

МОНИТОРИНГОВЫЕ, ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ И
ЭКСПЕДИЦИОННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ
MONITORING, EXPERIMENTAL AND EXPEDITIONARY RESEARCH

УДК 556.535.6(551.345.1)

DOI: 10.34753/HS.2022.4.2.165

**ВЛИЯНИЕ БЕРЕГОВЫХ
ЕДОМНЫХ ОБНАЖЕНИЙ НА
СТОК НАНОСОВ АРКТИЧЕСКИХ
РЕК**

С.Р. Чалов¹, В.М. Морейдо^{1,2},
К.Н. Прокопьева¹, В.А. Ефимов¹

¹Московский государственный университет
им. М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия;

²Институт водных проблем РАН, г. Москва,
Россия

hydroserg@mail.ru

**IMPLICATIONS OF YEDOMA
BANK OUTCROPS ON THE
ARCTIC RIVERS SEDIMENT
RUNOFF**

Sergey R. Chalov¹, Vsevolod M. Moreydo^{1,2},
Kristina N. Prokopenva¹, Vasily A. Efimov¹

¹Lomonosov Moscow State University, Moscow,
Russia; ²Institute of Water Problems, Russian

Academy of Sciences, Moscow, Russia

hydroserg@mail.ru

Аннотация. Размыв обнажений многолетнемерзлых пород (едома) в бортах долин крупных рек Арктики рассматривается как важный источник поступления взвешенных наносов и углерода в природные воды рек Лена, Колыма, Яна, Индигирка и далее в Северный ледовитый океан. В ходе экспедиционных исследований ледового комплекса едомы Дуванный Яр – крупнейшего внутри-материкового обнажения многолетнемерзлых пород, расположенного в нижнем течении реки Колыма – в период с 2019 по 2021 год проведены оценки его влияния на сток речных взвешенных наносов. Для оценки дальности распространения шлейфа мутности от ледового комплекса анализировались данные дистанционного зондирования со съемочной системы Landsat за период с 1995 по 2021 год (обработано более 60 снимков за период открытой воды с июня по сентябрь). Для оценки баланса взвешенных наносов использовались натурные измерения мутности, в том числе с использованием акустического доплеровского профилографа течений. Благодаря этим измерениям впервые удалось количественно оценить баланс взвешенных наносов на участке между впадением крупных притоков реки Колыма – рек Омолон и Большой Аной. Выявлено увеличение

Abstract. The erosion of permafrost outcrops (yedoma) in the valleys of large Arctic rivers is considered as an important source of suspended sediment and carbon inflow into the natural waters of the Lena, Kolyma, Yana, Indigirka Rivers and further into the Arctic Ocean. In the course of expeditionary studies of the Duvanny Yar Yedoma ice complex, the largest inland outcrop of permafrost, located in the lower reaches of the Kolyma river in 2019–2021 the assessments of its influence on the suspended sediments' runoff were carried out. To analyze the scale of the turbidity plume from the ice complex and suspended sediments' balance on the adjacent river reach we used remote sensing methods, and field measurements of turbidity, including using an acoustic Doppler current profiler. An increase of around 20% in the turbidity of the Kolyma River was revealed during the summer low-flows in the reach downstream of the yedoma. The influx of suspended matter due to the melting of the slopes of the ice complex on hot summer days in the emerging network of turbidity streams was estimated at a value of more than 5 kg/s. The effect of thermal destruction of the ice complex is confirmed by a statistically significant relationship between the length of the turbidity plume propagating from Duvanny Yar Yedoma downstream the Kolyma river and the air

мутности воды реки Колыма в пределах 20% в период летней межени на нижерасположенном бесприточном участке. Проведена оценка поступления взвеси за счет таяния склонов ледового комплекса в жаркие летние дни в формирующейся сети мутьевых водотоков – величиной более 5 кг/с. Эффект термического разрушения ледового комплекса подтверждает статистически значимая связь между длиной шлейфа мутности, распространяющегося от едомы Дуванный Яр вниз по течению реки Колыма, с температурой воздуха в этом районе. Таким образом, впервые получены количественные данные, подтверждающие роль активизации разрушения многолетнемерзлых пород в формировании стока наносов.

Ключевые слова: сток наносов; многолетнемерзлые отложения; реки арктического побережья России; Дуванный Яр; Колыма; доплеровская расходомерия; русловые процессы.

Введение

Сток арктических рек на протяжении второй половины XX – начала XXI века испытывает существенные воздействия, связанные как с прямой антропогенной нагрузкой на водосбор, так и с глобальными климатическими изменениями [Kulmala et al., 2016; Agafonova et al., 2017]. Среди процессов, влияющих на речной сток в последнее десятилетие, отмечают зарегулирование водохранилищами, организацию и прекращение русловой золотодобычи, снижение добычи строительных материалов из русла и воздействие регионального изменения климата. Согласно различным данным таяние многолетнемерзлых пород является мощным триггером климатических изменений в регионе, также влияющим на сток [Pokrovsky et al., 2015; Chalov et al., 2018].

Учитывая, что гидрологический мониторинг в нижнем течении арктических рек сведен к минимуму и на протяжении нескольких десятков лет на гидрометрических постах Росгидромета не выполнялись измерения расходов воды и наносов, исследования современного состояния водно-эрозийной

температуры в этой области. Таким образом, впервые, количественные данные получены, подтверждающие роль активизации разрушения многолетнемерзлых пород в формировании стока наносов.

Keywords: sediment runoff; permafrost; rivers of the Russian Arctic; Duvanny Yar; Kolyma River; acoustic doppler discharge measurement; river channel processes.

системы могут быть основаны только на экспедиционных исследованиях. Выполненные в период с 2019 по 2021 год масштабные полевые работы в нижнем течении рек Обь, Енисей, Лена и Колыма в рамках нескольких исследовательских проектов [Магрицкий и др., 2022] позволили собрать уникальный объем данных по гидрологии и гидрогеохимии крупнейших рек Арктики. При этом был произведен сбор данных о влиянии термоэрозийных процессов на участке реки Колыма вдоль крупнейшего внутриматерикового обнажения многолетнемерзлых пород (едомы) Дуванный Яр на поступление твердого вещества в воды реки Колыма (рисунок 1).

Целью настоящей статьи было дать общую информацию о распространении многолетнемерзлых пород и количественно оценить поступление взвешенных веществ в реку Колыма от едомы Дуванный Яр с использованием натуральных и дистанционных методик. Для этого были поставлены и решены несколько задач:

— оценить связь между температурой воздуха и интенсивностью поступления твердого материала от едомы Дуванный Яр в воды реки Колыма с использованием дистанционных методов;

— количественно измерить концентрацию взвешенных наносов на участке выше и ниже едомы Дуванный Яр и провести оценку их баланса;

— оценить распределение взвешенных наносов по поперечному профилю русла реки Колыма на участке едомы Дуванный Яр с помощью гидроакустических методов с использованием акустических доплеровских профилографов течений (далее – АДПТ).

