«СОВРЕМЕННЫЕ ГИДРОГЕОХИМИЧЕСКИЕ ПОТОКИ В ДЕЛЬТЕ ЛЕНЫ: ВЛИЯНИЕ КЛИМАТИЧЕСКИХ ИЗМЕНЕНИЙ И ДЕГРАДАЦИИ ВЕЧНОЙ МЕРЗЛОТЫ»

ГРАНТ РУССКОГО ГЕОГРАФИЧЕСКОГО ОБЩЕСТВА

ДОГОВОР № 02/2024-И ОТ 02.07.2024

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

ИСПОЛНИТЕЛИ ПРОЕКТА



Здесь и далее – фото участников экспедиции

Лычагин Михаил Юрьевич (к.г.н, доцент географического факультета МГУ) – руководитель проекта
Магрицкий Дмитрий Владимирович (к.г.н., доцент географического факультета МГУ)
Чалов Сергей Романович (д.г.н., профессор географического факультета МГУ, зав. НИЛ эрозии почв и русловых процессов)
Ефимов Василий Антонович (к.г.н., м.н.с. географ. ф-та МГУ)
Тришин Андрей Юрьевич (инженер географ. ф-та МГУ)
Прокопьева Кристина Николаевна (аспирант ИВП РАН)
Прилипова Елена Сергеевна (аспирант географ. ф-та МГУ)
Крамаренко Владислав Андреевич (аспирант географ. ф-та МГУ)
Сафина Алина Сергеевна (студентка географ. ф-та МГУ)
Лошков Олег Дмитриевич (студент географ. ф-та МГУ)
Конева Ульяна Александровна (студентка географ. ф-та МГУ)
Овчинникова Ольга Викторовна (студентка географ. ф-та МГУ)

АКТУАЛЬНОСТЬ И НОВИЗНА

- Дельты рек – это области трансформации материкового стока, служащие естественными регуляторами гидрогеохимических потоков веществ в приемные моря и океаны. В крупнейшей арктической дельте р. Лены в условиях регистрируемого роста температур воздуха, имеющего максимальные темпы для территории России, русловая эрозия, термоэрозия и термоденудация вызывают разрушение грунтов, что приводит к трансформации гидрогеохимических потоков растворенных и взвешенных веществ, усилению выноса веществ, депонированных в многолетнемерзлых породах и поступающих с территории речного бассейна. Изучение этих процессов является актуальной научной проблемой, важной для оценки последствий изменений климата в Арктике и определения влияния процессов, протекающих в крупнейших дельтах, на глобальные биогеохимические циклы веществ.
- В 2000-х гг. существенно возросло число публикаций, посвященных дельте р. Лены. Значительные результаты были получены в рамках российско-немецкой экспедиции. В то же время особенности пространственной дифференциации содержаний большинства потенциально токсичных элементов, соотношения форм их переноса в водах дельты Лены, количественные характеристики потоков металлов и металлоидов остаются малоизученными.

ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ ПРОЕКТА

Цель проекта – количественная оценка гидрогеохимических потоков веществ в дельте реки Лены, анализ их трансформации в условиях увеличения температуры воздуха и деградации многолетнемерзлых пород, обусловленной потеплением.

ЗАДАЧИ

- анализ факторов формирования гидрогеохимических потоков в дельте Лены, в том числе изменений температуры воздуха и количества осадков во второй половине XX - начале XXI в., по данным реанализа ERA5-Land и интенсивности размывания берегов дельтовых проток;

- выявление закономерностей распределения количества взвешенных и влекомых наносов по длине проток дельты Лены в связи с особенностями водного стока и интенсивностью деградации грунтов, количественная характеристика трансформации потоков взвешенных веществ по данным дистанционного зондирования из архивов съемочных систем Landsat и Sentinel за период с 2000 г. по настоящее время, расчет балансов взвешенного вещества, определение объемов накопления и выноса взвесей, а также многолетних тенденций изменения этих характеристик;

- количественная характеристика концентраций и потоков органического вещества, металлов и металлоидов в растворенной и нерастворенной форме, выявление тенденций их изменения.

МАРШРУТ ЯКУТСК-ТИКСИ
31 ИЮЛЯ – 3 АВГУСТА



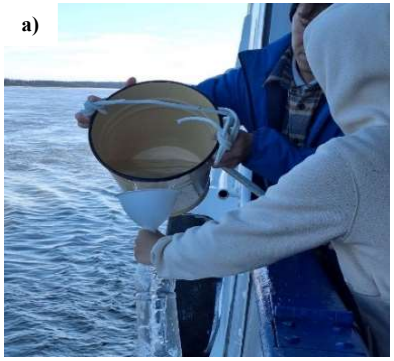
Теплоход «Механик Кулибин»

а) Отбор проб воды с борта теплохода «Механик Кулибин»;

б) Измерение мутности воды;

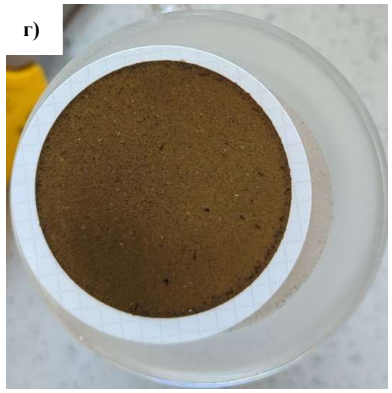
в) Вакуумные фильтровальные установки Millipore

г) Мембранный фильтр со взвесью (фото А.Сафиной и Е.Прилиповой)





