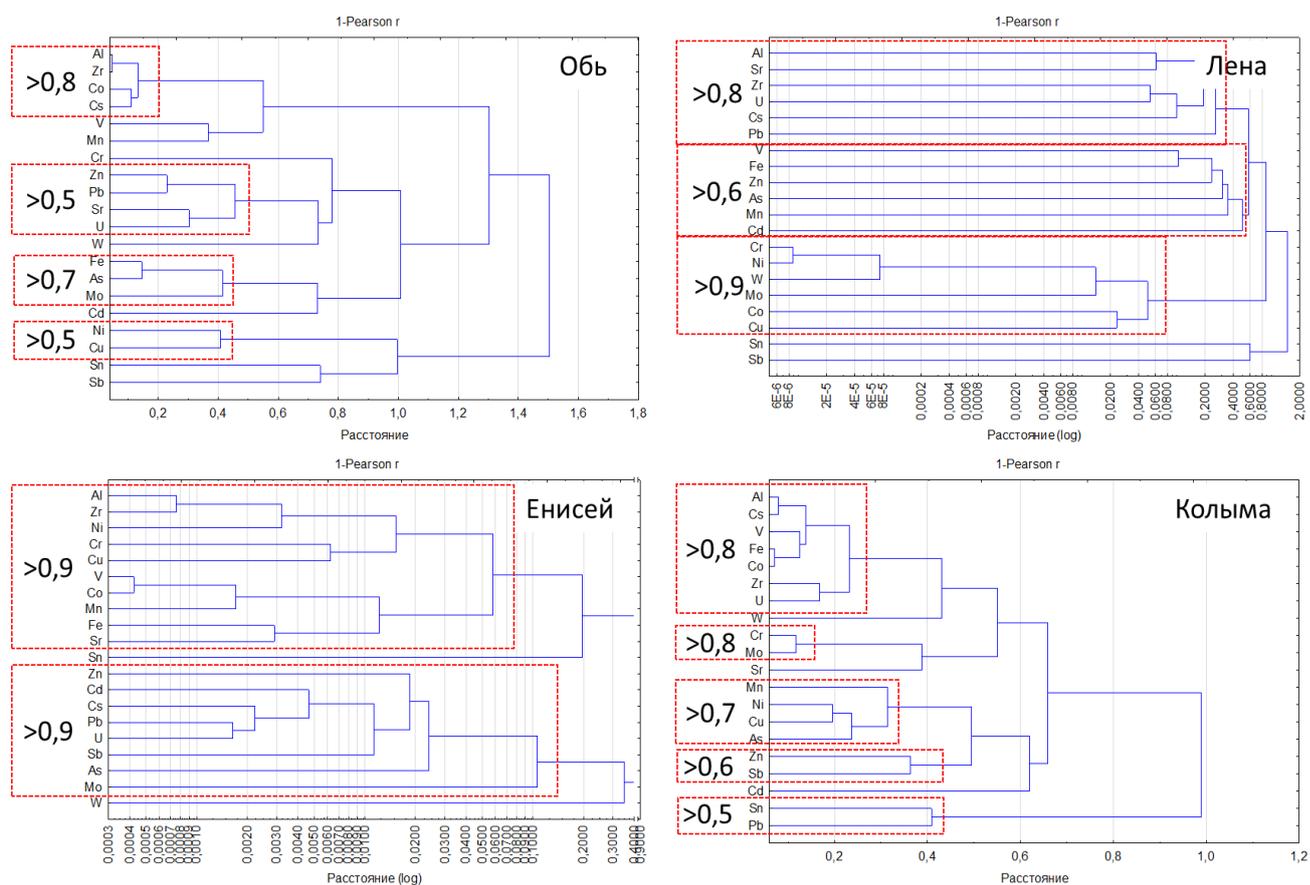


Рисунок 5.3. Характерные ассоциации химических элементов, полученные с помощью кластерного и корреляционного анализов. Красным выделены ассоциации элементов, и отмечены коэффициенты корреляции внутри ассоциаций.

Средние концентрации ММ во взвешенных наносах рассматриваемых рек могут незначительно отличаться от их средних концентраций в наносах рек мира, однако вариабельность (C_v) концентраций в течении сезона и в самих створах рек может быть значительной. Наиболее высокими коэффициентами вариации в створах рек Обь, Лена и Енисей обладают элементы Sn, Cd, Mo ($>60\%$) (рис. 5.4). Sn и Mo – элементы, мигрирующие преимущественно в растворённой форме. Наличие их в составе взвешенных наносов зависит от распространённости этих элементов в породах на водосборе. Их концентрации зависят от воздействия локальных источников поступления наносов, что позволяет им обладать значительной изменчивостью даже в пределах одного створа реки. Cd – элемент-поллютант, повышенные концентрации которого приурочены к антропогенным источникам взвеси. Наиболее сильно это проявляется в бассейне р. Лена, где Cd поступает из пород и сточных вод г. Якутск. При этом концентрации в условно фоновом створе пгт Жиганск не отличаются от средних для других бассейнов, что и приводит к столь значительной изменчивости. Содержание V, Cu, Ni, Cr, Sb, Zn, W, As, As, Pb, Mn во взвешенных наносах характеризуется вариабельностью 25-60% в зависимости от техногенной нагрузки на водоток и фазы водного режима. Так, низкие

значения в период половодья из-за разбавления ММ русловой фракцией наносов (SiO_2) компенсируются концентрированием данных ММ в межень из-за увеличения доли мелких (PM1-50) и органических фракций. Разброс концентраций элементов Zr, Co, Sr, Al, Cs, U, Fe составляет около 25% и обусловлен сменой фаз водного режима. Минимальный диапазон их значений относится к периоду зимней межени (C_v составляет 9-10%).

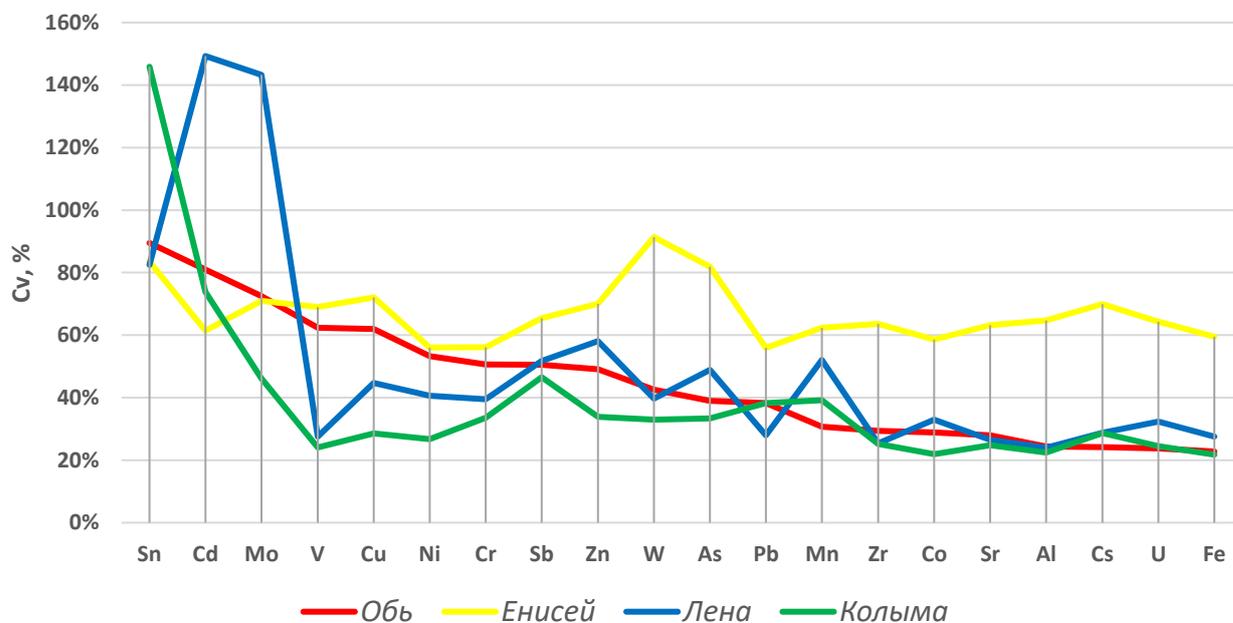


Рисунок 5.4. Бассейновые различия коэффициентов вариации ММ во взвеси.

Для р. Енисей средняя вариабельность концентраций для всех элементов составляет 60-90%, достигая максимального разброса в период половодья из-за различия в генезисе взвешенных наносов. В меженный период в реке увеличивается доля русловых фракций, обладающих схожим химическим составом, в результате чего разброс концентраций уменьшается до 40-50%.

Средний C_v для всех рассматриваемых элементов по каждому из створов составляют: для Оби – 50%, для Енисея – 67%, для Лены – 50%, для Колымы – 39%. Максимальная вариабельность концентраций наблюдается на реках Енисей (80%) и Лена (62-77%) в период пика и спада половодья. Основную роль здесь играют различия генезиса частиц взвеси и многообразие источников их поступления, а также водность рек, которая приводит к значительной неоднородности распределения взвешенных наносов в створе наблюдений. В меженный период во всех бассейнах разброс значений C_v составил 30-45%.

В 2021 году на р. Колыма измерения химического состава взвешенных наносов проводились в течение всего тёплого периода (май - август) с периодичностью один раз в неделю (рис. 5.5). Для каждого из измерений рассчитывался средний показатель C_v в створе по

результатам анализа 9 проб. Максимальные значения C_v в створе в период спада половодья и активного таяния мерзлоты, сосредоточенной на правом берегу реки, составили 40% и 51%. Разброс концентраций Cd и Sn при этом достигал 120 - 180%. Далее была рассчитана изменчивость величины C_v каждого из измерений. Она составила 57%. Это значение превышает среднюю изменчивость концентраций ММ за 2021 г. – 39%. В результате, локальная пространственная неоднородность в створе оказалась значительно выше временной, что подчёркивает важность её учёта при мониторинговых исследованиях.

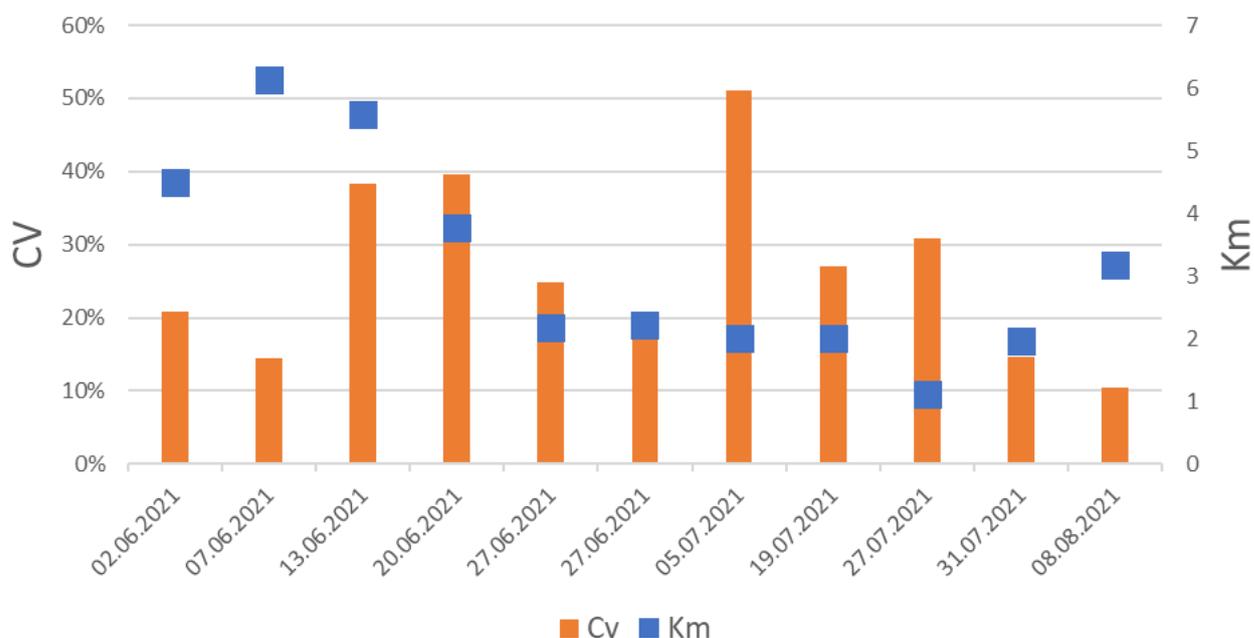


Рисунок 5.5. Изменчивость средних по створу концентраций ММ в составе взвешенных наносов р. Колыма в 2021гг.

5.3 Сравнительный анализ химического состава взвеси Оби, Енисея Лены и Колымы

Для выявления гидрогеохимической специализации рек Арктической зоны РФ были рассчитаны кларки концентрации (K_k) и кларки рассеивания (K_r) химических элементов относительно среднего содержания элемента в составе верхней части литосферы [Rudnick, Gao 2003; Hu, Gao, 2009] (глава 3 (14, 15)). Данные характеристики позволяют выявить превышения концентраций элементов во взвесах исследуемых бассейнов относительно фона и выделить их характерные группы (рис. 5.6).

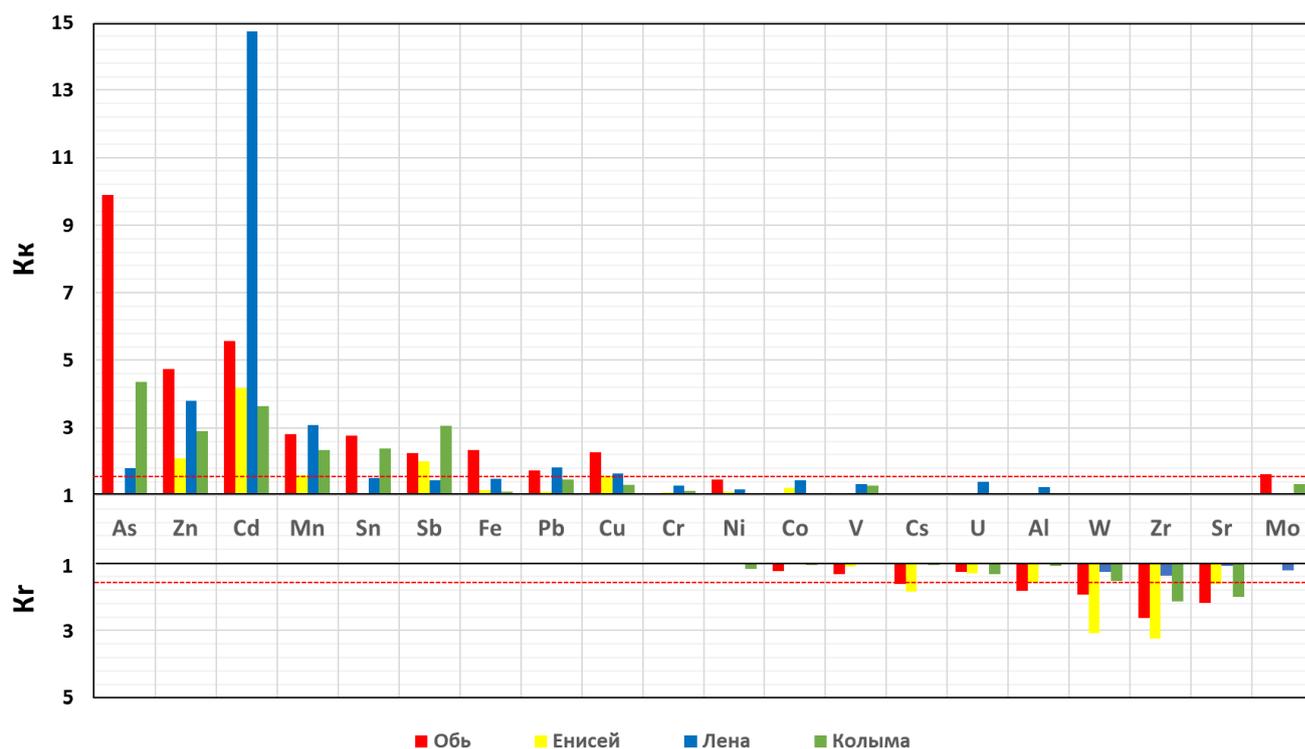


Рисунок 5.6. Кларки концентрации (K_k) и рассеивания (K_r) химических элементов в составе взвешенных наносов Арктических рек.