Статья состоит из 4 разделов. В первом разделе приведены сведения о распространении ледовых комплексов на арктических реках России и предыдущих исследованиях на участке едомы Дуванный Яр. Во втором разделе подробно описаны использованные методики. В третьем разделе приведены оценки распространения шлейфа мутности ниже по течению реки Колымы от едомы Дуванный Яр, оценки распределения взвешенных наносов по профилю русла реки

Колыма и рассчитан баланс наносов. В заключении обсуждаются полученные результаты и перспективы дальнейших исследований.

Едомы в низовьях арктических рек России и история исследований едомы Дуванный Яр

Распространение термоэрозионных и термоабразионных берегов вдоль ледовых комплексов (так называемых едом) на севере Сибири в первую очередь связано с побережьем Восточно-Сибирского моря и моря Лаптевых, однако ледовые комплексы широко встречается и в нижнем течении арктических рек. Они описаны в низовьях реки Лена [Кравцова, Инюшин, 2019], Колыма, на реках Малый и Большой Анюй [Васильчук и др., 2018]. Обширные по пространственному охвату термоэрозионные



Рисунок 1. Обнажение многолетнемерзлых пород (едомы) Дуванный Яр (фото 2020 года).

Figure 1. Permafrost outcrop on the Duvanny Yar yedoma.

берега расположены в дельте реки Лена, где они существенно влияют на баланс наносов [Chalov,

Prokoreva, Habel, 2021]. Останцы едомы здесь возвышаются над дельтовыми островами

относительно выровненными поверхностями высотой 35–45 м (до 60 м), с мерзлотным микрорельефом и густой сетью солифлюкционного и эрозионного расчленения. Термозрозионные берега повсеместно распространены по побережью западной части дельты реки Лена, где береговая линия ограничивает абразионную морскую террасу, а также по выдвигающимся аккумулятивным берегам восточной части дельты с устьями протоков Быковской, Трофимовской, Туматской [Аге, 1998]. По результатам обследований экспедицией Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова в 2022 году в дельте реки Лена установлена протяженность обнажений многолетнемерзлых пород по берегам проток Туматской, Оленекской, Булкурской общей длиной до 2 километров.

В то же время крупнейшим внутриматериковым обнажением многолетнемерзлых пород считается ледовый комплекс едомы Дуванный Яр, расположенный в нижнем течении реки Колыма. Изучение разреза ледового комплекса едомы Дуванный Яр (рисунок 2) началось еще в 60-ых годах XX века [Соловьев, 1962; Васильковский, 1963], однако на начальном этапе эти исследования носили описательный характер. С конца 60–70-ых годов вопросы образования крупнейшего обнажения многолетнемерзлых пород обсуждались в ряде работ [Баранова, Бискэ, 1964; Русанов, Бороденкова, Гончаров, 1967; Томирдиаро, 1975]. Впоследствии объект привлек внимание международных групп ученых. Методами радиоуглеродного датирования и спорово-пыльцевого анализа были проведены оценки времени образования отложений Колымской низменности [Васильчук и др., 1987; Zanina et al., 2011]. Были рассмотрены три основные теории процессов и условий образования этой крупнейшей едомы: эоловое [Томирдиаро, 1980; Томирдиаро, Черненький, 1987], аллювиальное [Баранова, Бискэ, 1964; Русанов, Бороденкова, Гончаров, 1967] и полигенетическое [Sher, 1997]. Проверка перечисленных гипотез детально

анализировалась в обобщающей работе [Murton et al., 2015], основанной на данных, собранных в ходе полевых экспедиций с 1970 года. Кроме этого, в работах [Каплина, Гитерман, Лахтина, 1978; Шило, Томирдиаро, 1989] подробно рассматривались гранулометрический, минералогический и солевой составы толщи едомы Дуванный Яр. По данным палеопедологического исследования [Губин, 1984] нижний горизонт мощностью 5–10 м состоит в основном из переслаивающихся мелкозернистых и пылеватых песков, характеризующихся высоким содержанием углерода (1,5–2,0%), а верхний сложен алевритами, в которых содержание органического углерода достигает 2,3%.

В отношении взаимодействия с водами реки Колыма роль этого крупнейшего руслового обнажения многолетнемерзлых пород почти не рассматривалась. Исключение составляет исследование [Griffin et al., 2011], основанное на дешифрировании гиперспектральных снимков спутниковых систем Landsat 5 (TM) и Landsat 7 (ETM+), которое выявило пространственную и временную изменчивость концентраций растворенного органического углерода (DOC) в пределах нижнего течения реки Колыма, важнейшую роль в увеличении которой играет рост мутности воды в период половодья. Мониторинговые исследования взвешенного органического углерода (POC), выполненные в рамках проекта ArcticGRO на реках арктической зоны, подтверждают факт генетической принадлежности содержания углерода к выходам многолетнемерзлых пород – еdomам, являющимися основным источником образовавшегося в эпоху позднего плейстоцена углерода [McClelland et al., 2016]. В то же время детальных локальных исследований на эту тему не проводилось, соответственно, в отечественной и зарубежной литературе не встречаются оценки изменчивости баланса взвешенных наносов и их микроэлементного состава в речных водах под воздействием таяния многолетнемерзлых пород, слагающих речные берега.