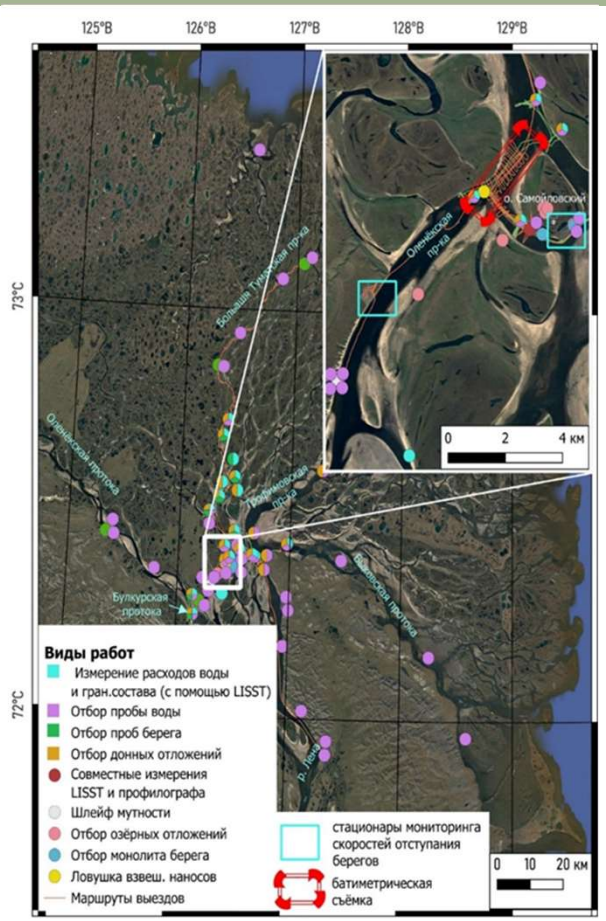




ЭКСПЕДИЦИОННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ В ДЕЛЬТЕ ЛЕНЫ



а - полярная станция им. Хабарова;
б - НИС «Остров Самойловский»;
в - метеостанция на о. Самойловском;
г – вид на НИС «Остров Самойловский с БПЛА



Полевые исследования в дельте Лены проводились с 3 по 16 августа 2024 г. в основном в центральной ее части, с полным прохождением Главного русла Лены, Быковской и Большой Туматской проток. Общая протяженность рабочих водных маршрутов составила около 770 км.

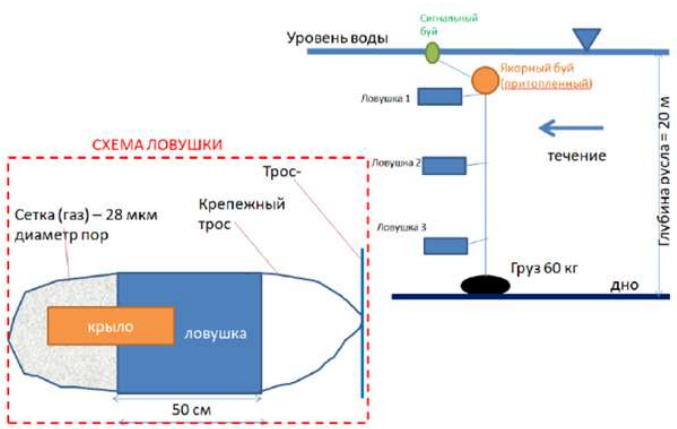
ПОЛЕВЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ
ОСТРОВ САМОЙЛОВСКИЙ







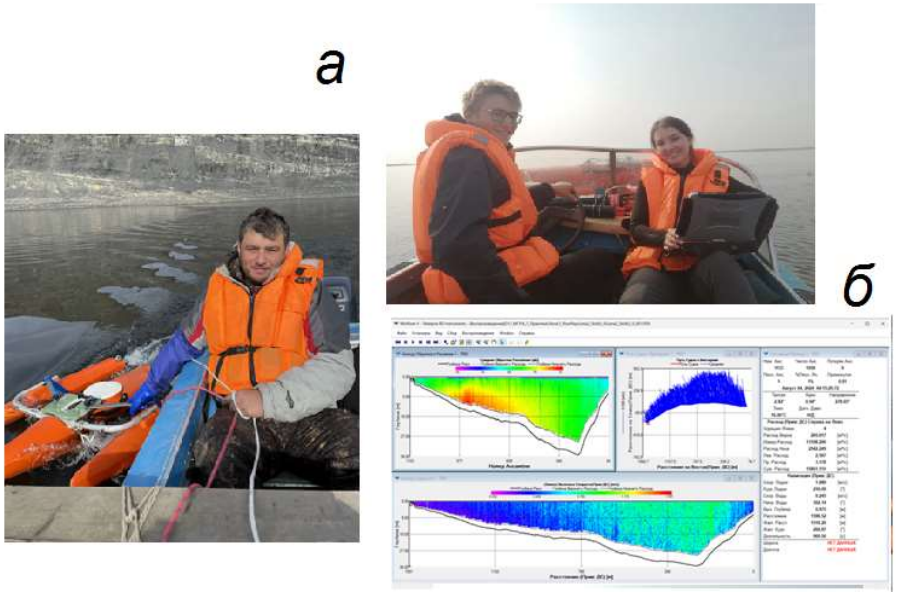
Временный водомерный пост на о. Самойловский, оборудованный погружным датчиком Hobo измерения уровня и температуры воды и размеченной водомерной рейкой. Общее число измерений – 53. Отбор проб воды.



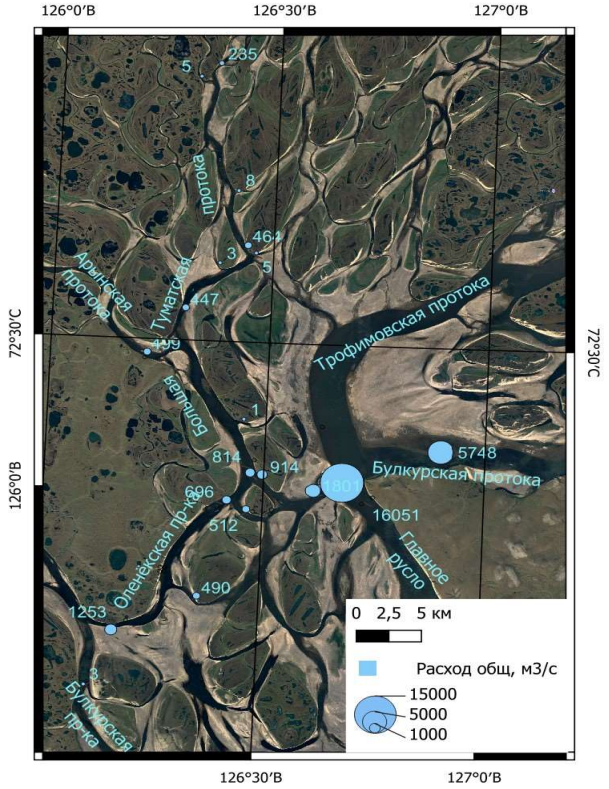


Установка авторской зонда-ловушка (патент № 201927 от 29.05.2020 г.) для сбора взвешенных наносов на трех глубинных горизонтах выше истока Оленекской протоки к юго-западу от о. Самойловский

ИЗМЕРЕНИЕ РАСХОДОВ ВОДЫ И СКОРОСТЕЙ ТЕЧЕНИЯ С ПОМОЩЬЮ АКУСТИЧЕСКОГО ДОПЛЕРОВСКОГО ПРОФИЛОГРАФА ТЕЧЕНИЙ



Измерение расходов воды в дельте Лены (*а*) и пример выдаваемых программой WinRiver II данных (*б*)