Анализ распределения K_k позволил выделить группы элементов, имеющих схожие показатели концентрирования. Для реки Обь выделяются элементы As, Zn, Cd ($K_k > 3$). Эти элементы наиболее активно концентрируются во взвеси в меженный период. Их содержание также повышено для р. Колыма, что связано со схожими процессами их поступления. На р. Лена, вследствие техногенного концентрирования на взвеси в 14 раз возрастает содержание Cd. Mn, Sn, Sb, Fe, Pb, Cu также имеют повышенную концентрацию ($K_k > 2$) в створах Оби, Лены и Колымы. Поступление Fe и Mn связано с сорбцией этих металлов на поверхности мелких органоминеральных частиц взвешенных наносов, поступающих с поверхности заболоченных водосборов притоков. Sn и Sb имеют повышенный природный фон в бассейне р. Колыма и поступают с техногенной взвесью в бассейне р. Обь. Содержание тяжёлых металлов и

малоподвижных элементов для рассматриваемых рек соответствуют среднемировым концентрациям. Во взвешенных наносах отмечается рассеивание элементов Al, W, Zr, Sr, что может объясняться повышенной долей русловой фракции в наносах рек Енисей и Обь.

Значения K_c (16), рассчитанные относительно среднего содержания химических элементов в составе наносов рек мира [Савенко, 2006], характеризуются более низкими значениями, что объясняется повышенным содержанием ММ в составе взвешенных наносов в результате сорбции на частицах взвеси (рис. 5.7)

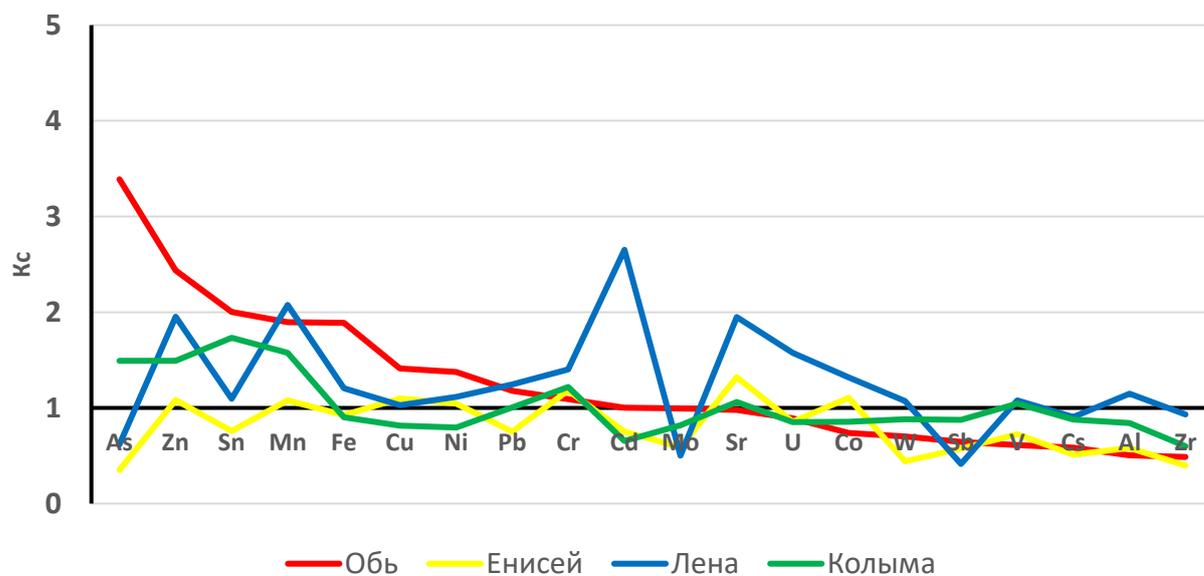


Рисунок 5.7. Коэффициент концентрирования (K_c) химических элементов в составе взвешенных наносов Арктических рек.

Превышения, характерные для K_c групп элементов в каждом из бассейнов сохраняются при анализе K_c , хотя сами значения уменьшаются в 1,5-2 раза. Также возможно вычислить суммарный коэффициент концентрирования TK_c , характеризующий бассейновые различия (рис. 5.8).

Распределение TK_c в реках Енисей и Колыма отличается от рек Лена и Обь за счет меньшего антропогенного воздействия. В бассейнах последних прослеживается влияние городов (Салехард, Якутск), которые генерируют большое количество мелкой техногенной взвеси. Потоки наносов рек Енисей и Колыма незначительно обогащены ММ. Однако, для р. Енисей наблюдаются незначительные превышения K_c (1,2-1,7) для ассоциации элементов Mn, Zn, Cr, Ni, Sr, Co, Cu, тогда как для р. Колыма большее значение TK_c (более 1,5) связано только с Mn, Sn, Zn, As. Для р. Енисей превышения для этих элементов отмечаются как в период высокой, так и низкой водности, что может служить признаком постоянного поступления данных элементов вместе с материалом, смываемым с водосбора при разрушении трапповых базальтов.

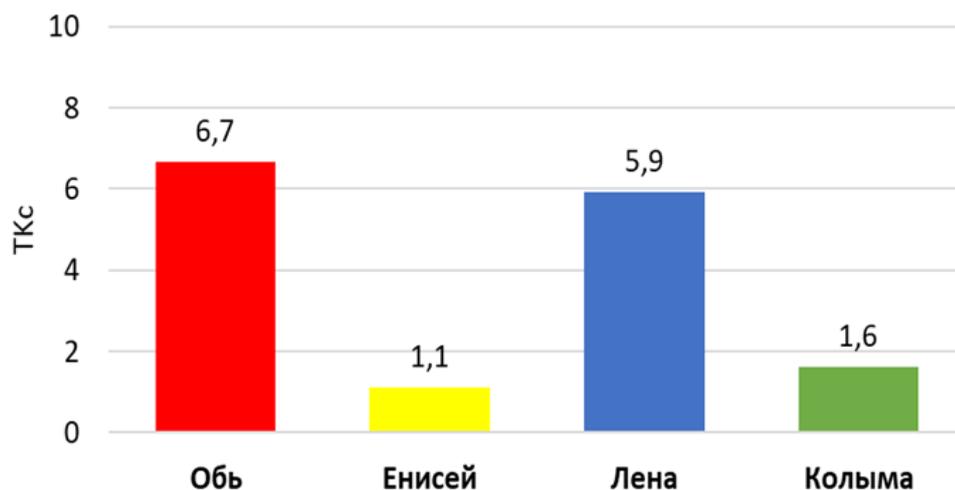
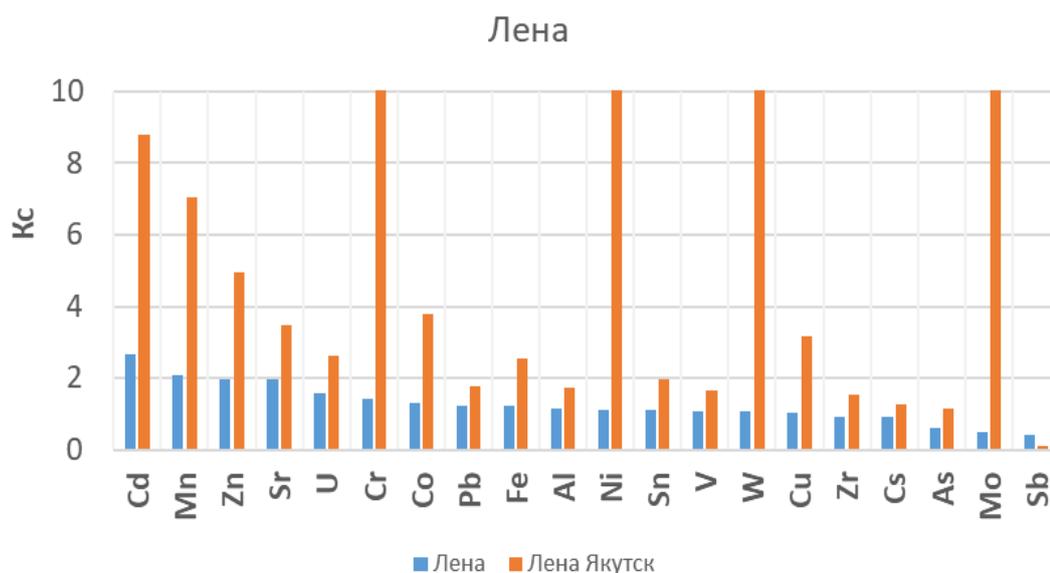


Рисунок 5.8. Суммарный коэффициент концентрирования TKc для исследуемых рек

Участки нижнего течения исследуемых рек формируют ассоциации химического состава взвеси, сильно отличающиеся от их верхнего и среднего течения. Значения Kc для замыкающих створов рек Лена и Енисей были сопоставлены с сильно антропогенно нарушенными территориями – р. Лена в районе г. Якутск и р. Селенга в нижнем течении [Thorslund et al., 2017; Chalov et al., 2020] (рис. 5.9). TKc для р. Енисей равен 1,1, что меньше, чем для р. Селенги, расположенной в верхней части его бассейна (8.7). Вероятно, из-за влияния каскадов ГЭС поллютанты осаждаются в водохранилищах и не поступают в замыкающий створ. На реке Лена, концентрации ММ в нижнем течении 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).



Енисей

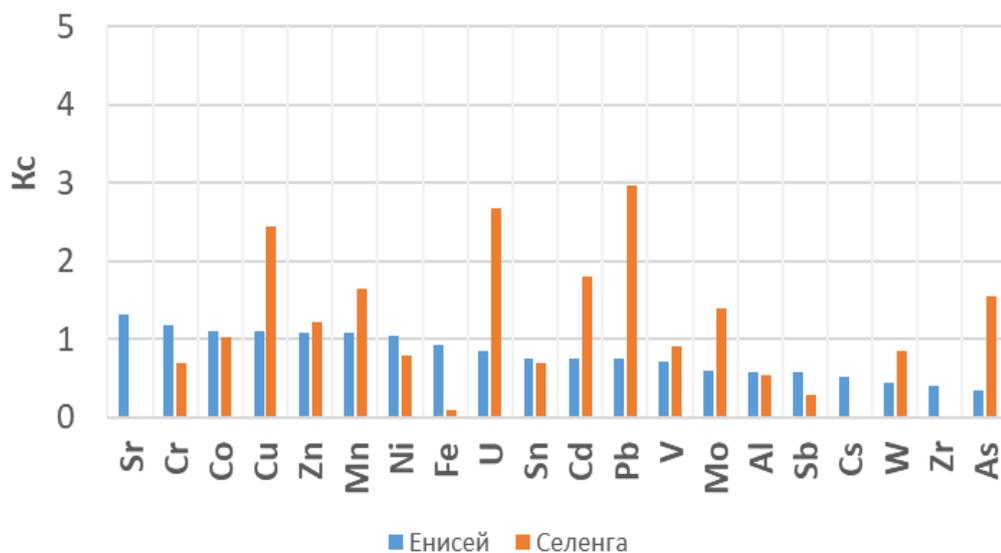


Рисунок 5.9. Осредненные значения коэффициентов концентрирования K_c взвешенных наносов нижнего течения рек Лена и Енисей в сравнении с K_c взвешенных наносов антропогенно нарушенных участков речной сети (Лена у г. Якутска; р. Селенга (ниже г. Улан-Уде (2012-2018 гг.)).

Концентрационную функцию взвешенных наносов оценивали с помощью коэффициента обогащения (EF), показывающего отличие содержания микроэлемента в наносах от его содержания в составе пород, слагающих бассейн, путем нормирования химического состава наносов на содержание опорного элемента, нейтрального к биохимическим процессам (Sc). Этот показатель может служить критерием загрязнённости наносов в реке. Согласно классификации [Sutherland, 2000], наибольшие уровни загрязнения ММ наблюдаются для рек Обь и Лена (табл. 5.2)

Таблица 5.2

Уровень загрязнения ММ, согласно классификации [Sutherland, 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	—

Расчитанный аналогично показателю TK_c (18) суммарный коэффициент обогащения (TEF) позволил выявить существенное увеличение загрязнённости р. Обь в зимний период по сравнению с летним (рис. 5.10). При низкой водности происходит концентрирование поллютантов преимущественно техногенного происхождения (Zn, Cd, Cr, Pb). Для оценки

зависимости TEF от водности фазы ВР (Km) были рассчитаны TEF для каждого их периодов пробоотбора (рис. 5.11).

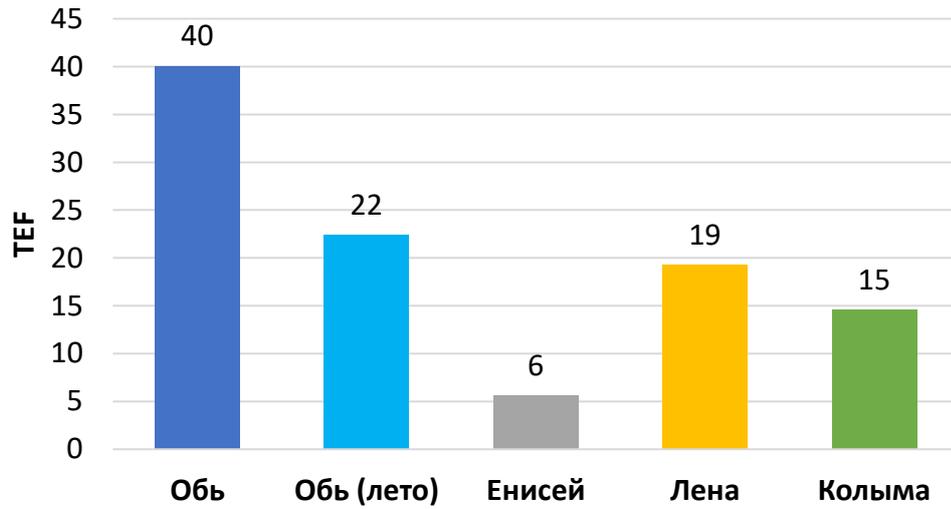


Рисунок 5.10. Суммарный коэффициент концентрирования TEF для исследуемых рек.