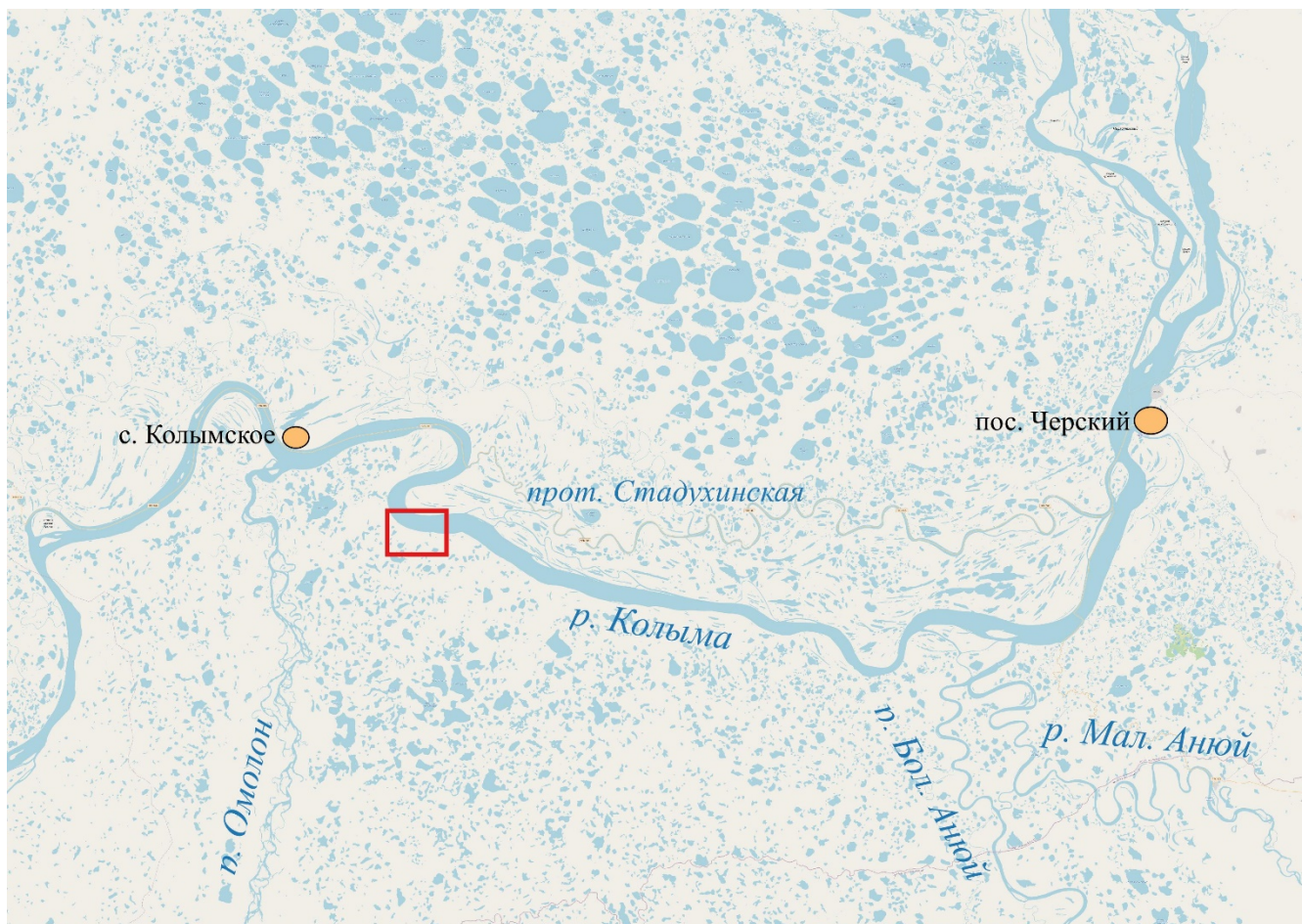


Рисунок 2. Схема района исследований.

Красным прямоугольником обозначен район едомы Дуванный Яр.

Figure 2. Map of the research area. Red rectangle denotes the location of Duvanny Yar.

Материалы и методы

Для решения поставленных в исследовании задач были использованы методы, которые можно разделить на три блока:

— дистанционные методы, в которые входило определение интенсивности поступления наносов с едомы Дуванный Яр в воды реки Колыма по данным дистанционного зондирования Земли за многолетний период и влияние на нее изменений температуры окружающего воздуха;

— гравиметрические, которые были основаны на анализе взвешенных частиц в пробах речной воды и направлены на исследование потока химических элементов, в том числе органических, с едомы Дуванный Яр;

— гидроакустические методы, в рамках которых были измерены параметры рассеяния акустического сигнала от взвешенных частиц в

речной воде и получены оценки баланса наносов на участке реки Колыма у едомы Дуванный Яр.

Метод определения мутности воды по данным дистанционного зондирования

Применение методов дистанционного зондирования Земли позволяет получить обширные данные о мутности воды. Отклики на видимую световую часть электромагнитного спектра по космическим снимкам в зависимости от концентрации наносов на поверхности воды коррелируют с абсолютными значениями мутности воды за счет рассеяния взвешенных веществ на поверхности воды [Kirk, 1989]. Методика дешифрирования концентрации взвешенных наносов основана на связи значений коэффициента отражения ρ в красном канале видимого спектра и измеренных концентраций взвешенных частиц в полевых условиях [Чалов, Базилова, Тарасов, 2017]. Специальные

исследования по оценке точности зависимостей $S=f(\rho)$ [Чалов и др., 2019] указывают на погрешности в пределах 20%, что является приемлемым для изучения характеристик стока наносов.

Оценка мутности воды реки Колыма в районе едомы Дуванный Яр и ниже по течению проводилась по снимкам со съемочной системы Landsat за период с 1995 по 2021 год (обработано более 60 снимков за период открытой воды с июня по сентябрь), полученных с ресурса EarthExplorer¹. Снимки подвергались радиометрической коррекции: перевод сырых значений яркости пикселей на снимке в коэффициенты отражения осуществлялся по методу, описанному в работе [Chander, Markham, Helder, 2009]. Атмосферная коррекция выполнена по методу «черного объекта» (DOS1) [Chavez, 1996], которая направлена на исключение влияния дымки, вносящей отклонения в значения яркости [Hadjimitsis et al., 2004].

Гравиметрический метод определения концентрации взвешенных наносов

Для определения концентрации взвешенных наносов 8–10 августа 2019 года были отобраны пробы воды реки Колыма на участке выше и ниже едомы Дуванный Яр. Пробы объемом 1–3 л были подвергнуты гравиметрическому анализу, в ходе которого взвешенные частицы отделялись от водного раствора методом фильтрации на вакуумной установке Millipore через мембранные фильтры (Millipore, Владисарт) с диаметром пор 0,45 мкм. Фильтрация проводилась до полного прекращения прохождения воды через фильтр. Фильтры с осадком просушивались (при 105°C в течение 2 часов) для последующего определения мутности воды и гранулометрического состава. Величина весовой мутности (мг/л) определялась с помощью взвешивания сухого фильтра со взвесью на аналитических весах, с вычетом начальной массы чистого фильтра, и деления на объем отфильтрованной воды.

Оценка баланса наносов на участке

Для оценки вклада едомы Дуванный Яр в формирование стока наносов реки Колыма исследовался бесприточный участок от устья

реки Омолон до устья реки Анюй, на котором и расположена едома. Река здесь имеет преимущественно неразветвленное русло, в верхней части – меандрирующее (рисунок 2). Непосредственно выше едомы Дуванный Яр от основного русла реки Колыма ответвляется левая пойменная протока Стадухинская, которая присоединяется обратно уже ниже слияния рек Колыма и Анюй ближе к поселку Черский.