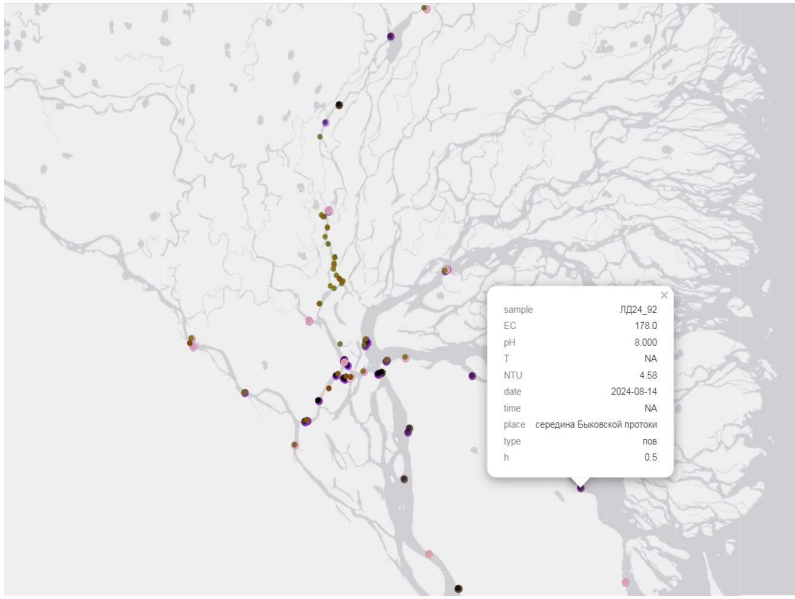
Положение гидростворов в августе 2024 г. с указанием расхода воды

ОТБОР ПРОБ ВОДЫ, РЕЧНОЙ ВЗВЕСИ И ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЙ





Отбор проб воды на мутность на НИС «о.Самойловский» и во время полевого маршрута



Точки отбора проб воды на мутность и образцов донных отложений

ИЗМЕРЕНИЕ ОБЪЕМНОЙ МУТНОСТИ И РАЗМЕРА ВЗВЕШЕННЫХ ЧАСТИЦ С ПОМОЩЬЮ ПОГРУЖНОГО ЛАЗЕРНОГО ДИФРАКЦИОННОГО АНАЛИЗАТОРА ВЗВЕСЕЙ LISST-200X







Вид LISST-200X и работа с ним «на воде» в августе 2024 г.



Место установки ADCP и LISST (красная стрелка) в Оленёкской протоке дельты Лены.
Место отбора проб воды и наблюдений за температурой воды отмечено жёлтой стрелкой.
Направление течения указано белой стрелкой

ИЗУЧЕНИЕ ШЛЕЙФА МУТНЫХ ВОД РУЧЬЯ, СТЕКАЮЩЕГО С ЕДОМНОГО КОМПЛЕКСА НА БЕРЕГУ О. КУРУНГНАХ



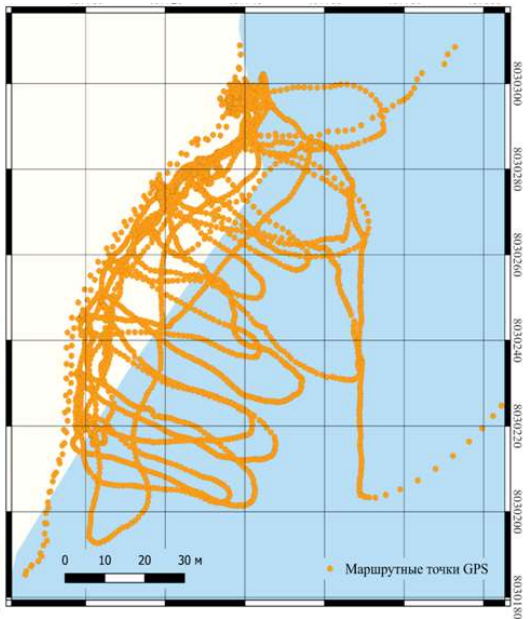




Местоположение и вид ручья на берегу Оленекской протоки и о.Курунгнах







Измерения в устье ручья на о.Курунгнах с картосхемой треков

ОТБОР ПРОБ ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЙ И БЕРЕГОВОГО ГРУНТА





Отбор проб донных наносов ковшом, их упаковка и маркировка

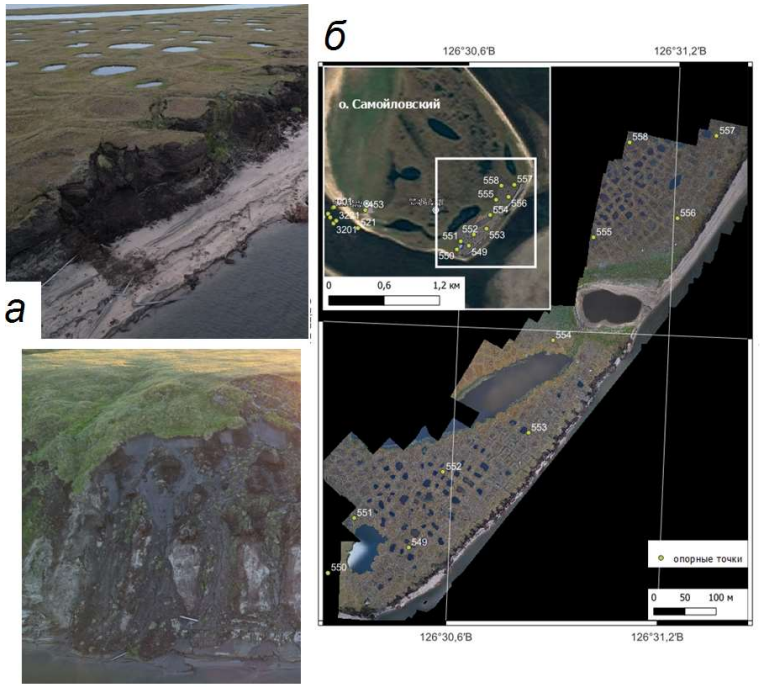




Отбор проб береговых отложений и их раскладка по контейнерам (в лаборатории) перед сушкой в сушильном шкафу

ИЗУЧЕНИЕ ТЕРМОЭРОЗИОННЫХ БЕРЕГОВ





Организация стационаров на термоабразионных берегах (а) и ортофотоплан берегов по результатам аэрофотосъемки с помощью БПЛА (б)

ЛАБОРАТОРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

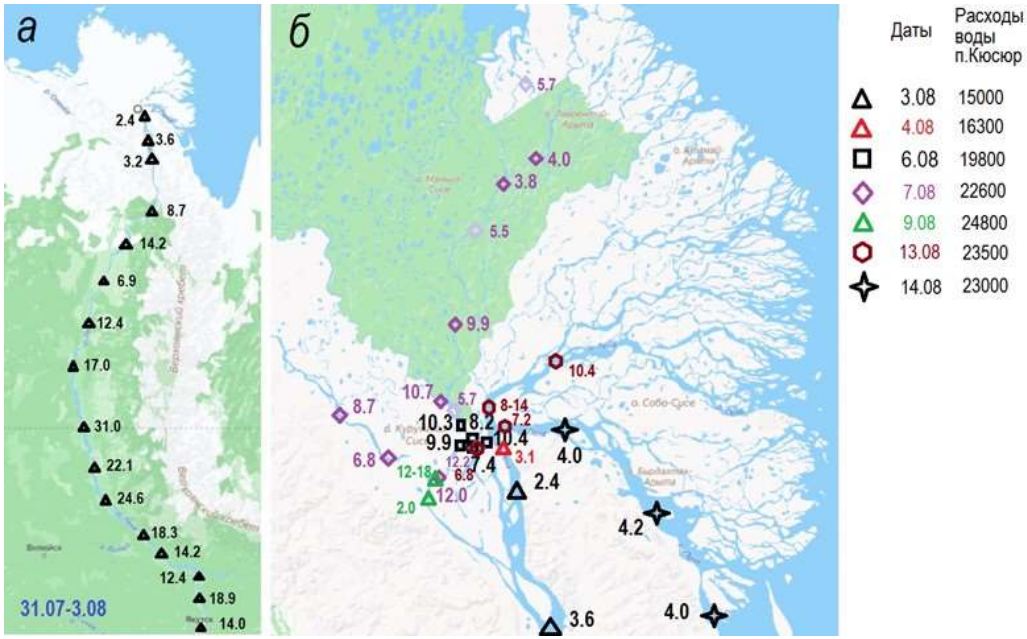


Фильтрование проб речных вод в лаборатории НИС «Остров Самойловский»

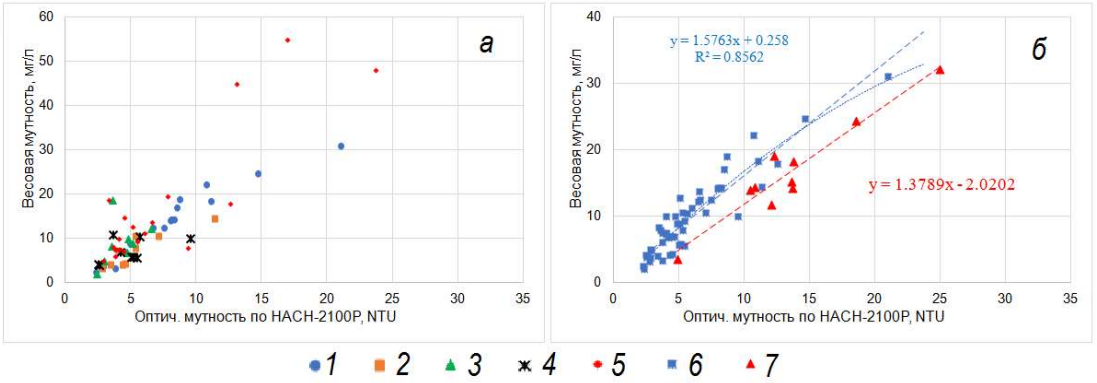
- Фильтрование проб речных вод
- Определение pH и электропроводности
- Определение ионного состава речных вод
- Определение содержания широкого комплекса химических элементов в компонентах аквасистем методом ICP-MS, ICP-AES
- Определение содержания органического углерода в воде, речной взвеси и донных отложениях
- Анализ гранулометрического состава речной взвеси методом лазерной гранулометрии на приборе «Analysette 22 comfort»

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

ПРОСТРАНСТВЕННАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ МУТНОСТИ РЕЧНЫХ ВОД И ВЗВЕШЕННЫХ НАНОСОВ

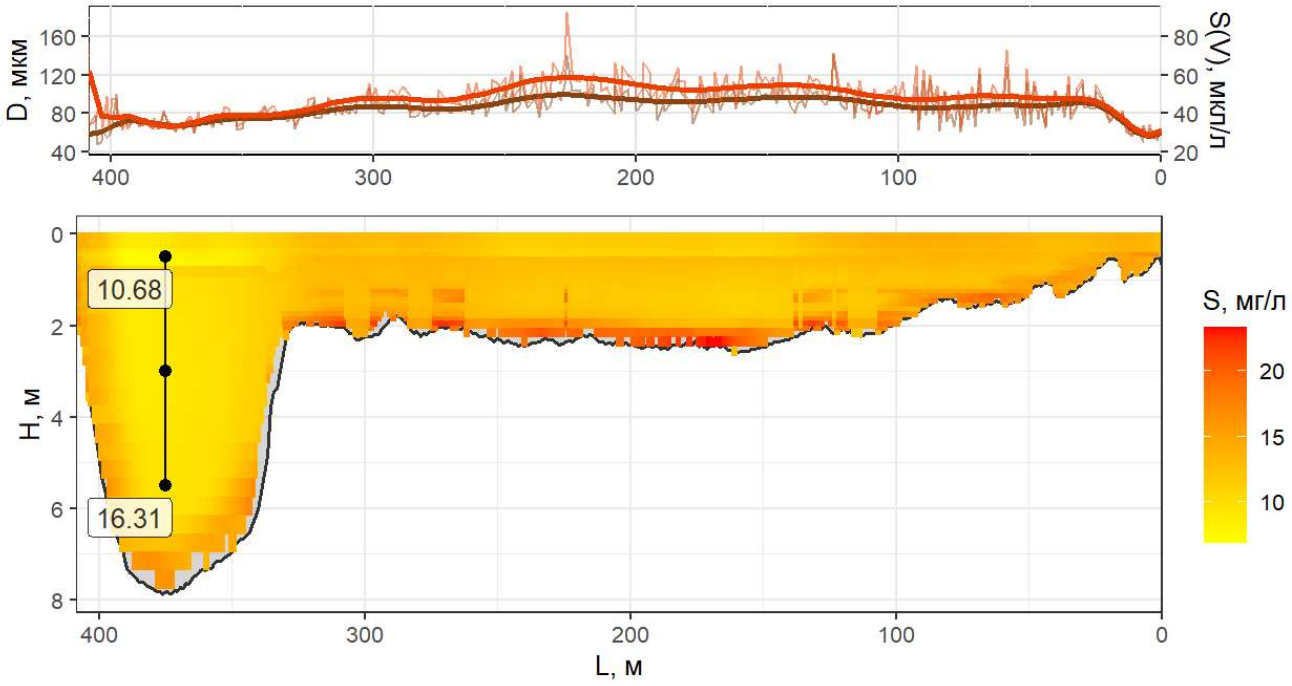


Распределение мутности воды (мг/л) в дельте Лены по измерениям с 3 по 14 августа 2024 г., с указанием расходов воды ($м^3/с$) на посту Кюсюр в даты отбора проб воды