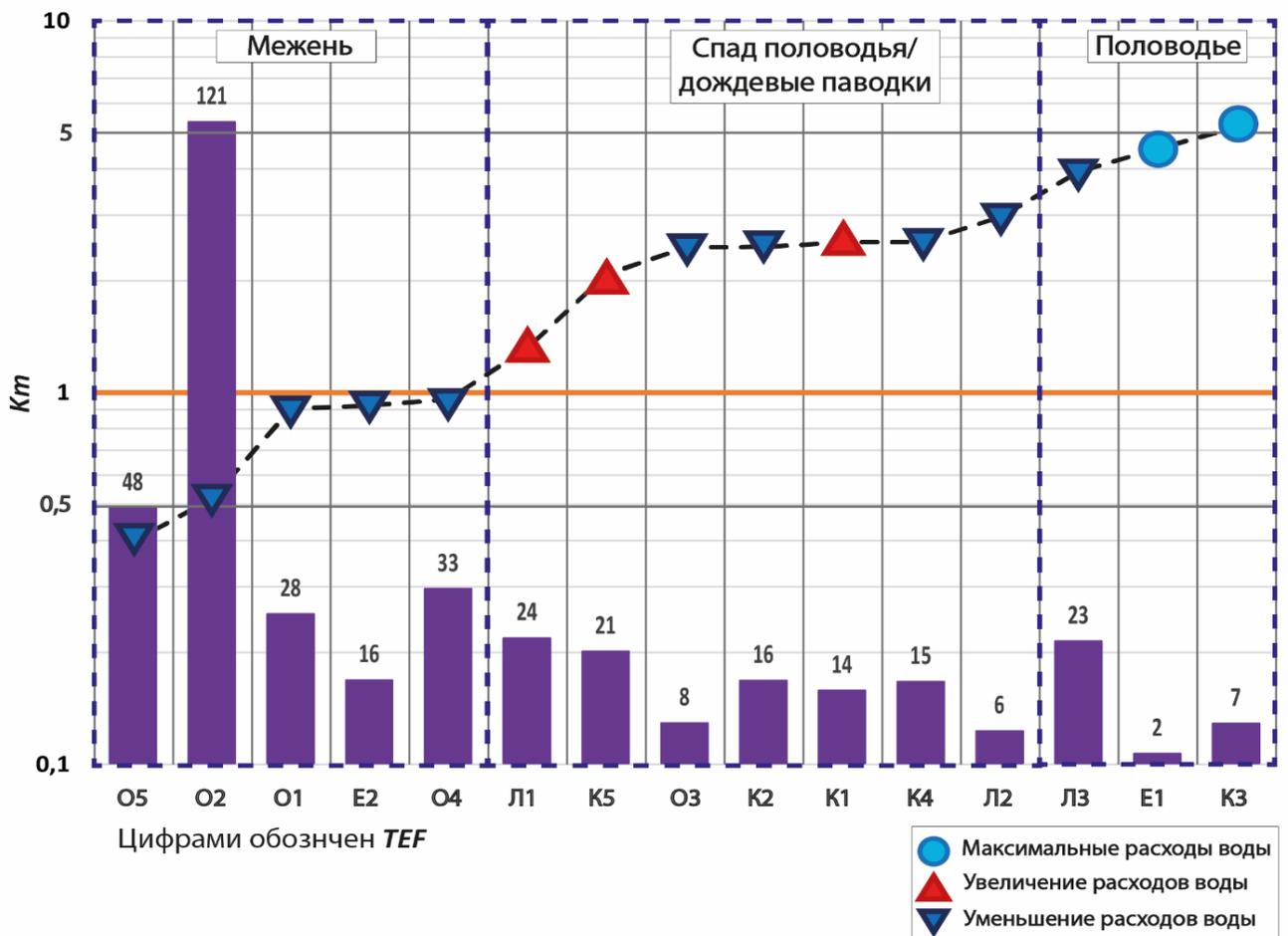


Рисунок 5.11. Изменчивость значения суммарного коэффициента обогащения (TEF) и модульного коэффициента водности (Km) по сезонам (табл. 3.1).

Данные, полученные для р. Обь (створ г/п Салехард) в ноябре 2018 г., не дают полной характеристики концентраций ММ в составе взвешенных наносов, поскольку отличаются крайне низкой мутностью (1-2 мг/л), а также наличием крупных фракций РМ500-2000 в составе взвеси. В результате данный сезон не был добавлен в анализ для исключения случайного завышения содержания ММ. Остальные данные состоят из более чем одной серии измерений со схожими характеристиками гранулометрического состава взвеси. В результате для всех пробоотборов, кроме сезона О2, была получена зависимость TEF от Km ($R^2 = 0.55$) (25):

$$TEF = 4,8121e^{-0,049Km} \quad (25)$$

В периоды высокой водности происходит разбавление насыщенных поллютантами фракций наносов, что приводит к снижению TEF . При анализе загрязнённости по сезонам можно отметить повышенную загрязнённость наносов р. Обь по сравнению с другими реками. Наименьшие значения TEF свойственны р. Енисей, что косвенно свидетельствует о малом влиянии на него антропогенного фактора трансформации химического состава наносов.

Важным показателем, характеризующим поток микроэлементов в составе взвешенных наносов, является преимущественная форма миграции. Согласно современным оценкам, около 90-99% большинства металлов в речном стоке мигрируют во взвешенной форме [Добровольский, 2003; Гордеев, 2012; Gaillardet et al., 2009;]. Для Арктических рек (табл. 5.3) характерен перенос катионогенных элементов: Al, Cs исключительно во взвешенной форме (>98%), малоподвижных катионогенных элементов Fe, Zr, Mn, Co, Cr полностью во взвешенной форме (>75%), переходной группы элементов: V, W, Pb, Zn, Cd, Ni, As преимущественно во взвешенной форме (50%-75%), анионогенных и переходных элементов: Sn, U, Cu, Sb преимущественно в растворённой форме (25%-50%), анионогенных и переходных элементов Mo, Sr в полностью растворённой форме (<25%).

Результаты DS анализа показали, что в составе взвешенных наносов р. Обь поток Mn в зимнюю межень, по сравнению с сезоном открытого русла уменьшился более, чем на 90%; V, Co – на 60-80%; Zn, Pb, W, U, Cd – на 25-50%; As, Al, Cr, Mo, Sr, Fe, Sb, Zr, Cs – на 2-20%. Также наблюдался рост доли Cu и Ni на 3-5% и Sn на 44%. Подобное распределение показывает уменьшение объёмов поступления наносов, обогащённых распространёнными в бассейне ММ при росте концентраций Cu и Ni.

Для р. Лена поток W уменьшается на 83%; Ni, V, Mo, As, Sn, U, Sb на 25-50%; Al, Cr, Sr, Co, Zr, Cs, Cu, Ni на 2-25%. Возрастает доля Mn, Pb, Fe, Zn, Cd на 1-6%.

Для р. Колыма наиболее сильно уменьшается поток Sn, U, Mo (25-50%); Cd, Cs, Pb, W, Ni, Cu, Zn, V, Sr, Cr, Sb, Co, As уменьшаются на 1-25%, а Mn, Fe, Zr увеличивается на 0-16%. Во всех рассматриваемых бассейнах с уменьшением водности уменьшается поток рудогенных элементов при возрастании доли элементов, широко распространённых в бассейне в составе русловой

(крупной) фракции наносов. В период повышенной водности только Sb, Mo, Sr переносятся преимущественно в растворённой форме, тогда как в период малой водности в эту группировку включаются W, Cd, Ni, As, Sn, U, Cu, Sb, Mo, Sr. С увеличением доли растворённых элементов литофильного и сидерофильного происхождения и укрупнением частиц взвешенных наносов, уменьшается их сорбционная способность. Также, обнаруживается корреляция между долей взвешенных наносов и содержанием бассейновой фракции для Al, Fe, Zr, Mn ($R^2=0.5-0.53$). Важную роль играет вертикальное распределение мутности (Kx), которое также определяет долю ММ, переносимых во взвеси. На реках наблюдается незначительное увеличение среднего диаметра частиц от поверхности ко дну, что отражается и на микроэлементном составе. На реках с высокой долей бассейновой фракции (р. Лена и р. Колыма) транспорт ТММ в составе взвешенных наносов увеличивается к придонным слоям (на 5-20%). Максимальное увеличение отмечается на р. Колыма в период половодья: для U (на 43%), Cu (на 38%), Sb (на 60%), Mo (на 62%). На реках Енисей и Обь в период межени наблюдается увеличение концентраций элементов в поверхностных слоях на 2-10%. Максимальное увеличение свойственно Mo, Sb, Sr (до 80%).

По результатам анализа химического состава взвешенных наносов, мутности и расходов воды были вычислены средние расходы химических элементов в замыкающих створах рек во взвешенной (W) форме (табл. 5.4):

$$Wi = Q*(Ci,*SSCi)/10^6 \quad (26)$$

где Wi – поток i -элемента во взвешенной форме, г/с; Q – среднееголетний расход воды на г/п (УГМС), репрезентативных для створов измерений, м³/с; $SSCi$ – измеренная концентрация наносов, г/м³, 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. Река Енисей выносит 33% от общего стока. Река 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 среднееголетнем стоке взвешенных наносов рек [Магрицкий, 2016] для периода открытого русла составляет: Обь – 13%, Енисей – 31%, Лена – 19%, Колыма – 20%. За исключением Fe, Al, Mn оставшиеся 17 ММ составляют около 0.1% от общего потока наносов.

Таблица 5.3

Распределение концентраций ММ в растворённой и взвешенной форме замыкающих створах Арктических рек

Раствор (D) <25% 25-50% 50-75% >75% Взвесь (S)

		Al	Fe	Mn	Cs	Zr	Co	Cr	V	W	Pb	Zn	Cd	Ni	As	Sn	U	Cu	Sb	Mo	Sr
Обь																					
O3	Пов	100	96	97	100	97	95	91	92	88	97	74	76	61	48	7	45	35	38	9	9
	Сер	100	95	98	100	96	94	89	90	86	97	79	75	57	45	7	40	33	37	8	8
	Дно	100	94	98	100	97	94	90	90	84	97	72	75	60	47	6	48	37	38	10	12
O4	Пов	99	85	98	99	94	99	76	25	59	80	47	96	37	30	11	12	22	16	1	2
	Сер	100	84	98	99	94	99	79	32	66	83	53	95	40	27	10	13	22	18	1	3
	Дно	99	84	97	99	95	95	77	27	62	80	49	86	37	28	10	14	23	16	0	3
O1	Пов	98	86	98	86	91	77	74	74	34	63	57	47	29	46	17	6	24	1	0	2
	Сер	98	86	98	84	88	74	61	70	27	52	54	40	25	50	11	5	23	1	0	2
	Дно	98	85	98	88	85	77	68	73	31	58	53	47	34	47	13	6	21	1	0	2
O2	Пов	94	79	22	59	74	32	86	60	31	88	71	38	8	64	66	3	33	1	16	1
	Сер	95	88	47	61	74	47	72	71	14	92	82	46	3	76	68	7	36	1	20	1
	Дно	93	74	19	60	78	26	87	59	33	78	81	46	14	70	75	5	55	2	16	1
O2(янв)	Пов	97	88	5	93	81	29	87	25	60	65	55	30	77	49	61	9	43	30	2	2
	Сер	93	79	5	49	76	27	81	8	53	79	49	39	64	35	38	7	37	23	1	1
	Дно	97	88	6	95	82	30	82	0	54	66	48	25	52	48	55	9	37	21	1	1
Енисей																					
E1	Пов	90	81	69	96	74	88	82	74	68	77	48	51	55	33	29	40	27	23	24	19
	Сер	95	93	84	98	85	94	88	84	58	79	54	57	63	35	9	40	26	19	22	10
	Дно	96	94	86	99	87	96	89	87	69	81	51	52	63	43	7	44	24	21	18	12
Лена																					
Л2	Пов	99	94	93	99	94	95	92	92	96	82	78	48	69	53	93	47	48	39	26	10

Продолжение таблицы 5.3.

Л2	Сер	99	95	94	99	95	95	93	93	96	86	87	62	78	61	93	51	54	52	31	14
	Дно	99	95	93	99	95	95	93	93	94	83	85	55	77	57	91	54	54	42	34	14
Л1	Пов	96	98	99	75	79	82	86	62	8	88	90	56	46	17	52	11	24	1	0	1
	Сер	96	98	99	76	78	83	83	66	8	89	78	55	49	20	55	12	25	1	1	2
	Дно	96	99	99	76	78	87	89	69	21	91	86	55	55	22	57	12	33	1	4	2
Колыма																					
К3	Пов	99	95	65	100	94	87	92	95	96	54	78	57	56	69	93	70	43	31	33	17
	Сер	100	98	85	100	98	95	95	97	99	71	89	76	75	83	97	84	60	47	49	20
	Дно	100	98	86	100	98	96	95	98	98	69	91	83	76	83	96	86	64	51	46	20
К4	Пов	98	95	90	98	94	82	80	90	59	27	74	54	44	55	79	57	33	18	13	4
	Сер	99	97	93	99	96	84	81	91	92	28	65	68	44	58	87	59	36	19	14	4
	Дно	99	97	95	99	96	85	82	90	77	30	82	70	48	55	85	61	40	18	15	4
К2	Пов	99	93	84	99	95	83	87	90	92	84	48	38	48	47	72	53	46	24	19	5
	Сер	99	90	94	100	95	92	90	93	94	90	65	57	58	50	80	63	51	29	23	5
	Дно	100	99	98	100	100	98	97	99	99	92	37	60	84	84	64	93	75	62	47	21
К1	Пов	99	98	88	98	96	84	75	84	81	88	58	62	62	51	26	48	40	31	13	3
	Сер	99	97	92	99	96	87	76	89	84	89	69	69	65	56	4	54	44	34	15	3
	Дно	99	98	93	99	97	90	77	91	90	88	71	72	68	59	9	58	49	37	17	4
К5	Пов	98	97	93	98	96	70	75	80	78	49	72	73	51	52	57	38	40	17	9	2
	Сер	98	98	97	98	97	72	78	81	96	62	78	70	64	60	68	38	49	27	14	4
	Дно	99	99	96	99	98	76	79	86	94	65	74	70	60	54	72	40	44	24	12	4

Средние расходы микроэлементов (г/с) в составе взвешенных наносов по результатам экспедиций 2018-2021гг.