Для оценки баланса наносов использовались данные, полученные 8–10 августа 2019 года, когда с помощью АДПТ Teledyne RDI RiverRay 3 мГц были выполнены измерения расходов воды и отбор проб на анализ мутности на участке реки Колыма выше, в створе и ниже едомы Дуванный Яр. С учетом полученных измерений расход воды Q_0 и наносов R_0 реки Колыма ниже слияния с рекой Омолон (створ выше едомы Дуванный Яр) рассчитывался как:

$$Q_0 = Q_{\text{Омолон}} + Q_{\text{Колымское}} - Q_{\text{Стадухинская}} \quad (1)$$

$$R_0 = R_{\text{Омолон}} + R_{\text{Колымское}} - R_{\text{Стадухинская}} \quad (2)$$

Расход воды и наносов реки Колыма выше слияния с рекой Анюй (створ ниже едомы Дуванный Яр) рассчитывался как:

$$Q_0 = Q_{\text{Колыма ниже Анюй}} - Q_{\text{Большой Анюй}} - Q_{\text{Малый Анюй}} \quad (3)$$

$$R_0 = R_{\text{Колыма ниже Анюй}} - R_{\text{Большой Анюй}} - R_{\text{Малый Анюй}} \quad (4)$$

В створе едомы Дуванный Яр проводились натурные измерения, поэтому оценки Q_0 и R_0 принимались непосредственно по фактическим данным. По измерениям, проведенным в августе 2019 года, водность протоки Стадухинской относительно основного русла составляла 9% от суммарного расхода реки Колыма. Эта величина использовалась в расчетах баланса воды и наносов.

Гидроакустический метод измерения расходов воды, концентрации взвешенных наносов и их распределения по поперечному профилю сечения русла

Гидроакустический метод измерения расходов воды основан на оценке скорости течения в единичном объеме воды путем измерения доплеровского сдвига частоты ультразвукового сигнала, излучаемого АДПТ и

¹ EarthExplorer [Электронный ресурс]. URL: <http://earthexplorer.usgs.gov>.

отраженного от частиц взвеси в этом объеме. Диапазон частот для АДПТ составляет от 300 до 3 000 кГц. Для измерения расхода воды АДПТ монтируется на движущейся лодке и излучает акустические сигналы в толщу воды по направлению ко дну реки. Измеренные сигналы, отраженные от мелких частиц минерального и органического вещества, находящегося в единичном объеме воды, называются интенсивностью обратного рассеяния. Величина этого рассеяния, отраженного от взвешенных частиц, фиксируется прибором на различных глубинах в пределах всей вертикали водной толщи до дна, что позволяет получить вертикальный профиль скорости. Обычно блоки АДПТ имеют от 1 до 9 ультразвуковых излучателей, которые работают в различном диапазоне частот, что позволяет одновременно с измерениями контролировать качество принимаемого сигнала. Кроме того, блоки АДПТ могут быть дополнительно оснащены эхолотами и приемниками GPS-сигнала, которые позволяют проводить измерения в локальной (путем отслеживания перемещения прибора относительно дна реки) или глобальной системе координат. Это позволяет точно измерять скорость течения воды, поскольку скорость движущейся лодки вычитается из измеренной скорости потока. По мере того как лодка движется по реке от одного берега к другому, вертикальные профили плавно объединяются, образуя распределение скорости в поперечном сечении, которая позволяет рассчитать расход воды в створе измерений [Mueller et al., 2013; Морейдо и др., 2020].

При наличии одновременных с измерениями АДПТ определений концентрации взвешенных наносов в створе, возможен переход от значений измеряемой прибором интенсивности обратного рассеяния к величинам весовой мутности или NTU путем построения зависимости вида:

$$SSC_{\text{АДПТ}} = 10^{(\alpha S_t(R) + K_T)} \quad (5)$$

где $SSC_{\text{АДПТ}}$ – концентрация взвешенных наносов;

α – эмпирический коэффициент;

$S_t(R)$ – интенсивность обратного рассеяния АДПТ, дБ;

K_T – параметры, зависящие от модели АДПТ:

L – длина импульса;

P_T – интенсивность исходящего сигнала;

C – линейный размер излучателя АДПТ.

Уравнение (5) представляет собой искомую степенную зависимость мутности от интенсивности полученного сигнала АДПТ. Коэффициенты α и K_T ввиду трудности их определения аналитически, подлежат калибровке. Исследованию зависимостей вида (5) посвящено большое количество работ [Latosinski et al., 2014; Szupiany et al., 2019; Морейдо и др., 2020; Dominguez Ruben et al., 2020], многие из которых указывают на региональную связь параметров зависимости с составом наносов. Для оценки распределения скорости течения и мутности по поперечному сечению реки Колыма были использованы данные, полученные путем измерений АДПТ Teledyne RDI RioGrande WorkHorse 600 кГц 6 июля 2020 года на участке у едомы Дуванный Яр.

Анализ результатов

Распространение шлейфа мутности от едомы Дуванный Яр по руслу Колымы

В ходе анализа данных спутниковых снимков Landsat на участок от устья реки Омолон до устья реки Анюй в период с 1995 по 2021 год за период открытого русла (июнь – сентябрь; 61 снимок) было установлено, что едома Дуванный Яр находится в зоне смешения Колымских и Омолонских вод. На образование шлейфа у едомы Дуванный Яр и ниже по течению в период прохождения половодья влияет повышенная водность реки Омолон – в июне – начале июля Омолонские воды более мутные, чем воды реки Колыма. В итоге влияние едомы Дуванный Яр на сток наносов проявляется только в условиях пониженной водности реки Омолон. Шлейф в таких условиях был дешифрован на 31 снимке из 61 проанализированных.

Расчет длины шлейфа от едомы Дуванный Яр проводился на основе визуального дешифрирования спутниковых снимков Landsat в

красном канале видимого спектра, в котором наблюдаются наибольшие корреляции параметра яркости пикселя (коэффициент отражения) и значений мутности воды. Чем больше значение поверхностного отражения, тем ярче пиксель и тем выше значение мутности воды, что можно увидеть у правого берега реки Колыма у едомы Дуванный Яр (рисунок 3), где на значение яркости пикселя влияет приток наносов, выносимых со склонов едомы. В период пониженной водности слабонасыщенных взвесью вод реки Омолон наиболее очевиден контраст между водами с различным содержанием наносов, что создает основу для надежного дешифрирования. В этот период – с июля по сентябрь – шлейф от едомы Дуванный Яр может проследиваться на расстоянии от 10 до 70 км вниз по течению у правого берега.

Нами была также исследована связь между температурой воздуха в рассматриваемый период и длиной шлейфа мутности от едомы Дуванный

Яр. Для этого были взяты ряды среднесуточных температур воздуха на ближайшей метеостанции в селе Колымское (рисунок 2). Были рассчитаны суммы среднесуточных температур воздуха за период 5, 10, 20 и 30 суток до даты, когда был сделан каждый из снимков в использованном наборе. Был оценен коэффициент корреляции между суммами температур по периодам и длиной дешифрируемого шлейфа со снимка (рисунок 4). Наиболее тесная связь ($r=0,74$, $n=33$) была получена для 20-суточных сумм температур воздуха. При этом за другие периоды суммирования также получены значимые коэффициенты корреляции.