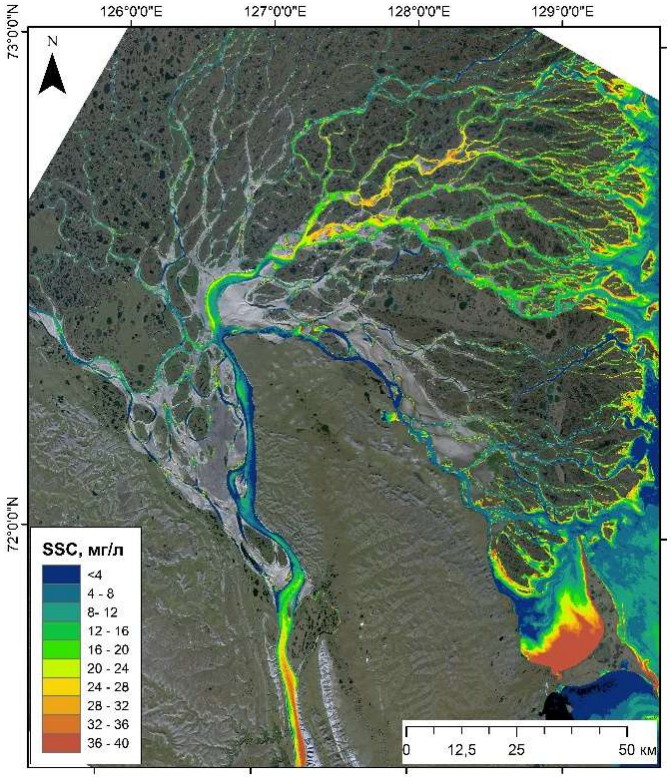
Зависимости между оптической и весовой мутностью речных вод по данным измерений в августе 2024 г. и поверхностном слое:
1 – для р. Лена (31.07-3.08),
2 – для рукавов основного узла разветвления в дельте (Главного русла, верхних участков Трофимовской, Быковской, Оленекской и Туматской проток),
3 – для системы Оленекской протоки,
4 – для системы Туматской протоки,
5 – по данным измерений на посту о.Самойловский,
6 – объединенные данные (с отбраковкой значений с влиянием сторонних факторов),
7 – данные за 2022 г.

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ВЗВЕСЕЙ И МУТНОСТИ ПО ГЛУБИНЕ И ШИРИНЕ ПОТОКА



Изменение среднего диаметра взвесей, мкм, (коричневая линия) и объемной мутности, мкл/л (красная линия) в поверхностном слое по ширине русла (верхний график) и распределение мутности воды в поперечном створе с указанием линии дна и измеренной мутности на вертикали (нижняя диаграмма) по данным обработки эхограмм ADCP (б) и измерений LISST (а) в протоке Арынская 7 августа 2024 г.

ПОСТРОЕНИЕ КАРТ МУТНОСТИ ВОДЫ НА ОСНОВЕ СИНТЕЗА НАТУРНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ И ДАННЫХ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ



Распределение мутности воды (SSC) в дельте реки Лены по итогам обработки спутникового снимка Landsat 8 от 15 августа 2024 г.

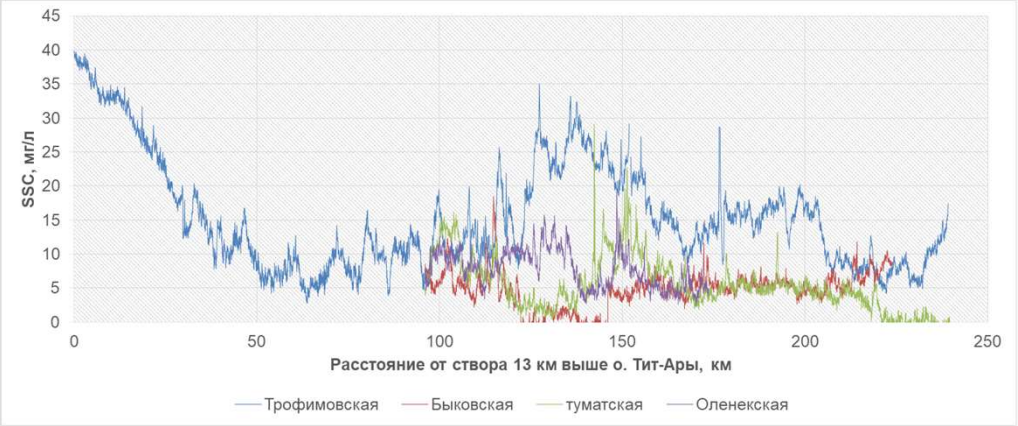


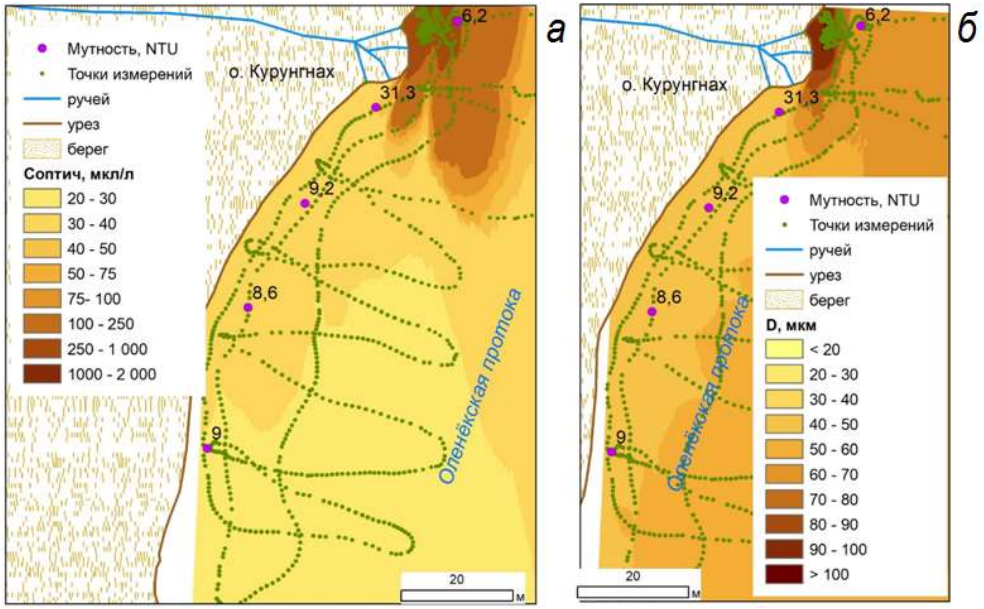
График продольного изменения SSC по итогам обработки спутникового снимка Landsat 8 от 15 августа 2024 г.