Элемент	Средний расход ММ в период открытого русла, г/с				
	Обь	Енисей	Лена	Колыма	∑Реки
Fe	31012	51811	45567	17637	146027
Al	29678	68537	85304	29997	213516
Mn	1091	1681	1429	469	4670
Zn	108	177	213	66	564
Sr	81	167	208	69	525
Cr	57	96	84	34	271
Zr	52	53	117	35	257
V	59	114	122	49	344
Ni	33	60	47	14	154
Cu	18	72	39	12	141
Pb	13	12	27	9	61
As	9.2	3.4	9.1	7.6	29
Co	10	27	20	6	63
Sn	3.6	3.5	3	1.6	12
Cs	2.5	1.8	4.4	1.9	11
U	1.2	1.1	2.6	0.85	5.6
W	0.72	0.20	1.2	0.45	2.6
Sb	0.54	0.49	0.86	0.44	2.3
Cd	0.15	0.31	0.54	0.12	1.1
Mo	0.22	1.1	1.3	0.55	3.1

ГЛАВА 6. РАСПРЕДЕЛЕНИЕ КОНЦЕНТРАЦИЙ МЕТАЛЛОВ И МЕТАЛЛОИДОВ ВО ФРАКЦИЯХ НАНОСОВ КРУПНЕЙШИХ РЕК РОССИЙСКОЙ АРКТИКИ

Для оценки влияния фракций крупности на формирование химического состава был проведен статистический анализ данных о распределении химических элементов во фракциях PM1, PM1-10 и общей пробе взвешенных наносов. Согласно литературным данным о распределении по фракциям крупности петрогенных элементов [Демина 1982; Янин 2002; Гордеев 2009, Langmuir, 1997; Lick 2008], тяжелых металлов [Добровольский 2003; Савенко 2006; Чалов, 2021; Zhang et al., 2001; Bouchez et al. 2011], биогенов [Walling, 2006; Meng et al. 2014], радионуклидов [Abril, Fraga 1996; Antonelli et al. 2008] исследуемые элементы Al, V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, As, Sr, Zr, Mo, Cd, Sn, Sb, Cs, W, Pb, U преобладают во фракции PM1-PM50 в составе кристаллических решёток минералов, сорбированных на крупных частицах взвеси, глинистых частицах (алюмосиликатах), органо-минеральных комплексах. Во фракции PM1-PM10 транспорт осуществляется в составе органо-минеральных, 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. 6.1).

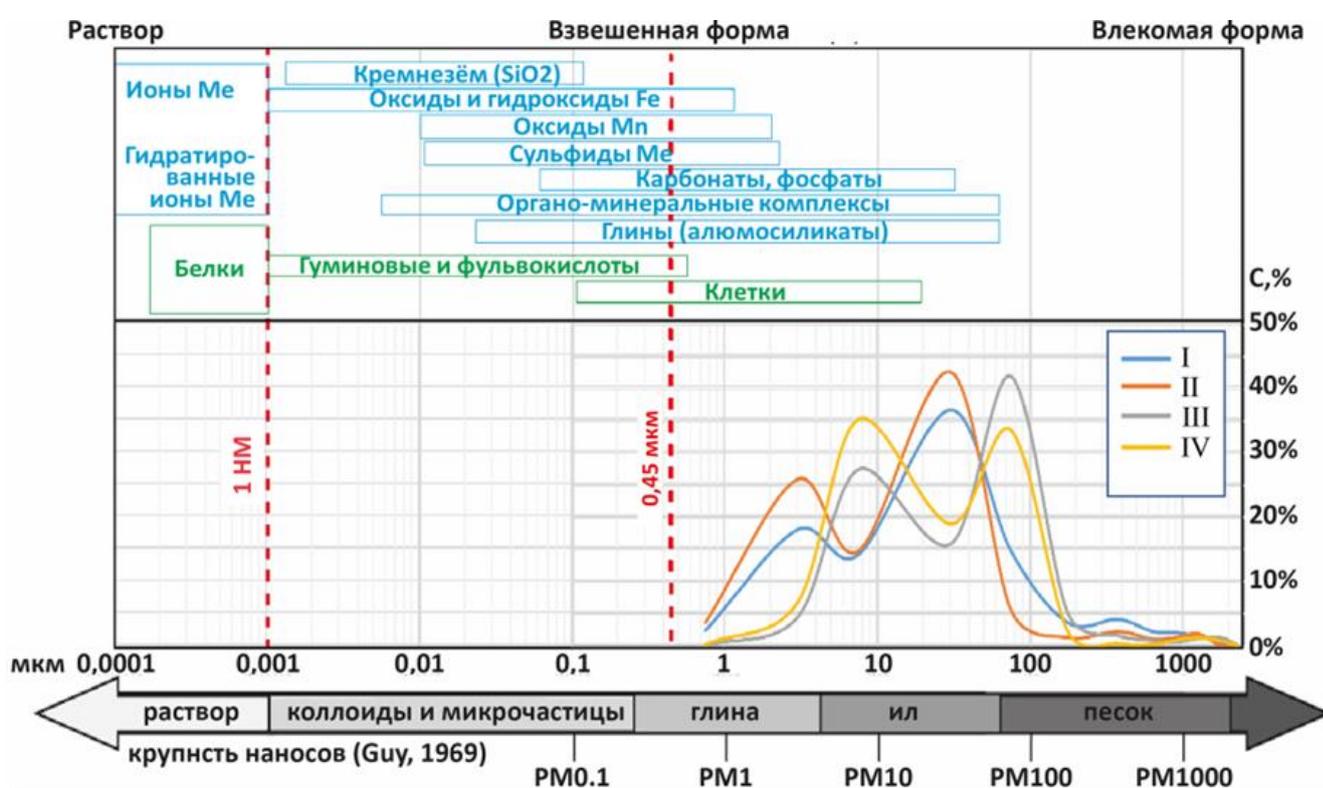


Рисунок 6.1. Распределение форм миграции химических веществ, транспортируемых потоком, усреднённые кривые распределения гранулометрического состава рек Обь (I), Енисей (II), Лена (III), Колыма (IV) и их характерные размеры в значениях PM.

Для характеристики уровня накопления металлов в наносах были выполнены анализы концентрации ТММ в наиболее мелких бассейновых фракциях: PM1 ($PM < 1$) и PM1-10. Всего проанализировано 22 пробы наносов, отобранные с помощью зонда-ловушки на разных горизонтах. Выбор этих фракций определяется их наиболее сильной сорбционной ёмкостью по отношению к ТММ, связанной со значительным ростом удельной площади поверхности [Поздняков, 2011; Tipping, 1988; Wilkinson, Lead, 2007]. В случае значительного антропогенного воздействия именно эти частицы наносят наибольший вред экосистемам вследствие высокой биодоступности. Были проанализированы интегральные пробы взвеси рек Енисей (E1, E2), Колыма (K1, K2, K4, K5), Обь (O1, O3) и Лена (L1). На всех водных объектах ловушки экспонировались в водном потоке на трёх различных горизонтах, однако из-за крайне низкой мутности, при недостаточной концентрации наносов в пробе, рассматривалась интегральная проба со всех горизонтов. Для каждой из ловушек выполнен анализ гранулометрического состава взвешенных наносов, анализ общей концентрации ММ, а также анализ ММ в выделенных фракциях PM1 и PM1-10.

Для полученных результатов химического анализа были посчитаны коэффициенты D_x (концентрирования) относительно валового содержания микроэлементов в ловушке (рис. 6.2). В замыкающем створе 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 раз, в р. Енисей в 2.56, 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 рр. Енисей и Колыма. Сравнение средних концентраций PM1 с общими концентрациями микроэлементов в ловушке ($D_{x(PM1)}$) показали, что в реках Колыма и Обь наблюдаются превышения концентраций Al, Sn, Fe более чем в 2 раза, большая часть анализируемых элементов превышает общие концентрации в 1-2 раза, а Sr, напротив, меньше общего содержания в 0,5 раза. Для реки Енисей элементы U, Pb, Sb, As, Mo превышают общие концентрации более чем в 2 раза, Zn, 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 вероятно связано с незначительным вкладом частиц PM1 в поступление ТММ. Коэффициент $D_{x(PM1-10)}$ характеризуется превышением общих концентраций менее чем в 2 раза для всех ТММ р. Обь, за исключением Al. Кроме Sr, во фракции PM1-10 отмечается пониженное содержание Mn, Cu, As ($D_x=0.2$), Mo, Cd. Для рек Лена и Колыма концентрации PM1-10 приблизительно соответствуют общим концентрациям. Для р. Енисей содержание всех ТММ повышено относительно валовых концентраций, однако несколько ниже, чем во фракции PM1. Полученные данные совпадают с результатами работ по почвам, дорожной пыли и речным наносам (Chalov et al, 2020 Vlasov et al., 2021, Bezberdaya et al., 2022), за исключением данных для р. Лена, где коэффициент D_x достаточно низкий для всех ММ. Таким

образом, именно фракция PM1 определяет химический состав взвешенных наносов в рассматриваемых реках.

Для характеристики превышения валовой концентрации взвешенных наносов над средним содержанием MM в реках мира были посчитаны K_c для каждого из бассейнов. Выявленные K_c показывают рассеивание MM относительно среднего состава наносов для всех элементов, за исключением Sr. Вероятно это связано с тем, что мельничный газ, используемый в ловушке, имеет минимальный размер пор – 0.28 мкм, вследствие чего часть более мелких наносов может проходить сквозь него на начальном этапе экспонирования. Это может объяснять, почему ловушках занижаются концентрации наиболее химически активной фракции PM1-30. Результаты определения K_c показывают превышение среднемировых концентраций химических элементов в речной взвеси для фракций PM1 в реках Лена, Енисей, Колыма, а также для фракции PM1-10 в реках Лена и Енисей. Для р. Обь только Cr, Mn, Co, Ni превышают среднемировые значения во всех фракциях, тогда как остальные элементы остаются рассеянными. Такие элементы, как Mn, Zn, Pb, преимущественно транспортируются во фракциях PM1. Примечательно, что для р. Колыма практически все химические элементы тяготеют к наиболее мелким фракциям PM1, тогда как PM1-10 характеризуется $K_c > 1$ только для Zn, Sn. На р. Енисей высокие значения K_c для PM1 и PM1-10 связаны с поступлением наиболее тонкой взвеси в результате эрозии основных пород на водосборе, в которых них повышены концентрации Co, Ni, Cu, Fe [Томшин, Копылова, 2017].

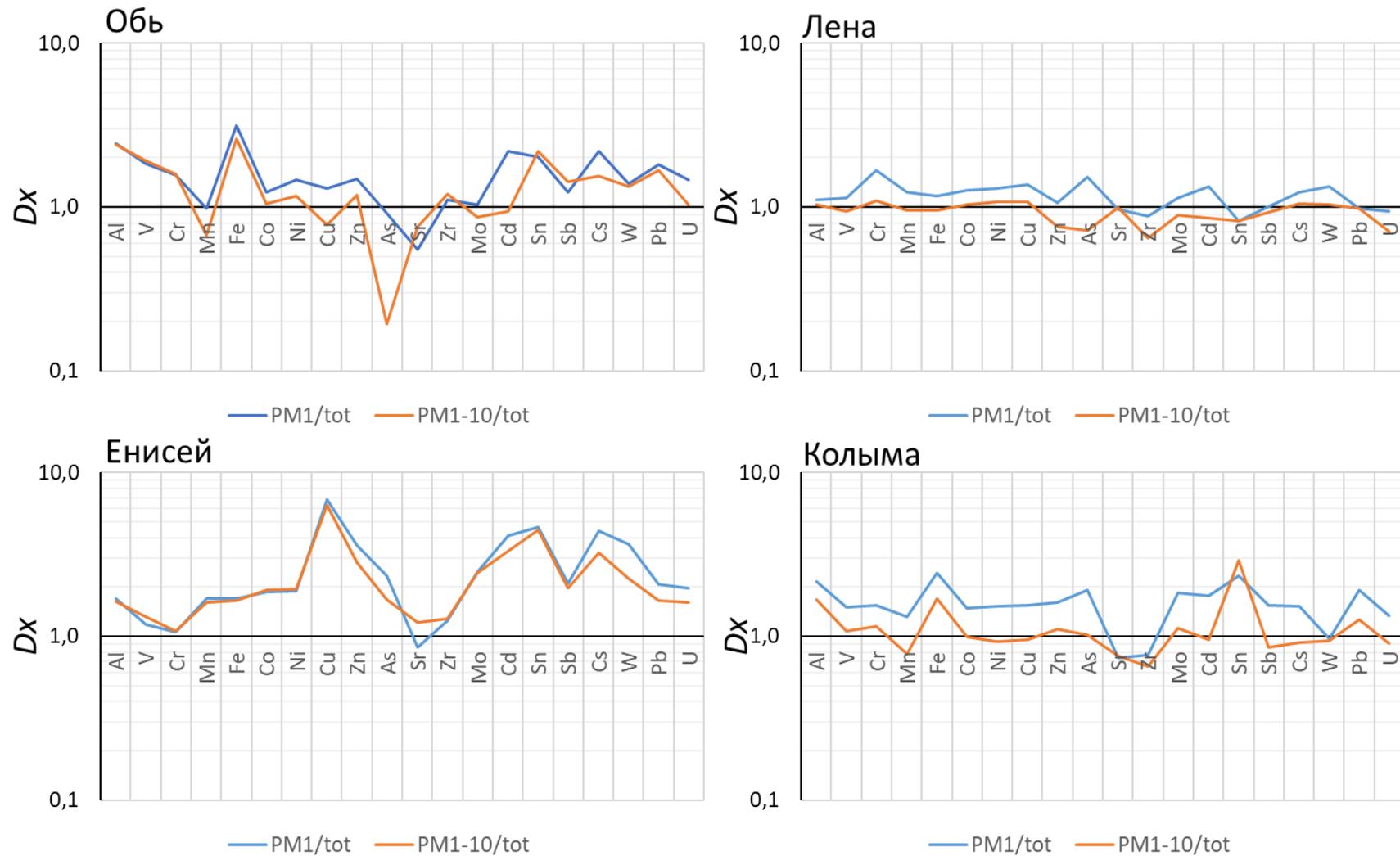


Рисунок 6.2. Коэффициент концентрирования наночастиц (D_x) в фракциях PM1 и PM1-10, относительно общего содержания наночастиц в ловушках для исследуемых рек.