Наличие значимых связей между длиной шлейфа мутности от едомы Дуванный Яр и суммами положительных температур воздуха свидетельствует о вытаивании многолетнемерзлых пород вследствие термических процессов. Можно утверждать, что при повышении средней температуры воздуха

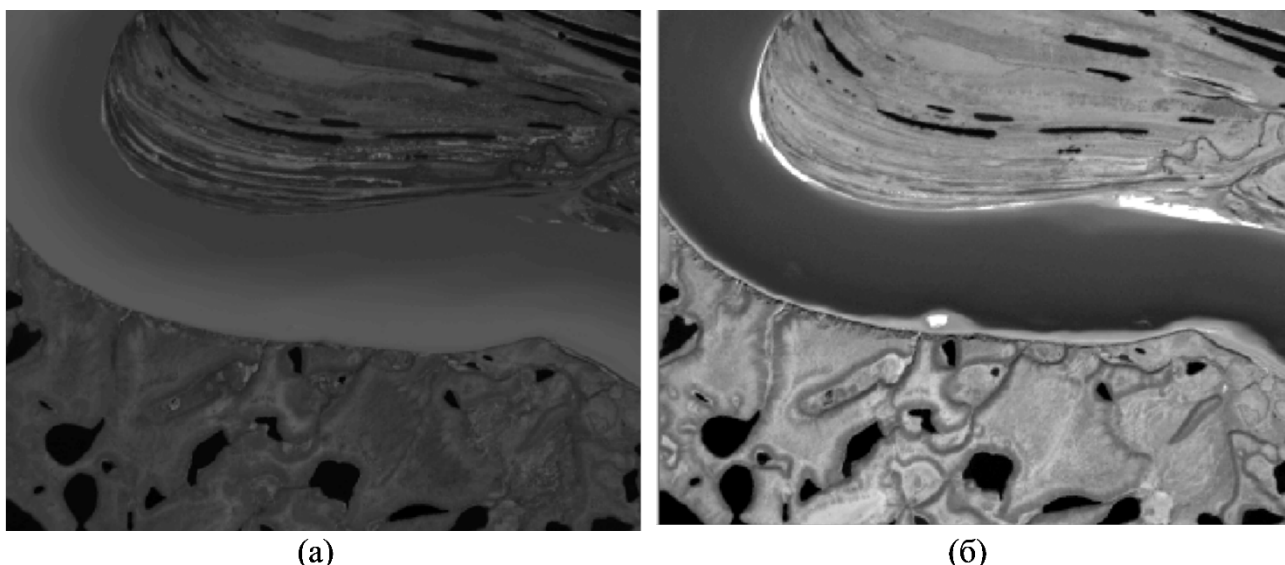


Рисунок 3. Спутниковые снимки Landsat 8 в красном канале видимого спектра (band 4): а) 18.06.2020; б) 24.08.2021.

Figure 3. Landsat 8 satellite images in red band (band 4): а) 18.06.2020; б) 24.08.2021.

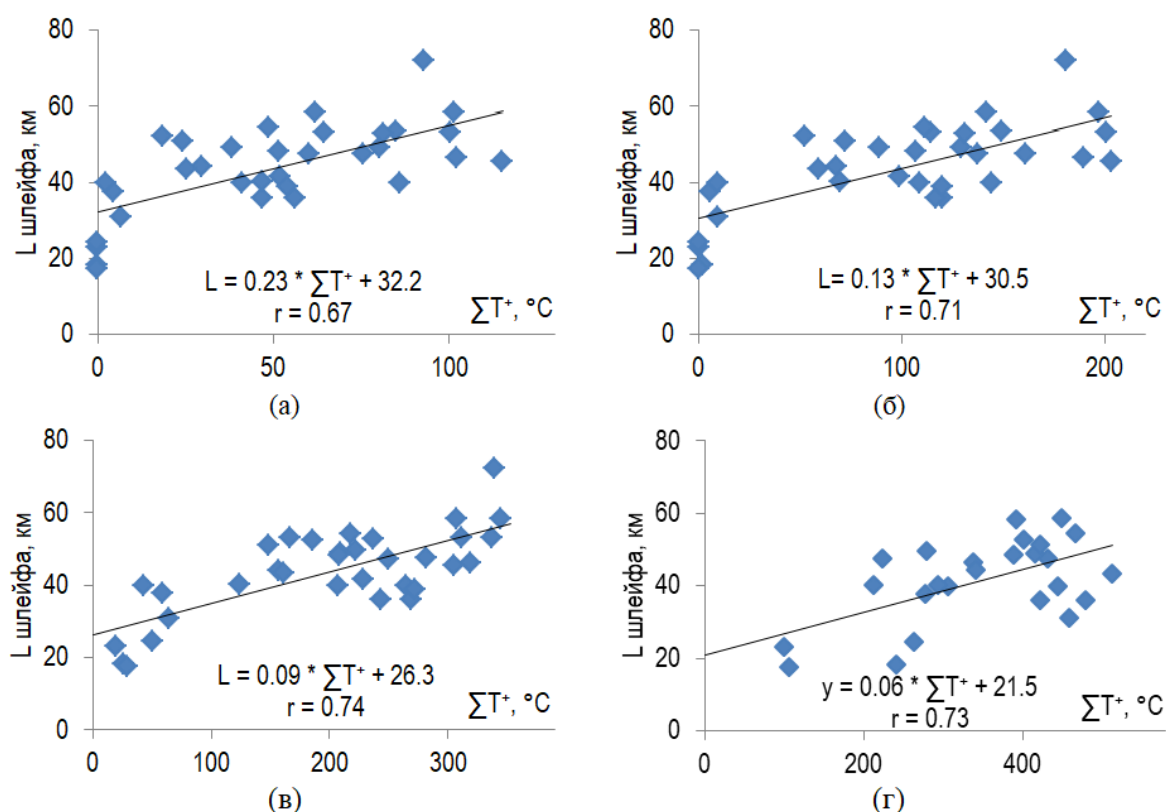


Рисунок 4. Линейная связь длины шлейфа ($L_{\text{шлейфа}}$, км) и значения сумм положительных температур воздуха (ΣT^+ , °C) за: а) за 5 дней до даты снимка; б) за 10 дней до даты снимка; в) за 20 дней до даты снимка; г) за 30 дней до даты снимка.

Figure 4. Linear regression between the plume length ($L_{\text{шлейфа}}$, км) and positive air temperature sums (ΣT^+ , °C) for a) 5 days prior to image date; b) 10 days prior to image date; c) 20 days prior to image date; d) 30 days prior to image date.

в данном районе увеличится и поступление взвешенных наносов от таящего массива многолетнемерзлых пород. Эти связи полностью подтверждаются натурными наблюдениями, выполненными при обследовании едомы Дуванный Яр в августе 2019 года, июле 2020 года и июне 2021 года. В жаркие дни наблюдается формирование не менее 10 мутьевых водотоков (с концентрацией взвеси более 100 000 мг/л), стекающих со склонов ледового комплекса. Суммарный дебит таких водотоков 27 июня 2021 года оценен нами величиной 10 л/с, что соответствовало поступлению не менее 5 кг/с взвешенных наносов.