ЭКСПЕРИМЕНТ ПО ОЦЕНКЕ ВКЛАДА ТЕРМОЭРОЗИОННЫХ ПРОЦЕССОВ В МУТНОСТЬ РЕЧНЫХ ВОД НА РУЧЬЕ - О. КУРУНГНАХ



Берег и прибрежная зона о. Курунгнах на участке проведения эксперимента (аэрофотосъемка с БПЛА)

ТЕРМОАБРАЗИЯ БЕРЕГОВ - ИСТОЧНИК ПОСТУПЛЕНИЯ РАСТВОРЕННЫХ И ВЗВЕШЕННЫХ ФОРМ ЭЛЕМЕНТОВ



Картосхемы распределения взвешенных наносов ручья (относительной мутности (а) и среднего диаметра взвесей (б)) в Оленекской протоке с указанием треков измерений и точек отбора проб

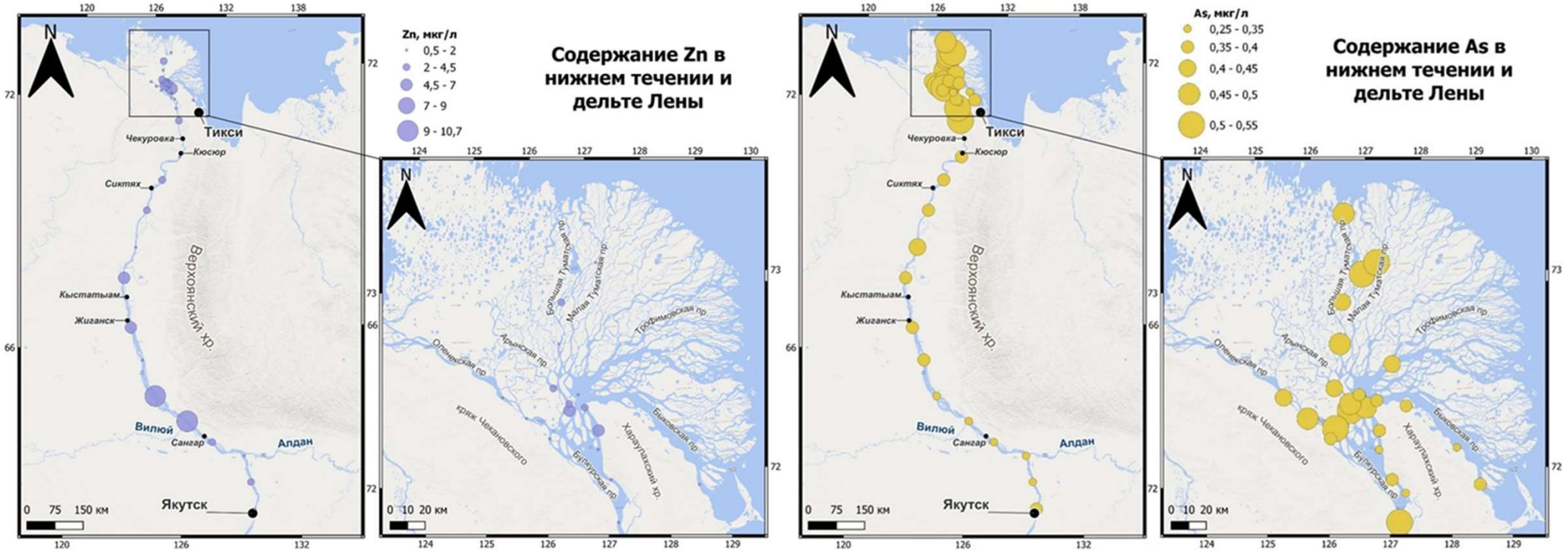
Содержание металлов и металлоидов в ручье

	Fe	Mn	V	Cu	Zn	Pb	Cd	As	Sb	Mo	W
Растворенные формы, мкг/л											
Ручей с ледника (северная часть о. Курунгнах-Сисё)	429,6	928,9	3,2	3,1	10,3	0,2	0,01	4,4	0,4	1,6	0,03
Фоновые уровни	4,9	0,50	0,40	1,10	3,10	0,03	0,003	0,30	0,1	0,4	0,01
Коэффициент накопления	87,7	1857,8	7,9	2,8	3,3	5,5	4,8	14,5	4,1	4,1	5,0
Взвешенные формы, мкг/г											
Ручей с ледника (северная часть о. Курунгнах-Сисё)	55287,7	1007,7	147,4	29,2	121,6	28,5	0,2	7,0	0,8	0,9	1,4
Фоновые уровни	39274,0	1971,8	97,1	32,0	133,9	31,3	0,4	5,6	2,3	1,4	1,3
Коэффицент накопления	1,4	0,5	1,5	0,9	0,9	0,9	0,5	1,2	0,3	0,6	1,1