Для рассматриваемых ловушек был получен коэффициент K_x – отношение концентрации ММ в поверхностном (C_{surf}) и придонном (C_{bott}) слое. Для общего содержания ММ в ловушках в межливневый период отмечается тенденция к концентрированию в придонном слое. Наиболее сильно оно проявляется для элементов, характеризующихся миграцией в растворённой форме: Mo, U, Sn, As в связи с их поступлением в составе крупных частиц, накапливающихся в ловушке у дна. Для фракций PM1 и PM1-10 не отмечено существенного увеличения концентраций ТММ в придонном слое. Концентрации изменяются в пределах 0.1-10%. В период половодья во фракциях PM 1 и PM1-10 отмечается уменьшение концентраций в придонном слое на 10-30%. Это связано с сильной неоднородностью концентраций ММ в период повышенной водности и поступлением бассейновых фракций, насыщенных ММ, в поверхностные слои вместе с талыми водами.

Рассмотрение C_v для исследуемых проб позволяет получить представления о временной изменчивости концентраций элементов за разные периоды водности. Установлено, что максимальный средний C_v для фракции PM1 характерен для ловушек на р. Енисей (30%). Для р. Колыма наиболее сильно изменяются концентрации во фракции PM1-10 (30%). Ряды элементов по возрастанию C_v для фракции PM1 выглядят как: Ni < Co < Fe < Sr < U < W < Cr < V < Al < Cu < Cd < Cs < Zr < Mn < Sb < Pb < Sn < As < Mo < Zn (с 6 до 42%); для фракции PM1-10 как: Fe < Cr < V < Co < Al < Zr < Sr < Ni < Pb < Cs < W < Cu < U < Sb < Sn < Mo < Zn < Mn < Cd < As (с 11 до 59%). Наибольший C_v для валовой пробы характерен для Zn, As, Mo, Mn (>30%).

Кластерный и корреляционный ($p < 0.05$) анализ концентраций микроэлементов соответствует выделенным группам с повышенной и пониженной концентрацией в каждой их фракций. Для фракции PM1 определены ассоциации Al, Cs, As, Sb, Zr, Pb ($R^2 > 0.5$), Mn, Mo, Cd, U ($R^2 > 0.45$), Co, Ni, Cu ($R^2 > 0.6$). Для фракции PM1-10 можно выделить более устойчивые группировки 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 ($R^2 > 0.7$). В общей пробе выделяются Al, V, Fe, Cr ($R^2 > 0.5$), Co, Ni, Cu ($R^2 > 0.6$), Mn, Mo, Cd ($R^2 > 0.8$), Zn, U, Cs, Zr, As, Sb, Sn, Pb ($R^2 > 0.5$).

Для выявления зависимости содержания ММ от внешних условий был выполнен факторный анализ (рис. 6.3). В качестве критериев были выбраны модульный коэффициент водности K_t , средняя мутность (мг/л), TK_c , TEF , доля бассейновой фракции наносов. В результате, для фракции PM1 от K_t и мутности воды зависят концентрации Sr. От TK_c и TEF зависят большая часть ММ. От доли бассейновой фракции в пробе – Al, Pb. Во фракции PM1-10 также наиболее ярко проявляется зависимость ММ от TK_c и TEF . От остальных факторов зависят концентрации Sr и Zr. В валовой пробе возрастает доля элементов, зависящих от K_t и мутности. Это широко распространённые в крупных частицах Al, Fe, а также V, Cr. Также отмечается зависимость Zn, As, Sn, Sb, Cs, Pb, U от доли бассейновой фракции в пробе.

Таким образом, можно сделать вывод о концентрировании элементов Al, Fe, V, в крупных фракциях наносов, тогда как элементы, поступающие из основных пород и с техногенными взвесями (Zn, Zr, Mo, As, Sn, Sb, Cs, Pb, U) содержатся в более мелких фракциях, а их концентрации зависят от доли бассейновой фракции, входящей в пробу.

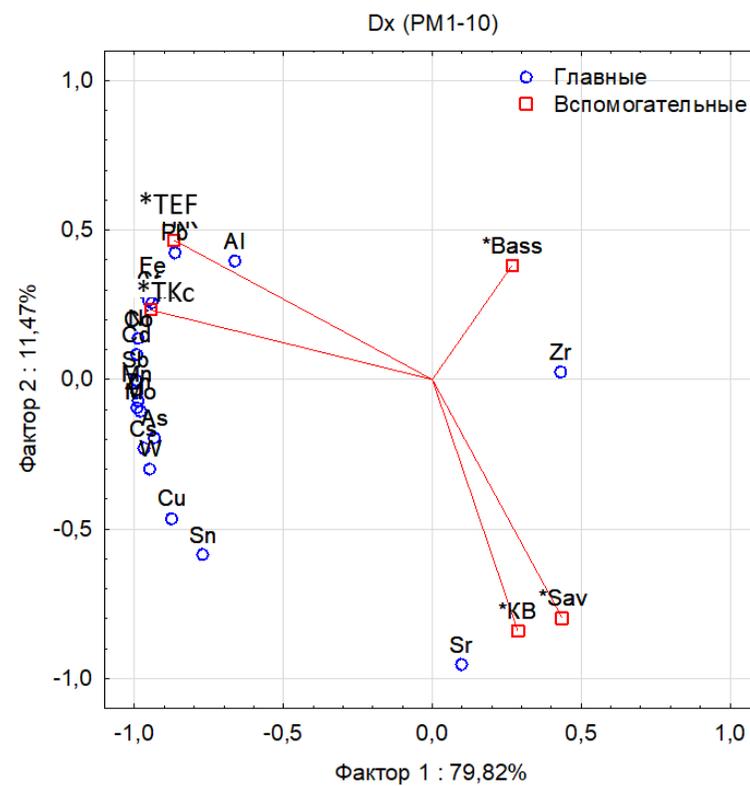
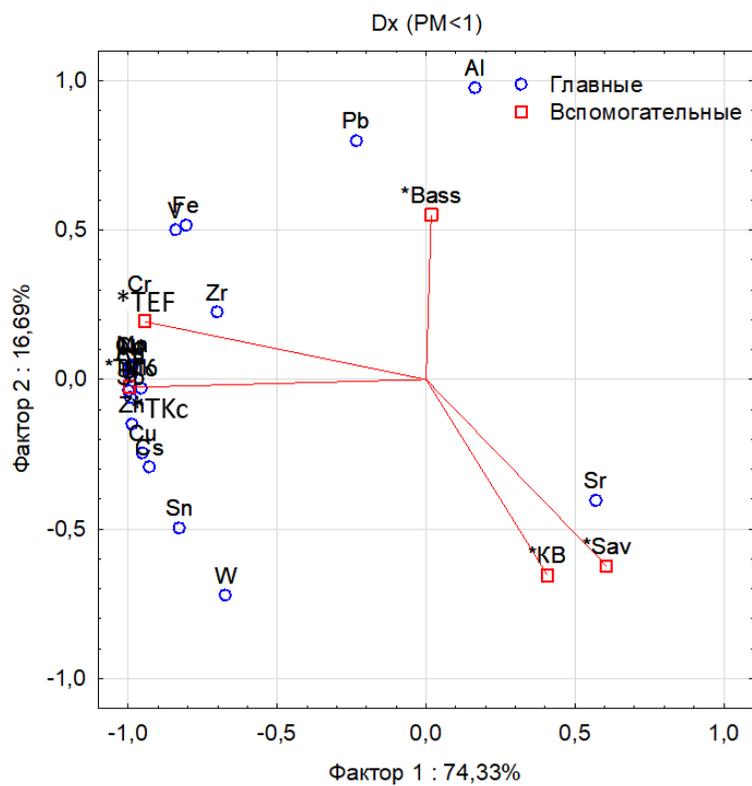


Рисунок 6.3. Факторный анализ химического состава фракций наносов PM1, PM1-10. *Km* – коэффициент водности, *TKc* – превышение коэффициентов концентрации, *TEF* – превышение коэффициента обогащения, *Sav* - средняя мутность, *Bass* - доля бассейновой фракции в пробе.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Химический состав взвешенных наносов обусловлен сложным сочетанием физических и химических процессов и зависит от крупности частиц. Отличия бассейнов по условиям формирования стока наносов определяют изменение крупности взвесей и дифференциацию рек по гранулометрическому составу, что приводит к закономерным отличиям содержания металлов и металлоидов, варибельности распределения их состава и соотношений доли растворенной и нерастворённой форм транспорта 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 вечномёрзлых 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 *Kk* 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, в нижнем течении сложенного основными горными породами.

5. Изменчивость концентраций ММ в пределах поперечного сечения каждой из рек в среднем 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). Измеренный 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 металлов и металлоидов 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.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- Алекин О.А. Сток растворенных веществ с территории СССР / О.А. Алекин, Л.В. Бражникова. – М.: Наука, 1964. – 144 с.
- Алексеевский Н.И. Формирование и движение речных наносов/ Н.И. Алексеевский. – М.: Моск. Гос. Ун-т, 1998. – 202 с.
- Атлас: морфодинамика устьевых систем крупных рек арктического побережья России / Геогр. факультет МГУ им. М. В. Ломоносова; Ин-т океанологии им. П. П. Ширшова РАН. — М.: АПР, 2017. —148 с.
- Барышников Н.Б. Динамика русловых потоков и русловые процессы. / Н.Б. Барышников, И.В. Попов - Л.: Гидрометеиздат, 1988. 454 с.
- Вадюнина А.Ф. Методы исследования физических свойств почв. (3-е изд., перераб. и доп.) / А.Ф. Вадюнина, З.А. Корчагина. —М.: Агропромиздат ., 1986. – 416 с.
- Великанов М.А. Движение наносов/ М.А. Великанов. – М.: изд-во Министерства Речного Флота СССР, 1948. – 210 с.
- Веницианов Е.В. Физико-химические основы моделирования миграции и трансформации тяжелых металлов в природных водах/ Веницианов Е.В., Лепихин А.П. (под науч. ред. Черняева А.М.) – Екатеринбург: РосНИИВХ, 2002.– 236 с.
- Геоэкологическое состояние Арктического побережья России и безопасность природопользования / Под ред. Н.И. Алексеевского // ГЕОС, 2007. – С. 416–440.
- Глазовская М.А. География почв с основами почвоведения/ М.А. Глазовская, А.Н. Геннадиев. – М.: изд-во МГУ, 1995. – 400с.
- Голосов В.Н. Эрозионно-аккумулятивные процессы в речных бассейнах освоенных равнин/ В.Н. Голосов. – М.: ГЕОС, 2006. – 296 с.
- Гордеев В.В. Геохимия системы река-море/ В.В. Гордеев. – М.: И.П. Матушкина И.И, 2012. – 452 с.
- Гордеев В.В. Система река - море и ее роль в геохимии океана / В.В. Гордеев – 2009. – 324 с.
- Гришанин К.В. Гидравлическое сопротивление естественных русел / К.В. Гришанин – Гидрометеиздат, 1992. – 183 с.

- Гусаров А.В. Основные закономерности соотношения русловой и бассейновой составляющих эрозии и стока взвешенных наносов в речных бассейнах северной Евразии / А.В. Гусаров -Геоморфология. – 2015. – № 4. – С. 3-20.
- Дедков А.П. Эрозия и сток наносов на Земле/ А.П. Дедков, В.И. Мозжерин. – Казань: Издательство Казанского университета, 1984. – 264 с.
- Демина Л.Л. Формы миграции тяжелых металлов в океане / Л.Л. Демина – М.: Наука – 1982. – 120 с.
- Демина Л.Л. Формы миграции тяжелых металлов в океане/ Л.Л. Демина. – М.: Наука, 1982. – 120 с.
- Добровольский В.В. Основы биогеохимии/ В.В. Добровольский – М.: Издательский центр «Академия», 2003. – 400 с.
- Долгополова Е.Н. Закономерности движения вод и наносов в устье реки эстуарно-дельтового типа на примере р. Енисей/ Е.Н. Долгополова// Вод. ресурсы. — 2015. — Т. 42, № 2. — С. 198—207. DOI: 10.7868/ S0321059615020054.
- Ерина О.Н. Накопление химических элементов в микрочастицах речной взвеси. / О. Н. Ерина, Г. Л. Шинкарева, М. А Терешина, Д. И. Соколов, В. А. Ефимов, С. Р. Чалов, Н. С.Касимов. // Эколого-экономическая безопасность горнопромышленных регионов: сборник научных статей (Екатеринбург, 2022) – Екатеринбург – 2022 – с. 91–106.
- Заславский М.Н. Эрозиоведение/ М.Н. Заславский. – М.: Высшая школа, 1983. – 320 с.
- Иванов В.В. Оценка стока и состава наносов р. Обь/ В.В. Иванов, С.Р. Чалов// Закономерности проявления эрозионных и русловых процессов в различных природных условиях. Материалы V Всероссийской научной конференции с международным участием. – 2019. – С. 219–222.
- Иванов В.В. Экологическая геохимия элементов Кн.1/ В.В. Иванов. –, М.: Недра, 1994. – 304 с.
- Иванов В.В. Экологическая геохимия элементов Кн.2/ В.В. Иванов. –М.: Недра, 1994. – 303 с.
- Иванов В.В. Экологическая геохимия элементов Кн.3/ В.В. Иванов. –М.: Недра, 1996. – 352 с.
- Иванов В.В. Экологическая геохимия элементов Кн.4/ В.В. Иванов. –М.: Экология, 1996. – 416 с.

- Иванов В.В. Экологическая геохимия элементов Кн.5/ В.В. Иванов. –М.: Экология, 1997. – 576 с.
- Иванов В.В. Экологическая геохимия элементов Кн.6 (малые и редкие элементы) / В.В. Иванов. – М.: Экология, 1997. – 607.
- Карандашев В.К. Использование метода масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой в элементном анализе объектов окружающей среды/ В.К. Карандашев, А.Н. Туранов, Т.А. Орлова, А.Е. Лежнев, С.В. Носенко, Н.И. Золотарева, И.Р. Москвина// Заводская лаборатория. – 2007. – № 1. – С. 12-22.
- Караушев А.В. Теория и методы расчётов речных наносов/ А.В. Караушев. – Л.: Гидрометеиздат, 1977 – 272 с.
- Касимов Н.С. Бассейновый анализ потоков веществ в системе Селенга–Байкал/ Н.С. Касимов, М.Ю. Лычагин, С.Р. Чалов, Г.Л. Шинкарева, М.П. Пашкина, А.О. Романченко, Е.В. Промахова// Вестник Московского университета. Серия 5. География. – 2016. – № 3. – С. 67–81.
- Касимов Н.С. Технофильность химических элементов в начале ххi века/ Н.С. Касимов, Д.В. Власов // Вестник Московского университета. Серия 5. География. – 2012. № 1. – С. 15 – 22.
- Касимов Н.С. Экогеохимия городов и рек Крыма (Труды Крымской комплексной экспедиции. Выпуск 1) / Н.С. Касимов, Л. А. Безбердая, М. Ю. Лычагин, А. Н. Ткаченко, М. А. Котвица, Е. В. Малыгин, О. В. Черницова. // Москва – 2022 384 с.
- Касимов Н.С. Экогеохимия ландшафтов/Н.С. Касимов. – М.: ИП Филимонов М.В, 2013. – 208 с.
- Коновалов Г.С.; Иванова А.А.; Колесников Т.Х. Растворенные и дисперсные формы микроэлементов в основных реках СССР. / Г.С. Коновалов, А.А. Иванова, Т.Х. Колесников // "Геохимия осадочных пород и руд"– Издательство "Наука": Москва, 1968 Т.5 с. 72-87.
- Крайнов С.Р. Гидрогеохимия/ С.Р. Крайнов, В.М. Швец. – М.: Недра, 1992 – 463 с.
- Крайнов С.Р. Геохимия подземных вод Теоретические, прикладные и экологические аспекты/ С.Р. Крайнов, Б.Н. Рыженко, В.М. Швец. – М: ЦентрЛитНефтеГаз, 2012. – 672 с.
- Лебедев А.Т. Масс-спектрометрия для анализа объектов окружающей среды/ А.Т. Лебедев. – Москва: Техносфера, 2013 – 632 с.