Оценка баланса наносов на участке едомы Дуванный Яр

Результаты расчетов по уравнениям (1)–(4) показали, что по длине реки Колыма на исследуемом участке происходит монотонное

возрастание водности. На этом фоне изменение расхода наносов по длине реки имеет более сложную систему. В верхней части участка, до едомы Дуванный Яр, формируется зона аккумуляции наносов, связанная с подпорной зоной от узла слияния рек Омолон и Колыма и, вероятно, падением скоростей выше излучин у едомы Дуванный Яр. При этом определенную роль может играть перераспределение части стока наносов в протоку Стадухинскую. В результате в межень период расход наносов на участке от устья реки Омолон до едомы Дуванный Яр снижается примерно на 10%. Ниже по течению, в первую очередь за счет поступления продуктов разрушения едомы Дуванный Яр, согласно данным измерений в русле реки Колыма, происходит увеличение стока наносов почти на 20% по сравнению с расположенным выше участком русла (таблица 1). Прирост стока

наносов на участке превышает величину вклада мутьевых водотоков, приведенную выше (5 кг/с, то есть около 2% от стока наносов реки Колыма, таблица 1), что может быть связано с наличием других факторов поступления материала в реку, а также отличием дат обследования водотоков и измерений в русле реки.

Таким образом, оценка натуральных измерений расхода взвешенных наносов на участке едомы Дуванный Яр показывает, что на исследуемом участке реки Колыма происходит увеличение стока наносов почти на 20% по сравнению с условиями выше по течению, частично объясняемая термической эрозией ледового комплекса.

Таблица 1. Баланс расходов воды и наносов.

Table 1. Streamflow discharge and sediment load balance.

Створ	Расстояние от устья реки Омолон, км	Расход воды		Расход наносов	
		м ³ /с	%	кг/с	%
Выше едомы Дуванный Яр (исток протоки Стадухинская)	26	5 800	100,0	287	100,0
В районе едомы Дуванный Яр	43	5 905	101,8	259	90,2
Ниже едомы Дуванный Яр	52	6 130	105,7	308	107,3

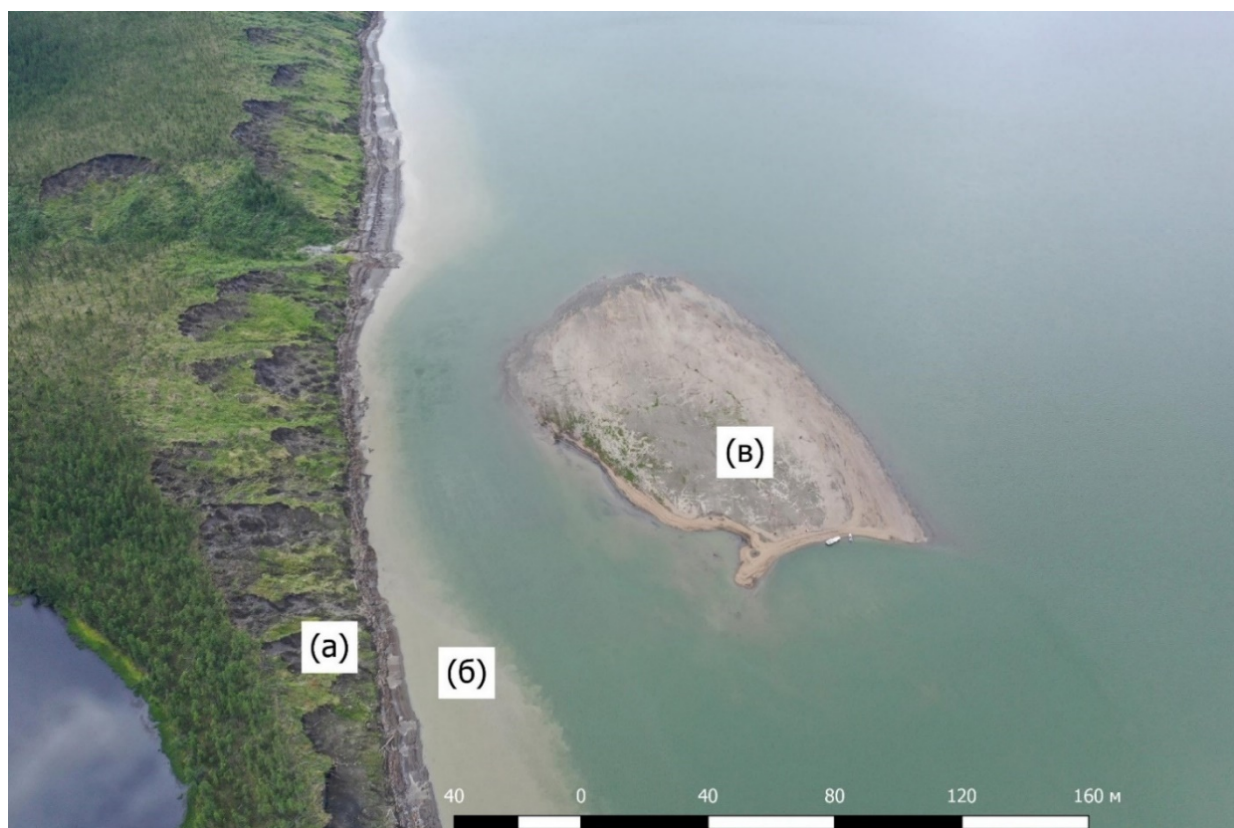


Рисунок 5. Вид на участок русла р. Колымы у едомы Дуванный Яр: размываемый берег (а), поток взвешенных наносов с него (б), осередок (в) (фото В.М. Морейдо, с квадрокоптера).

Figure 5. Oblique image of the Duvanny Yar edoma eroded bank (a), wash load plume running from it (б) and braid bar (в). Drone photo taken by V.M. Moreido.