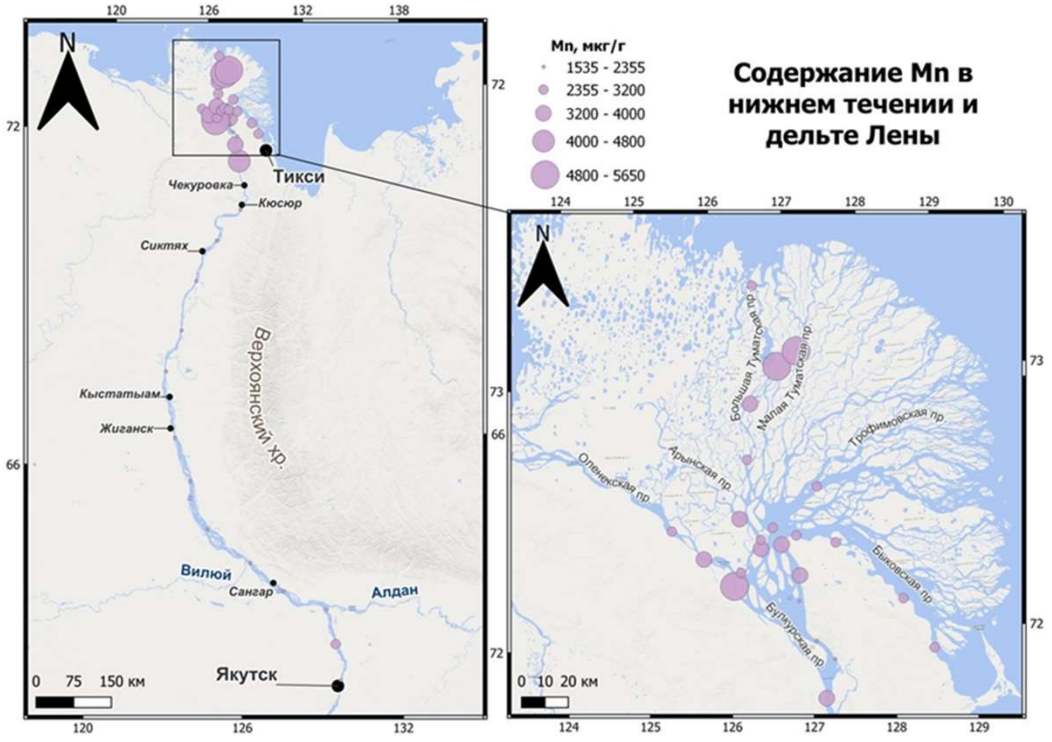


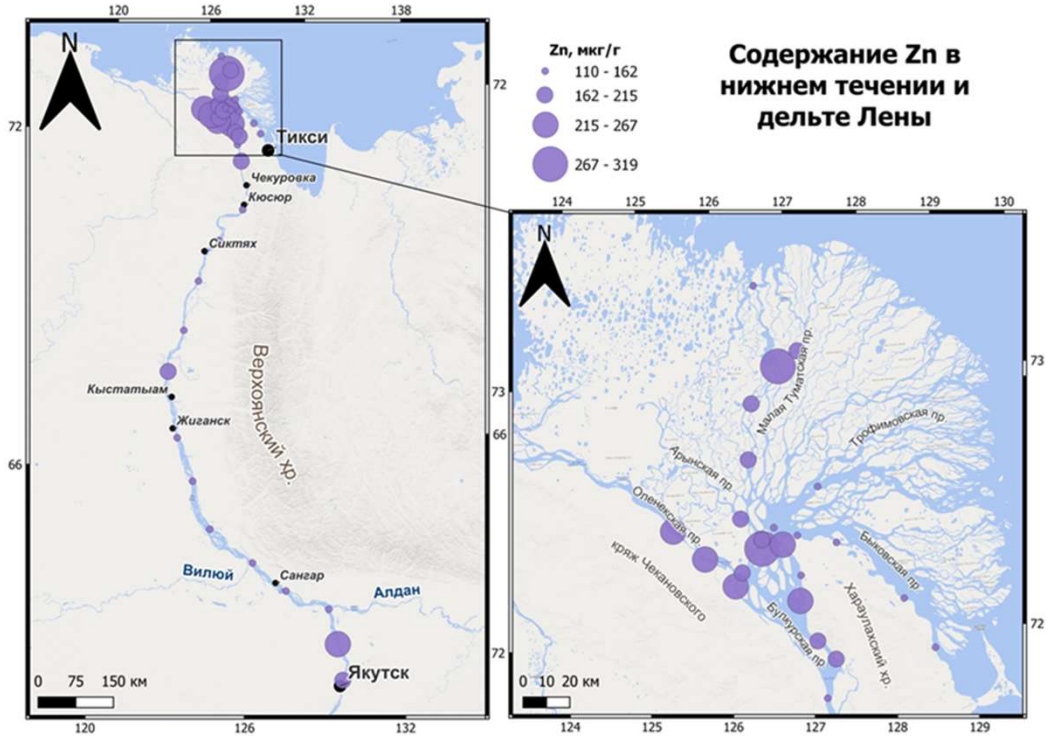
Коэффициенты накопления металлов и металлоидов