- Линник П.Н. Формы миграции металлов в пресных поверхностных водах/ П.Н. Линник, Б.И. Набиванец. – Л.: Гидрометеиздат, 1986. – 272 с.
- Лисецкий, Ф.Н. Современные проблемы эрозиоведения: монография / Ф.Н. Лисецкий, А.А. Светличный, С.Г. Черный; под ред. А.А. Светличного. – Белгород: Константа, 2012. – 456 с.
- Лозовик П.А. Аналитические, кинетические и расчетные методы в гидрохимической практике/ П.А. Лозовик, Н.А. Ефременко. – СПб.: Нестор-История, 2017. – 272 с.
- Лопатин Г.В. Наносы рек СССР/ Г.В. Лопатин – М.: Географгиз, 1952. – 366 с.
- Магрицкий Д.В. Гидрологические условия в устье реки Колымы летом 2019 года/ Д.В. Магрицкий, Н.Л. Фролова, С.А. Агафонова, В.А. Ефимов, А.Н. Василенко, А.А. Сазонов, Л.Е. Ефимова// Вестник Московского университета. Серия 5: География. – 2022. – № 1. – С.134–151.
- Магрицкий Д.В. Гидрологический режим нижней Оби в современных гидроклиматических условиях и под влиянием крупномасштабной водохозяйственной деятельности/ Д.В. Магрицкий, С.Р. Чалов, С.А. Агафонова, М.А. Кузнецов, Л.С. Банщикова// Научный вестник Ямало-Ненецкого автономного округа. – 2019. – Т. 1. – № 102. – С. 106–115.
- Магрицкий Д.В. Годовой сток взвешенных наносов российских рек водосбора Северного Ледовитого океана и его антропогенные изменения/ Д.В. Магрицкий // Вестник Московского университета. Серия 5: География. – 2010. – № 6. – С. 17–24.
- Магрицкий Д.В. Факторы и закономерности пространственной и многолетней изменчивости поступления речных наносов в моря Российской Арктики/ Д.В. Магрицкий // Вопросы географии. Сер. География полярных регионов. – 2016. – с. 444–466.
- Маккаев Н.И. Русло реки и эрозия в ее бассейне/ Н.И. Маккаев. – М.: изд-во МГУ, 1955. – 353 с.
- Министерство природных ресурсов и экологии Российской Федерации. Федеральное агентство водных ресурсов. – Автоматизированная информационная система государственного мониторинга водных объектов [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://gmvo.skniivh.ru/>
- Мур Д.В. Тяжелые металлы в природных водах/ Д.В. Мур , С. Рамамурти. – Москва: Изд-во Мир, 1987. – 250 с.
- Никаноров А.М. Гидрохимия/ А.М. Никаноров. – СПб.: Гидрометеиздат, 2010. — 444 с.

- Папина Т.С. Транспорт и особенности распределения тяжелых металлов в ряду: вода - взвешенное вещество - донные отложения речных экосистем: Аналит. обзор / Т.С. Папина. – ГПНТБ СО РАН; ИВЭП СО РАН. – Новосибирск: 2001. – 58 с.
- Перельман А.И. Геохимия ландшафта/ А.И. Перельман, Н.С. Касимов // М.: Астрель-2000, 1999. – 610 с.
- Поздняков Ш.Р. Наносы в реках, озерах и водохранилищах в расширенном диапазоне размера частиц: автореф. дис. ... докт. геогр. наук: 25.00.36/ Шамиль Рауфович Поздняков. – Спб., 2011. – 40 с.
- Россинский К.И. Речные наносы/ К.И. Россинский, В.К. Дебольский. – М.: Наука, 1980. – 214 с
- Савенко А.В. Микроэлементный состав вод устьевого участка р. Колымы /А. В. Савенко, В. С. Савенко, В. А. Ефимов, О. С. Покровский// Доклады Российской академии наук. Науки о Земле – 2023 – Т. 509 – № 2 –С. 272-275
- Савенко В.С. Химический состав взвешенных наносов рек мира/ В.С. Савенко. – М.: ГЕОС, 2006. –175 с.
- Савенко В.С. Экспериментальные методы изучения низкотемпературных геохимических процессов/ В.С. Савенко, А.В. Савенко. –Москва ГЕОС, 2009. – 303 с.
- СанПиН 2.1.4.1074-01: Питьевая вода. Гигиенические требования к качеству воды централизованных систем питьевого водоснабжения. Контроль качества. – Москва: МИНИСТЕРСТВО ЗДРАВООХРАНЕНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ, 2002.
- Толстихин О.Н. Вода и север/ О.Н. Толстихин, В.В. Шепелёв// Наука и техника в Якутии. – 2014. – №2. – 48–51 с.
- Томшин М. Д Траппы северо-востока Тунгусской синеклизы и Оленекского поднятия. Сравнительный анализ / М.Д. Томшин, А.Г. Копылова // Природные ресурсы Арктики и Субарктики – 2017– (4 (88)) – С. 22-28.
- Халяфян А.А. Statistica 6. Статистический анализ данных/ А.А. Халяфян. – М.: Бином, 2007. – 512 с.
- Чалов Р.С. Русловедение: теория, география, практика. Т.1: Русловые процессы: факторы, механизмы, формы проявления и условия формирования речных русел/ Р.С. Чалов. – М.: Издательство ЛКИ, 2008. – 608 с.

- Чалов С.Р. Влияние береговых едомных обнажений на сток наносов арктических рек/ С.Р. Чалов, В.М. Морейдо, К.Н. Прокопьева, В.А. Ефимов// Гидросфера. Опасные процессы и явления. – 2022 – 4(2) – С. 141–157.
- Чалов С.Р. Влияние береговых едомных обнажений на сток наносов арктических рек / С.Р. Чалов, В.М. Морейдо, К.Н. Прокопьева, В.А. Ефимов. // Гидросфера. Опасные процессы и явления – 2022 – Т. 4 – № 2 – С. 165–182.
- Чалов С.Р. Механический состав взвешенных наносов: классификации, характеристики, пространственная изменчивость/ С.Р. Чалов, В.А. Ефимов// Вестник Московского университета. Серия 5: География, – 2021(4). – С. 91–103.
- Чалов С.Р. Речные наносы в эрозионно-русловых системах: дисс. ... доктора географических наук: 25.00.27/ Сергей Романович Чалов. – М., 2021. – 374 с.
- Шамов Г.И. Речные наносы/ Шамов Г.И. – Л.: Гидрометеиздат, 1959. – 378 с.
- Шикломанов И.А., Водные ресурсы России и их использование /И.А. Шикломанов. – СПб.: Наука, 2008 – С. 210–215.
- Школьный Д.И. Инвентаризация россыпных разработок благородных металлов в бассейнах рек Дальнего Востока РФ: географическое распространение и воздействие на русловые системы/ Д.И. Школьный, С.Р. Чалов, В.А. Ефимов // Современные проблемы географии и геологии: Материалы IV Всероссийской науч.-практ. конференции с международным участием. — Т. 1. — Томский государственный университет Томск. – 2017. — С. 410–414.
- Эколого-географический атлас-монография Селенга-Байкал / Н.С. Касимов, Н.Е. Кошелева, М.Ю. Лычагин и др. — Географический факультет МГУ Москва, 2019. — 288 с.
- Янин Е.П. Русловые отложения равнинных рек (геохимические особенности условий формирования и состава)/ Е.П. Янин. – М.: ИМГРЭ, 2002. – 139 с.
- Abril J.M. Some Physical and Chemical Features of the Variability of Kd Distribution Coefficients for Radionuclides / J.M. Abril, E. Fraga // Journal of Environmental Radioactivity. – 1996. [https://doi.org/10.1016/0265-931X\(95\)00010-8](https://doi.org/10.1016/0265-931X(95)00010-8).
- Antonelli C. Suspended sediment and ¹³⁷Cs fluxes during the exceptional December 2003 flood in the Rhone River, southeast France/ C. Antonelli, F. Eyrolle, B. Rolland, M. Provansal, F. Sabatier// Geomorphology. – 2008. – Vol. 95. – № 3-4. – P. 350-360. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2007.06.007>.

- Aquatic chemistry: chemical equilibria and rates in natural waters. – 1996. *Choice Reviews Online*. – 33(11). – 33-6312-33–6312.
- Arctic Great Rivers Observatory [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://arcticgreativers.org/>
- Bezberdaya, L.A. Heavy metals and metalloids in soils, road dust, and their pm10 fractions in sebastopol: Levels, sources, and pollution risk/ L.A. Bezberdaya, N.S. Kasimov, O.V. Chernitsova, A.N. Tkachenko, M.Y. Lychagin// *Eurasian Soil Science*. – 2022. – 55. – 1871–1890.
- Blott J. S. GRDISTAT V9.1. 2020. [Электронный ресурс] – режим доступа https://www.researchgate.net/publication/277015584_GRADISTATv8/
- Bobrovitskaya N.N. Regional patterns in recent trends in sediment yields of Eurasian and Siberian rivers/ N.N. Bobrovitskaya, A.V. Kokorev, N.A. Lemeshko// *Global and Planetary Change*. – 2003. – p. 127-146. [https://doi.org/10.1016/S0921-8181\(03\)00021-3](https://doi.org/10.1016/S0921-8181(03)00021-3).
- Borrelli P. An assessment of the global impact of 21st century land use change on soil erosion/ P. Borrelli, D.A. Robinson, L.R. Fleischer, E. Lugato, C. Ballabio, C. Alewell, K. Meusburger, S. Modugno, B. Schütt, V. Ferro, V. Bagarello, K. Van Oost, L. Montanarella, P. Panagos // *Nature Communications*. – 2017. – Vol. 8. – № 1. – P. 2013. <https://doi.org/10.1038/s41467-017-02142-7>.
- Bouchez J. Grain size control of river suspended sediment geochemistry: Clues from Amazon River depth profiles / J. Bouchez, J. Gaillardet, C. France-Lanord, L. Maurice, P. Dutra-Maia // *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*. – 2011. – Vol. 12(3). – p. 1–24. DOI: 10.1029/2010GC003380.
- Bryzgalo, V.A., Ivanov, V.V., Runoff of dissolved chemicals at the outlet sections of rivers in the basins of Russian Arctic seas. Many-year and seasonal variations/ V.A. Bryzgalo, V.V. Ivanov// *Ekol. Khim.* – 2000. – vol. 9 – no. 2 – pp. 76–89.
- Černý M. Biogeochemical Monitoring in Small Catchments/Refereed papers from Biogeomon/ J.M. Černý, T. Novák, R. Pačes, W. Kelman // *The Symposium on Ecosystem Behaviour: Evaluation of Integrated Monitoring in Small Catchments held in Prague*. – 1993.
- Chalov S. Hydrodynamic controls of particulate metals partitioning along the lower Selenga river—main tributary of the lake Baikal/ S. Chalov, V. Moreido, E. Sharapova, L. Efimova, V. Efimov, M. Lychagin, N. Kasimov // *Water*. – 2020. – vol. 12(1345). – p. 1–17.

- Chalov S. R. Effects of placer mining on suspended sediment budget: case study of north of Russia's Kamchatka Peninsula / S. R. Chalov // *Hydrological Sciences Journal*, 2014 – 59:5 – p. 1081-1094 DOI: 10.1080/02626667.2014.903330
- Chalov S.R. Environmental and human impacts on sediment transport of the largest Asian rivers of Russia and China/ S.R. Chalov, S. Liu, R.S. Chalov// *Environ Earth Sci* 77 – 274 (2018). <https://doi.org/10.1007/s12665-018-7448-9>
- Chalov, S. Hydrodynamic controls of particulate metals partitioning along the lower Selenga River—main tributary of the lake Baikal/ S. Chalov, V. Moreido, E. Sharapova, L. Efimova, V. Efimov, M. Lychagin, N. Kasimov// *Water* – 2020 – 12(1345) – p. 1–17.
- Cohen S. Global suspended sediment and water discharge dynamics between 1960 and 2010: Continental trends and intra-basin sensitivity/ S. Cohen, A.J. Kettner, J.P.M. Syvitski // *Global and Planetary Change*. – 2014. – Vol. 115. – P. 44-58. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2014.01.011>.
- Dixon J.C. Contemporary solute and sedimentary fluxes in Arctic and subarctic environments: Current knowledge. In *Source-to-Sink Fluxes in Undisturbed Cold Environments* / J.C. Dixon // Cambridge University Press. – 2016. – p. 39–51
- Dolgoplova E.N. The role of permafrost in the formation of the hydrological and morphological regime of river mouths in the Arctic Ocean watershed area / E.N. Dolgoplova// *Arctic: ecology and economy*. – 2018. – no. 4(32). – pp. 70-85. DOI: 10.25283/2223-4594-2018-4-70-85.
- Efimov V.A. Impact of mining activities on the surface water quality (case study of khibiny mountains, russia)/ V.A. Efimov, S. R. Chalov, L.E. Efimova, V.A. Ivanov, J. Jarsjö, S. Fisher// *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* – 2018 - 263: C.1–8.
- Escube R. Iron isotope systematics in Arctic rivers / R. Escube, O.J. Rouxel, O.S. Pokrovsky, A. Schroth, M. R. Holmes, O.F.X. Donard. // *Comptes Rendus - Geoscience*. – 2015. – Vol. 347. – № 7-8. – P. 377-385. <https://doi.org/10.1016/j.crte.2015.04.005>.
- Fabre C. Assessment of sediment and organic carbon exports into the Arctic Ocean: The case of the Yenisei River basin/ C. Fabre, S. Sauvage, N. Tananaev, G. E. Noël, R. Teisserenc, J.L. Probst, J. M. S. Pérez// *Water Research*. – 2019. – 158. – p. 118–135.
- Friedman G.M. *Principles of Sedimentology* / G.M.Friedman, J.E. Sanders/ – NY.:Wiley & Sons Publ., 1978 – 792 p.