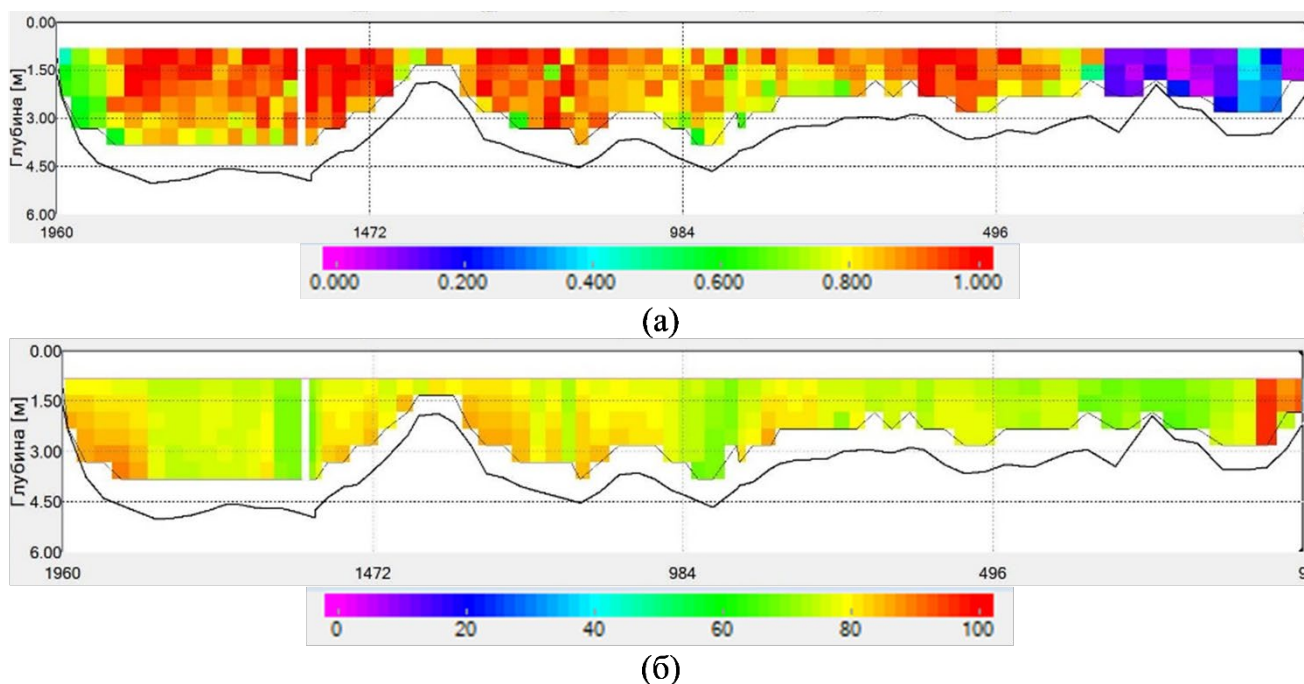


Рисунок 6. Совмещенные профили скорости течения, м/с (а) и обратного рассеяния, дБ (б) в русле реки Колыма в створе у едомы Дуванный Яр. По оси абсцисс – расстояние от правого берега, м.

Figure 6. Combined velocity (a) and backscatter (b) transects of the Kolyma River at the Duvanny Yar.

On the x axis – the distance from the right bank.

Распределение взвешенных наносов по поперечному профилю реки Колыма в районе едомы Дуванный Яр

Измерения расхода воды реки Колыма с помощью АДПТ производились в створе едомы Дуванный Яр ниже небольшого осередка, сформированного, по-видимому, вынесенными с едомы отложениями (рисунок 5).

Небольшая протока между правым берегом и осередком шириной около 150–200 м на поперечном профиле русла, полученном при измерении с помощью АДПТ, является областью низких скоростей течения – от 0,05 до 0,40 м/с (рисунок 6а). При этом концентрация взвешенных наносов у правого берега – максимальная по всему руслу, что косвенно характеризуется величиной обратного рассеяния акустического сигнала АДПТ (рисунок 6б).

При этом в русле реки Колыма на профиле обнаруживаются дополнительные зоны, где величина обратного рассеяния повышена (рисунок 6б). Они приурочены преимущественно к грядовым образованиям в центральной части русла, которые находятся в области максимальных скоростей и, очевидно, активно

размываются потоком. Однако таких величин, как у правого берега, где поступают наносы от таяния едомы Дуванный Яр, не наблюдается нигде в створе измерений.

Выводы и обсуждение

Полученные в ходе нескольких экспедиций данные о концентрации наносов у едомы Дуванный Яр позволяют оценить ее как существенный источник твердого вещества и, связанного с ним, органического вещества в водах реки Колыма. Баланс наносов на участке позволяет говорить о 20%-ном повышении концентрации взвешенных наносов на участке реки Колыма на участке едомы Дуванный Яр. В жаркие летние дни со склона ледового комплекса формируется сеть мутьевых водотоков с суммарным дебитом более 10 л/с и расходом наносов более 5 кг/с.

Шлейф распространения взвеси от едомы Дуванный Яр простирается почти на 70 километров вниз по течению. Интенсивность поступления взвеси при этом зависит от температуры воздуха в летний период, которая в арктическом регионе проявляет тенденции к

существенному росту. Учитывая это, представляет интерес проведение оценок поступления наносов, а также связанного с ними органического вещества, от едомы Дуваный Яр в будущем. В перспективе следует организовать мониторинг объема вытаявающих пород путем высокоточного картографирования едомы фотограмметрическими методами.

Благодарности

Теоретический обзор исследований внутриматериковых обнажений многолетнемерзлых пород выполнен при

Литература

Баранова Ю.П., Бискэ С.Ф. История развития рельефа Сибири и Дальнего Востока. Северо-Восток СССР. М.: Наука, 1964. 290 с.

Васильчук Ю.К., Вайкмяэ Р.А., Пуннинг Я.М., Лейбман М.О. Изотопия, палинология и гидрохимия повторно-жильных льдов органо-минерального комплекса Дуваный Яр // Доклады академии наук СССР. 1987. Т. 292. № 5. С. 1207–1211.

Васильчук Ю.К., Буданцева Н.А., Бартова А.В., Зимов С.А. Вариации стабильных изотопов кислорода в повторно-жильных льдах циклитной едомы Станчиковского Яра на реке Малый Аной // Арктика и Антарктика. 2018. № 3. С. 37–56. DOI: [10.7256/2453-8922.2018.3.27121](https://doi.org/10.7256/2453-8922.2018.3.27121).

Васьковский А.П. Очерк стратиграфии антропогенных (четвертичных) отложений крайнего северо-востока Азии // Сб. статей «Геология Корякского нагорья» / Под ред. канд. геол.-минер. наук Б.Х. Егизарова. М.: Госгортехиздат, 1963. С. 143–168.

Губин С.В. Палеопедологический анализ верхнеплейстоценовых (едомных) отложений обнажения Дуваный Яр // Бюллетень Комиссии по изучению четвертичного периода. №53. М.: Наука, 1984. С. 125–128.

Каплина Т.Н., Гутерман Р.Е., Лахтина О.В. Дуваный яр – опорный разрез позднеплейстоценовых отложений Колымской низменности // Бюллетень Комиссии по изучению четвертичного периода. №48. М.: Наука, 1978. С. 49–65.

финансовой поддержке проекта РФФ 21-17-00181. Анализ дистанционных данных проводился в рамках программы развития Междисциплинарной научно-образовательной школы Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова «Будущее планеты и глобальные изменения окружающей среды».