УРОВНИ СОДЕРЖАНИЙ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ И МЕТАЛЛОИДОВ РАСТВОРЕННЫЕ ФОРМЫ

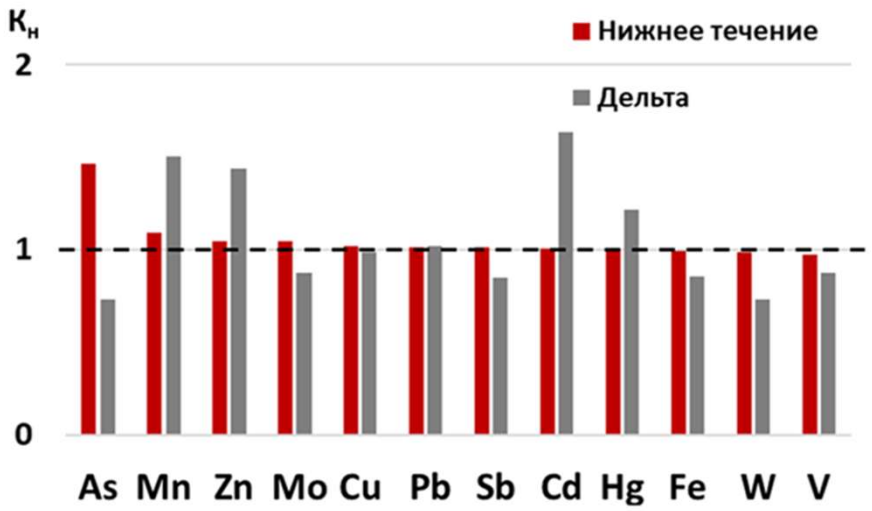


УРОВНИ СОДЕРЖАНИЙ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ И МЕТАЛЛОИДОВ ВЗВЕШЕННЫЕ ФОРМЫ

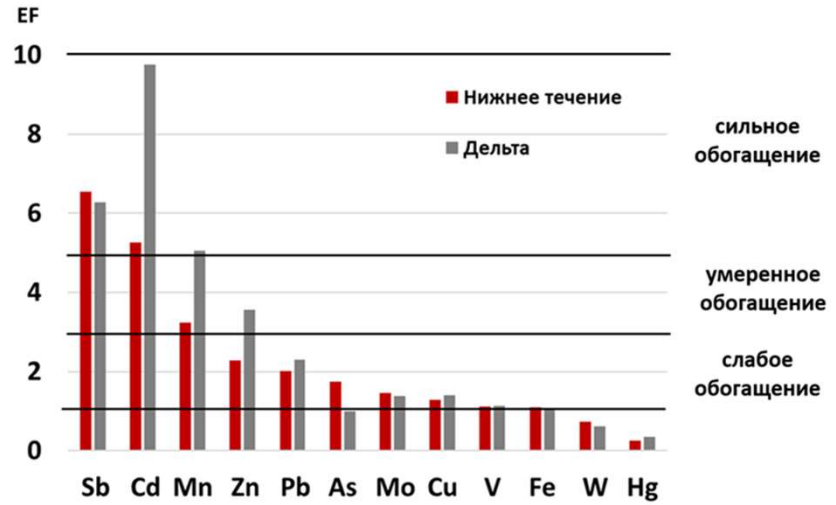




ОЦЕНКА УРОВНЯ ЗАГРЯЗНЕНИЯ РЕЧНОЙ ВЗВЕСИ ТЯЖЕЛЫМИ МЕТАЛЛАМИ И МЕТАЛЛОИДАМИ



Коэффициенты накопления взвешенных форм ТММ относительно фона



Коэффициенты обогащения речной взвеси металлами и металлоидами

ПОТОКИ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ И МЕТАЛЛОИДОВ РАСТВОРЕННЫЕ ФОРМЫ, КГ/СУТ

Протока	Fe	Cu	Zn	V	Mo	As	Cr	Ni	Mn	Sb
Главное русло (о. Тит-Ары)	4383	1617	1255	836	604	576	566	438	314	89
Главное русло (о. Столб)	4383	1678	3038	913	570	746	566	438	464	107
Большая Трофимовская	2831	816	1115	699	468	438	365	283	281	44
Быковская	1087	281	217	228	167	153	140	109	90	13
Большая Туматская (о. Ырбалах-Арыта)	197	73	127	48	31	35	25	31	53	4,9
Большая Туматская (о. Кучча-Арыта и ниже)	44	16	17	10	6,5	8,5	5,7	4,5	4,4	4,1
Арынская	87	39	101	20	13	16	11	10	8,7	9,2
Оленекская	204	85	140	45	29	39	26	20	18	5,2
Булкурская	3,6	1,5	1,4	0,4	0,3	0,6	0,5	0,4	0,2	0,06

ПОТОКИ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ И МЕТАЛЛОИДОВ ВЗВЕШЕННЫЕ ФОРМЫ, КГ/СУТ

Протока	**Fe**	**Mn**	**Zn**	**V**	**Cr**	**Ni**	**Cu**	**As**	**Sb**	**Mo**
Главное русло (о. Тит-Ары)	547650	34817	2979	1502	1189	659	520	81	30	20
Главное русло (о. Столб)	283844	41965	3467	786	801	414	323	23	45	14
Большая Трофимовская	670621	42468	2277	1760	1373	1014	513	90	20	19
Быковская	110783	9376	412	295	254	153	88	13	3,2	4,9
Большая Туматская (о. Ырбалах-Арыта)	24045	2149	108	64	57	32	18	2,5	2,2	0,8
Большая Туматская (о. Кучча-Арыта и ниже)	3527	465	22	9,3	8,7	4,9	3,7	0,2	0,5	0,1
Арынская	10484	1175	69	27	24	15	10	1,4	1,8	0,3
Оленекская	23391	2253	169	59	65	37	25	2,2	8,9	0,9
Булкурская	335	46,2	2,0	0,9	1,0	0,52	0,37	0,01	0,02	0,03

ВЫВОДЫ

- На основе статистического анализа данных реанализа с привлечением многолетних мониторинговых данных на метеостанциях Тикси и Кюсюр установлено, что значимые изменения температуры воздуха в дельте Лены начались в 1992 г., величина тренда за период с 1992-2021 гг. составила +1,34 °С/10 лет; в период с 2004 по 2021 гг. величина тренда возросла до 1,89 °С/10 лет; значимых изменений по количеству осадков статистически не обнаружено.
- Получены новые данные о скоростях течения и расходах воды, которые помогли оценить современные гидродинамические условия в привершинной части дельты, в системах Туматской и Оленекской проток и существенно уточнить знания о распределении водного стока в дельте Лены.
- По результатам массовых измерений выявлена тесная связь между весовой и оптической мутностью воды в нижнем течении и дельте Лены. На основе синтеза натурных измерений и данных дистанционного зондирования получена карта распределения мутности воды для центральной части дельты, а также для Туматской, Трофимовской и Быковской проток. Показано, что с учетом перераспределения стока воды по рукавам средний баланс взвешенных наносов для дельты Лены в период исследований составил -10%, то есть 10% от общего твердого стока, приходящего в вершину дельты, аккумулируется в дельте.

ВЫВОДЫ

- Фоновые концентрации растворенных и взвешенных форм практически всех элементов оказались существенно ниже среднемировых значений, содержания в донных отложениях – ниже кларков. По уровням содержания растворенных форм в дельте выделяются As и Sb, содержания которых выше, чем в низовьях реки, при этом наибольшие концентрации отмечены в Туматской и Оленекской протоках. Среднее содержание большинства элементов во взвешенных наносах дельты Лены не превышает фонового, но отмечено слабое накопление Cd, Mn, Zn и Hg.
- Оценка уровня загрязнения речной взвеси тяжелыми металлами и металлоидами на основе коэффициента обогащения EF показала, что сильнее всего в дельте взвесь обогащена Cd, Sb и Mn, особенно в центральной части дельты, что может свидетельствовать о дальнем привносе тонкодисперсной взвеси, загрязненной ТММ, из вышерасположенных участков водосбора р. Лены.
- На основе полученных результатов о расходах воды и взвешенных наносов, содержаниях химических элементов в воде и взвеси проведен расчет потоков минеральных и органических веществ в дельте Лены. Величина потоков растворенных и взвешенных форм металлов и металлоидов измеряется сотнями и тысячами кг/сут. Соотношение форм переноса определяется свойствами элементов и условиями миграции. Сток Fe и Mn на 99% проходит во взвешенной форме, Mo и As – на 90% в растворенной. Органический углерод в дельте Лены переносится главным образом в растворенной форме, на долю которой приходится 80-90% от суммарного потока. Основной поток минеральных и органических веществ в дельте Лены направлен по Трофимовской и Быковской протокам.