- Gaillardet J. Trace Elements in River Waters / J. Gaillardet, J. Viers, B. Dupre//Treatise on geochemistry. – Vol.5 – New York Elsevier Science, 2013. – p.195-232.
- Galimov E.M. Biogeochemistry of the Russian Arctic. Kara Sea: research results under the SIRRO Project, 1995–2003/ E.M. Galimov, L.A. Kodina, O.V. Stepanets, G.S. Korobeinik //Geochem. – 2006. – Int. 44 (11). – p. 1053– 1104.
- Gippel C.J. Potential of turbidity monitoring for measuring the transport of suspended solids in streams / C.J. Gippel// Hydrological Processes. – 1995. – Vol. 9. – № 1. – P. 83-97.
- Goldschmidt V. M. The principles of distribution of chemical elements in minerals and rocks./ V. M. Goldschmidt // The seventh Hugo Müller Lecture, delivered before the Chemical Society on March 17th, J. Chem. Soc., 1937. P.1-19
- Gordeev V.V. Fluvial sediment flux to the Arctic Ocean/ V.V. Gordeev // Geomorphology. – 2006. – 80. – 94–104 p.
- Gordeev V.V. Geochemical behavior of major and trace elements in suspended particulate material of the Irtysh river, the main tributary of the Ob river, Siberia / V.V. Gordeev, V. Rachold, I.E. Vlasova // Appl. Geochem – 2004 – 19 –p. 593–610.
- Gordeev V.V. River fluxes of dissolved and suspended substances/ V.V. Gordeev, V.V. Tsirkunov (Eds. V. Kimstach, M. Meybeck, E. Baroudy. London: E and fnspon) // A water quality assessment of the former Soviet Union. – 1998. – P. 311–350
- Gordeev, V.V. River Input of Water, Sediment, Major Elements, Nutrients and Trace Metals from Russian Territory to the Arctic Ocean/ V.V. Gordeev// The Freshwater Budget of the Arctic. – 2000. – p. 297–322.
- Gray J.R. Technological advances in suspended-sediment surrogate monitoring/ J.R. Gray, J.W. Gartner// Water Resources Research. – 2009. – Vol. 45. – № 4. <https://doi.org/10.1029/2008WR007063>.
- Gustafsson J.P. Chromium(III) complexation to natural organic matter: mechanisms and modeling / J.P. Gustafsson, I. Persson, A.G. Oromieh, J.W.J. van Schaik, C. Sjöstedt, D.B. Kleja// Environ Sci Techno. – 2014. – 48 – p.1753-1761.
- Gustafsson J.P. Visual MINTEQ 3.1 / J.P. Gustafsson // Stockholm: KTH, Department of Land and Water Resources Engineering. – 2014.
- Guy H.P. Laboratory theory and methods for sediment analysis/ H.P. Guy // Washington. – DC, USA: US G. P. O., 1969 – 58 p.

- Hinds W.C. Properties, Behavior, and Measurement of Airborne Particles/ W.C. Hinds // *Journal of Aerosol Science*, 1999. – vol. 14(2). – p. 175. DOI: 10.1016/0021-8502(83)90049-6.
- Holmes R. M. A circumpolar perspective on fluvial sediment flux to the Arctic Ocean/ R. M. Holmes, J. W. McClelland, B. J. Peterson, I. A. Shiklomanov, A. I. Shiklomanov, A.V. Zhulidov, N.N. Bobrovitskaya, // *Global Biogeochemical Cycles*. – 2002. – 16(4). – 14–45.
- Horowitz A.J. The relation of stream sediment surface area, grain size and composition to trace element chemistry/ A.J. Horowitz, K.A. Elrick// *Applied Geochemistry*. – 1987. – vol. 2(4). – p. 437–451. DOI:10.1016/0883-2927(87)90027-8.
- Hu Z. Upper crustal abundances of trace elements: A revision and update/ Z. Hu, S. Gao// *Chemical Geology*. – 2008. – Vol. 253 (3–4). – pp. 205–221.
- IUSS Working Group WRB. 2015. World Reference Base for Soil Resources 2014, update 2015 International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. – *World Soil Resources Reports*. – No. 106. – FAO, Rome, 2015. – 192 p.
- Ivanova, A.A.; Konovalov, G.S. On mechanical and mineralogical composition of suspended material of several rivers of the Soviet Union. / A.A/ Ivanova; S.G. Konovalov. // *Hydrochem. Mater.* 1971, 55, 79–89.
- Julien P.Y. Erosion and sedimentation, Second edition / P.Y. Julien Cambridge University Press, 2010. – 371 p.
- Kabata-Pendias A. Trace Elements in Abiotic and Biotic Environments (1st ed.) / A. Kabata-Pendias, B. Szteke. – CRC Press., 2015. – 468 p. <https://doi.org/10.1201/b18198>
- Kaus A. Regional patterns of heavy metal exposure and contamination in the fish fauna of the Kharaa River basin (Mongolia)/ Kaus A., Schäffer M., Karthe D., Büttner O., Tümping W. von, Borchardt D. // *Regional Environmental Change*. – 2017. <https://doi.org/10.1007/s10113-016-0969-4>.
- Knighton D. Fluvial forms and processes/ D. Knighton. – John Wiley & Sons inc., 1998. – 400p.
- Krickov I.V. Major and trace elements in suspended matter of western Siberian rivers: first assessment across permafrost zones and landscape parameters of watersheds / I.V. Krickov, A.G. Lim, R.M. Manasyrov, S.V. Loiko, S.N. Vorobyev, V.P. Shevchenko, O.M. Dara, V.V. Gordeev, O.S. Pokrovsky // *Geochimica et Cosmochimica Acta* – 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.gca.2019.11.005>
- Krickov I.V. Seasonal Variations of Mineralogical and Chemical Composition of Particulate Matter in a Large Boreal River and Its Tributaries / I.V. Krickov, A.G.Lim, V.P.Shevchenko,

- D.P. Starodymova, O.M. Dara, Y. Kolesnichenko, D.O. Zinchenko, S.N. Vorobyev, O.S. Pokrovsky. //Water – 2023 – 15 – 633. <https://doi.org/10.3390/w15040633>
- Langmuir D. Aqueous environmental geochemistry/ D. Langmuir. – Prentice-Hall, Inc., 1997 – 540p.
- Lewis J. Turbidity-Controlled Suspended Sediment Sampling for Runoff-Event Load Estimation/ J. Lewis // Water Resources Research. – 1996. – Vol. 32. – № 7. – P. 2299-2310. <https://doi.org/10.1029/96WR00991>.
- Lick W. Sediment and contaminant transport in surface waters. / W. Lick // CRC Press, 2008. – 398 p.
- Lupachev A. Polychemical pollution of surface waters and permafrost-affected soils in central and north Yakutia and in north-west Siberia / A. Lupachev, P. Danilov, M. Ksenofontova et al. // E3S Web of Conferences. — 2020. — Vol. 163. — P. 04005.
- Lupker M. A Rouse-based method to integrate the chemical composition of river sediments: Application to the Ganga basin/ M. Lupker, C. France-Lanord, J. Lavé, J.Bouchez, V. Galy, F. Métivier, J. Gaillardet, B. Lartiges, J.-L. Mugnier //J. Geophys. Res. – 2011. – vol. 116. – p.1–24. DOI: 10.1029/2010JF001947.
- Lychagin M. Surface water pathways and fluxes of metals under changing environmental conditions and human interventions in the selenga river system. / M. Lychagin, S. Chalov, N. Kasimov, G. Shinkareva, J. Jarsjö, J. Thorslund // Environmental Earth Sciences – 2017 – 76(1).
- Magritsky D. Changes in hydrological regime and morphology of river del- tas in the Russian Arctic. / Magritsky D., Mikhailov V., Korotaev V. et al. // IAHS- IAPSO-IASPEL Assembly. – 2013. – pp. 67—79.
- Makkaveev P.N. Hydrochemical characteristics of the waters in the western part of the Kara Sea/ P.N. Makkaveev, Z.G. Melnikova, A.A. Polukhin, S.V. Stepanova, P.V. Khlebopashev, A.L. Chultso // Oceanology. 2015. – 55 (4). – 485– 496 p.
- Makkaveev P.N. The distinguishing of the Ob and Yenisei waters in the Kara Sea in 1993 and 2007 / P.N. Makkaveev, P.A. Stunzhas, P.V. Khlebopashev // Oceanology. – 2010. – 50 (5). – 698 –705p.
- Malinovsky D. Aqueous transport and fate of pollutants in mining area: A case study of Khibiny apatite-nepheline mines, the Kola Peninsula, Russia. / D. Malinovsky, I. Rodushkin, T.

- Moiseenko, B. Öhlander // *Environmental Geology*. 43. 172-187. 10.1007/s00254-002-0641-9.
- Martin J-M. Elemental mass-balance of material carried by major world rivers/ J-M. Martin, M. Meybeck // *Marine Chemistry*. 1979. – Volume 7. – Issue 3. – p. 173-206.
- Meade R.H. Contaminants in the Mississippi River, 1987-92/ R.H. Meade // *US Geological Survey Circular*, 1995. – P. 140 p. <https://doi.org/10.3133/cir1133>.
- Meng J. Particulate phosphorus speciation and phosphate adsorption characteristics associated with sediment grain size/ J. Meng, Q. Yao, Z. Yu // *Ecological Engineering*. – 2014. – Vol. 70. – p. 140-145. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2014.05.007>
- Merkel B. J. Groundwater geochemistry (Second Edition): A practical guide to modeling of natural and contaminated aquatic systems/ B. J. Merkel., B. Planer-Friedrich., D. K. Nordstrom. – Springer Berlin Heidelberg, 2008. – pp. 1–230. <https://doi.org/10.1007/978-3-540-74668-3>
- Milliman J.D. River Discharge to the Coastal Ocean: A Global Synthesis/ J.D. Milliman, K.L. Farnsworth – Cambridge University Press, 2013. – Vol. 24. – № 4. – p. 143-160. <https://doi.org/10.5670/oceanog.2011.108>.
- Mossa J. Impacts of mining on geomorphic systems / J. Mossa, L.A. James, J. Shroder, L.A. James, C.P. Harden, J.J. Clague// *Treatise on Geomorphology. Geomorphology of Human Disturbances, Climate Change, and Natural Hazards*. – 2013. – vol. 13 – p. 74–95.
- Nikanorov, A.M. Reki Rossii, Ch. II, Reki Severa i Sibiri (Gidrokimiya i Hidroekologiya) (Russian Rivers. Part II. Rivers of the North and Siberia (Hydrochemistry and Hydroecology)) / A.M. Nikanorov, V.A. Bryzgalo, // Rostov-on-Don: – NOK, 2010.
- Nordstrom D.K. Modeling Low-Temperature Geochemical Processes/ Nordstrom D.K., Campbell K.M// *Treatise on Geochemistry, Second Edition*. – Vol. 7. – p. 27-68.
- Ollivier P.//Major and trace element partition and fluxes in the Rhône River/ P. Ollivier, O. Radakovitch, B. Hamelin // *Chemical Geology*. – 2011. – 285. – p. 15–31.
- Pokrovsky O. S. Biogeochemistry of carbon, major and trace elements in watersheds of northern Eurasia drained to the arctic ocean: The change of fluxes, sources and mechanisms under the climate warming prospective/ O.S. Pokrovsky, J. Viers, B. Dupré, Fr. Chabaux, J. Gaillardet, S. Audry, A.S. Prokushkin, L.S. Shirokova, S.N. Kirpotin, S.A. Lapitsky, V.P. Shevchenko// *Comptes Rendus - Geoscience*. – 2012. – No. 344. – p. 663–677.

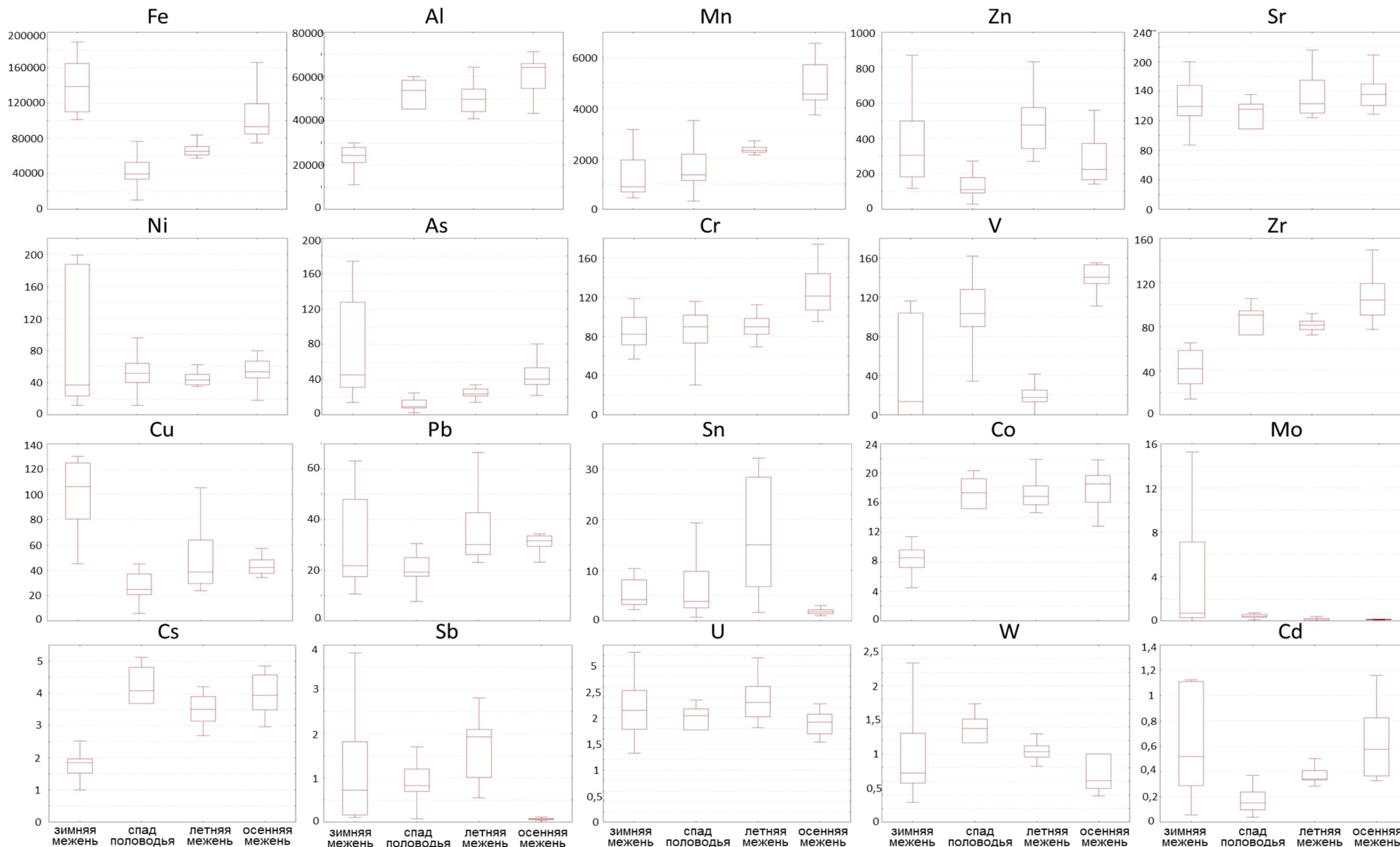
- Pokrovsky, O.S. River Suspended Matter (RSM) and particulate nutrients concentration in RSM of western Siberian rivers sampled in 2016. // 10.13140/RG.2.2.36650.93121.
- Poulton S. Surface area, iron oxid and organic carbon relationships in sediments / S. Poulton // *Geochemistry of the Earth's Surface: Proceedings of the 5th international conference.* – 1999. – P. 279-282.
- Robert A. River processes/ A. Robert. – NY: Oxford University press, 2003. – 224 p.
- Rouse H. Nomogram for the settling velocity of spheres/ H. Rouse // *Division of Geology and Geography, Exhibit D of the Report of the Comission on Sedimentation.* – 1937. – p. 1936-1937.
- Rudnick R.L. Composition of the continental crust / R.L. Rudnick,S. Gao // *Treatise on geochemistry.*– 2003 – Vol.3.– – P. 1-64.
- Savenko A.V. Pokrovsky O.S. Distribution of Dissolved Matter in the Yenisei Estuary and Adjacent Kara Sea Areas and Its Inter-Annual Variability/ A.V. Savenko, O.S. Pokrovsky // *Geochemistry International.* – 2019. – Vol. 57. – No. 11. – p. 1201–1212.
- Savenko A.V. New data on the concentrations of dissolved trace elements in waters of Russian arctic rivers/ A.V. Savenko , V.S. Savenko , O.S. Pokrovsky // *Doklady Earth Sciences.* — 2020. – Vol. 491. – No. 2. – P. 257–263.
- Shen H.W. Erosion and Sediment Transport/ H.W. Shen, P.Y. Julien // *Handbook of Hydrology,* 1993. – 61p.
- Shiklomanov L.A. Studying water sediment and contaminant runoff of Siberian rivers/ L.A. Shiklomanov, B.G. Skaklsky, // *Workshop on Arctic Contamination.* Anchorage, AK: Arctic Research of the United States. – 1994. – Vol. 8. – p. 295–306.
- Singh K.P. Studies on distribution and fractionation of heavy metals in Gomti river sediments - A tributary of the Ganges, India/ Kunwar P. Singh, Dinesh Mohan, Vinod K. Singh, Amrita Malik // *J. Hydrol.* – 2005. – Vol. 312. – Is. 1–4. – p 14-27.
- Soromotin A. Major, Trace and rare earth element distribution in water, suspended particulate matter and stream sediments of the Ob River Mouth / A. Soromotin, D. Moskovchenko, V. Khoroshavin, N. Prikhodko, A. Puzanov, V. Kirillov, M. Kovesnikov, E. Krylova, A. Krasnenko, A. Pechkin. // *Water* – 2022 –14 – 2442. <https://doi.org/10.3390/w14152442>
- Suspended sediment sources in British rivers / D.E. Walling, A.L.Collins // *Sediment Budgets 1 IAHS Publ.* – 2005. – Vol. 291. – № April. – P. 123-133.

- Sutherland R.A. Bed sediment-associated trace metals in an urban stream, Ohau Hawai. / R.A. Sutherland // *Environmental geology* – 2000 – Vol.39(6) – p.611-627
- Syvitski J.P. M. Sediment flux and the Anthropocene / Syvitski J.P.M., Kettner A. // *Phil. Trans. R. Soc. A.* – 2011. – Vol. 369. – P. 957-975. <https://doi.org/10.1098/rsta.2010.0329>.
- Thorslund J. Speciation and hydrological transport of metals in non-acidic river systems of the Lake Baikal basin: Field data and model predictions/ J. Thorslund, J. Jarsjö, T. Wällstedt, C.M. Mörth, M.Y. Lychagin, S.R. Chalov// *Regional Environmental Change.* – 2017. – Vol. 17. – № 7. – P. 2007–2021. <https://doi.org/10.1007/s10113-016-0982-7>.
- Tipping E. Colloids in the aquatic environment/ Tipping E. // *Chem. Ind.* – 1988. – Vol. 15. – p. 485–490.
- Viers J. Chemical composition of suspended sediments in world rivers: new insights from a new database/ J. Viers, B. Dupre, J. Gaillardet// *The Science of the Total Environment.* 2009. – 407. – p. 853–868.
- Vlasov D. Spatial distribution and sources of potentially toxic elements in road dust and its PM10 fraction of Moscow megacity/ D. Vlasov, N. Kosheleva, N. Kasimov// *Science of the Total Environment.* – 2021. – 761. – 143267.
- Walling D. 2006 Human impact on land–ocean sediment transfer by the world's rivers/ D. Walling // *Geomorphology.* – 2006. – 79 (3–4). – p. 192–216.
- Walling D. Recent trends in the suspended sediment loads of the world's rivers/ D. Walling, D. Fang // *Global and Planetary Change.* – 2003. – 39. – p.111– 126.
- Wentworth C. K. A scale of grade and class terms for clastic sediments. / C. K. Wentworth // *J. Geology* – 1922 – 30 – p.377-392.
- Wilkinson K.J. *Environmental Colloids and Particles: Behaviour, Separation and Characterisation*/ K.J. Wilkinson, J.R. Lead. – NY.: Wiley & Sons Publ., 2007. – 687 p. DOI: 10.1002/9780470024539.
- Zhang W. Magnetic normalization of particle size effects in a heavy metal pollution study of intertidal sediments from the Yangtze Estuary/ W. Zhang, L. Yu, S.M. Hutchinson // *Science in China, Series B: Chemistry.* – 2001. – Vol. 44. – № SUPPL.
- Zobkov M.B. *Microplastics in the Marine Environment: Review of Methods of Selection, Preparation and Analysis of Samples of Water, Sediments and Coastal Sediments*/ M.B. Zobkov, E.E. Esyukova // *Oceanology.* – 2018. – vol. 58. – no. 1. – p. 137–143. DOI: 10.1134/S0001437017060169.

ПРИЛОЖЕНИЕ I

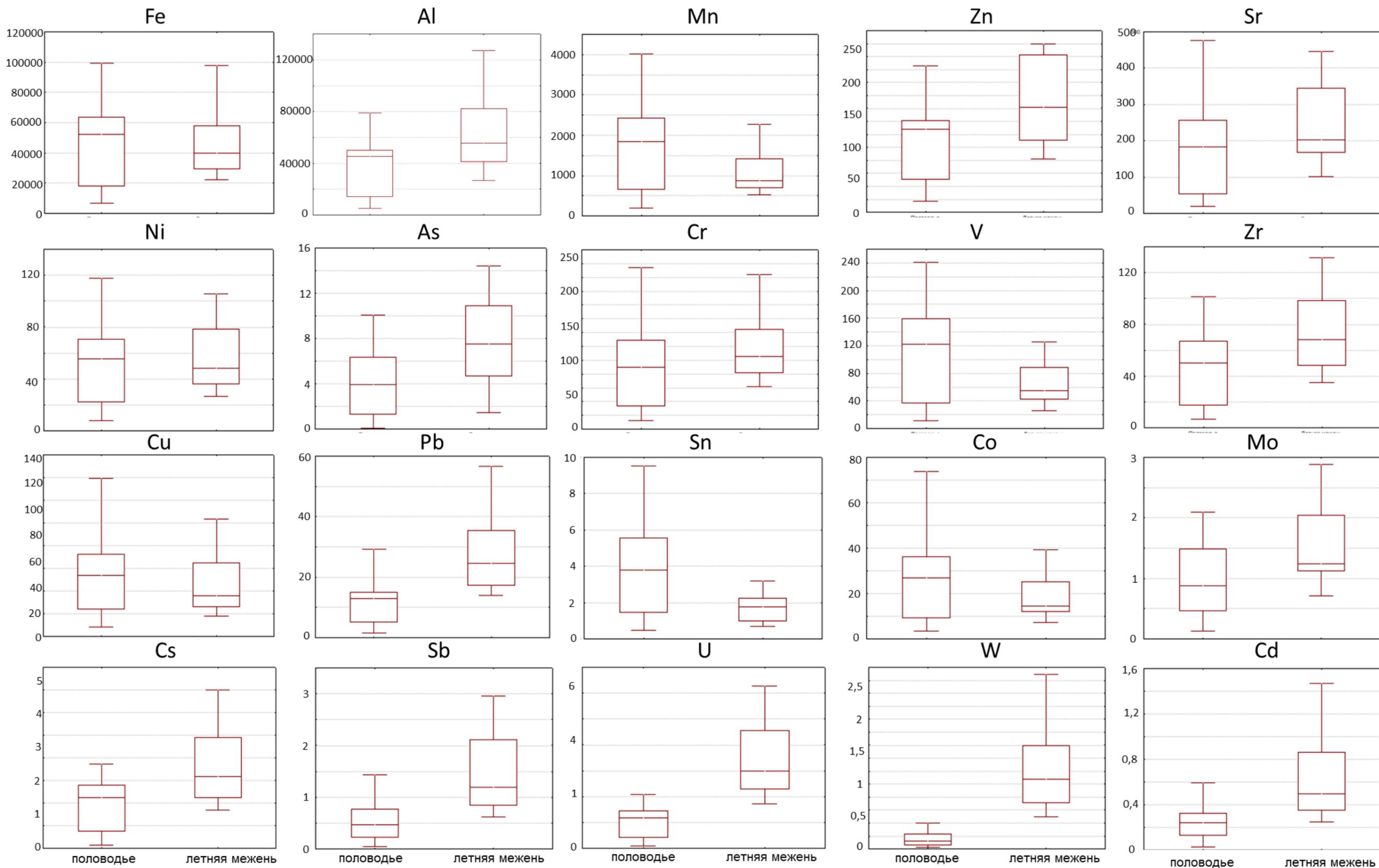
Диапазоны концентраций микроэлементов (мкг/г) в составе взвешенных наносов р. Обь

— Медиана
 □ 25%-75%
 | Диапазон без выбросов



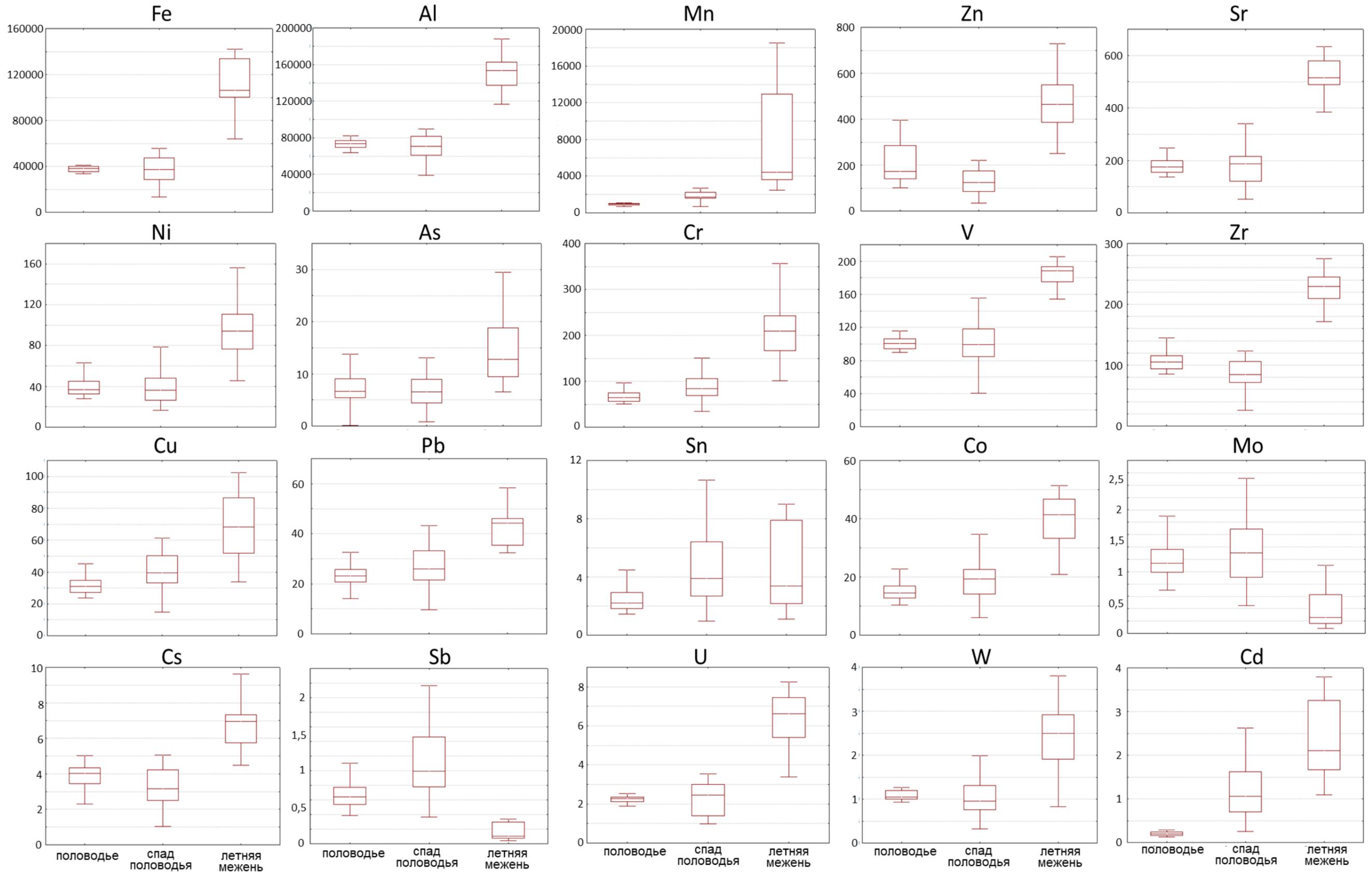
Диапазоны концентраций микроэлементов (мкг/г) в составе взвешенных наносов р. Енисей

— Медиана
 □ 25%-75%
 I Диапазон без выбросов



Диапазоны концентраций микроэлементов (мкг/г) в составе взвешенных наносов р. Лена

— Медиана
 □ 25%-75%
 I Диапазон без выбросов



Диапазоны концентраций микроэлементов (мкг/г) в составе взвешенных наносов р. Колыма

— Медиана
 □ 25%-75%
 I Диапазон без выбросов