Доступность данных

Все использованные данные доступны у авторов по запросу.

References

Agafonova S.A., Frolova N.A., Surkova G.V., Koltermann K.P. Modern characteristics of the ice regime of russian arctic rivers and their possible changes in the 21st century. *Geography, environment, sustainability*, 2017, vol. 10, iss. 4, pp. 4–15. DOI: [10.24057/2071-9388-2017-10-4-4-15](https://doi.org/10.24057/2071-9388-2017-10-4-4-15).

Are F.E. The Contribution of Shore Thermoabrasion To the Laptev Sea. *Permafrost: Proceedings of the Seventh International Conference (Yellowknife, NWT, Canada, June 23–27, 1998)*. Canada: Yellowknife, 1998. Collection Nordicana № 57, pp. 25–30.

Baranova Yu.P., Biske S.F. *Istoriya razvitiya rel'efa Sibiri i Dal'nego Vostoka. Severo-Vostok SSSR [History of the development of the relief of Siberia and the Far East. Northeast of the USSR]*. Moscow, Publ. Nauka, 1964. 290 p. (In Russian).

Chalov S.R., Bazilova V.O., Tarasov M.K. Suspended sediment balance in Selenga delta at the late XX–early XXI century: simulation by landsat satellite images. *Water Resources*, 2017, vol. 44, iss. 3, pp. 463–470. DOI: [10.1134/S0097807817030071](https://doi.org/10.1134/S0097807817030071). (Russ. ed.: Chalov S.R., Bazilova V.O., Tarasov M.K. Balans vzveshennykh nanosov v del'te Selengi v kontse XX-nachale XXI veka: modelirovanie po dannym snimkov Landsat. *Vodnye resursy*, 2017, vol. 44, iss. 3, pp. 332–339. DOI: [10.7868/S0321059617030075](https://doi.org/10.7868/S0321059617030075)).

Chalov S.R., Liu S., Chalov R.S., Chalova E.R., Chernov A.V., Promakhova E.V., Berkovitch K.M., Chalova A.S., Zavadsky A.S., Mikhailova N. Environmental and human impacts

- Кравцова В.И., Инюшин А.Н. Природное районирование дельты Лены для исследования динамики ее морского края // Материалы Международной конференции «ИнтерКарто. ИнтерГИС» (Мурманск (Россия), 30 января – 2 февраля, Токио (Япония), 20 июля 2019 г.). Москва: Издательство МГУ, 2019. С. 161–174. DOI: [10.35595/2414-9179-2019-2-25-161-174](https://doi.org/10.35595/2414-9179-2019-2-25-161-174).
- Магрицкий Д.В., Фролова Н.Л., Агафонова С.А., Ефимов В.А., Василенко А.Н., Сазонов А.А., Ефимова Л.Е. Гидрологические условия в устье реки Колымы летом 2019 года // Вестник Московского университета. Серия 5: География. 2022. № 1. С. 134–151.
- Морейдо В.М., Чалов С.Р., Иванов В.А., Красынь Е.А. Применение доплеровских измерителей течений для оценки стока наносов // Материалы конференции «Маккавеевские чтения» (online, 7 декабря 2020 года). М.: Издательство МГУ, 2020. С. 35–45.
- Русанов Б.С., Бороденкова З.Ф., Гончаров В.Ф. Геоморфология Восточной Якутии. Якутск: Якуткнигоиздат, 1967. 376 с.
- Соловьев П.А. Аласный рельеф Центральной Якутии и его происхождение // Сборник статей «Многолетнемерзлые породы и сопутствующие им явления на территориях Якутской АССР» / Под ред. Граве Н.А. М.: Изд-во Акад. наук СССР, 1962. С. 38–53.
- Томирдиаро С.В. Лессово-ледовая формация верхнеплейстоценовой гиперзоны в Северном полушарии // Труды Северо-Восточного комплексного института ДВНЦ АН СССР. Вып. 68. Магадан: Кн. изд-во, 1975. С. 170–197.
- Томирдиаро С.В. Лессово-ледовая формация Восточной Сибири в позднем плейстоцене и голоцене. М.: Наука, 1980. 184 с.
- Томирдиаро С.В., Черненький Б.И. Криогенно-эоловые отложения Восточной Арктики и Субарктики. М.: Наука, 1987. 196 с.
- Чалов С.Р., Базилова В.О., Тарасов М.К. Баланс взвешенных наносов в дельте Селенги в конце XX-начале XXI века: моделирование по данным снимков Landsat // Водные ресурсы. 2017. Т. 44. on sediment transport of the largest Asian rivers of Russia and China. *Environmental Earth Sciences*, 2018, vol. 77, iss. 7, 274. DOI: [10.1007/s12665-018-7448-9](https://doi.org/10.1007/s12665-018-7448-9).
- Chalov S.R., Pashkina M.P., Kasimov N.S., Potemkina T.G. Evolution of suspended sediment budget in the deltas of lake Baikal tributaries. *Russian Meteorology and Hydrology*, 2019, vol. 44, iss. 10, pp. 667–673. DOI: [10.3103/S1068373919100042](https://doi.org/10.3103/S1068373919100042). (Russ. ed.: Chalov S.R., Potemkina T.G., Pashkina M.P., Kasimov N.S. Mnogoletnie izmeneniya balansa vzveshennykh nanosov v del'takh pritokov Baikala. *Meteorologiya i Gidrologiya*, 2019, vol. 10, pp. 50–59).
- Chalov S., Prokopenko K., Habel M. North to south variations in the suspended sediment transport budget within large Siberian river deltas revealed by remote sensing data. *Remote Sensing*, 2021, vol. 13, iss. 22, 4549. DOI: [10.3390/rs13224549](https://doi.org/10.3390/rs13224549).
- Chander G., Markham B.L., Helder D.L. Summary of current radiometric calibration coefficients for Landsat MSS, TM, ETM+, and EO-1 ALI sensors. *Remote Sensing of Environment*, 2009, vol. 113, iss. 5, pp. 893–903. DOI: [10.1016/J.RSE.2009.01.007](https://doi.org/10.1016/J.RSE.2009.01.007).
- Chavez P.S.J. Image-based atmospheric corrections – revisited and improved. *Photogrammetric engineering and remote sensing*, 1996, vol. 62, iss. 9, pp. 1025–1036.
- Dominguez Ruben L.G., Szupiany R.N., Latosinski F.G., López Weibel C., Wood M., Boldt J. Acoustic Sediment Estimation Toolbox (ASET): A software package for calibrating and processing TRDI ADCP data to compute suspended-sediment transport in sandy rivers. *Computers and geosciences*, 2020, vol. 140. DOI: [10.1016/j.cageo.2020.104499](https://doi.org/10.1016/j.cageo.2020.104499).
- Griffin C.G., Frey K.E., Rogan J., Holmes R.M. Spatial and interannual variability of dissolved organic matter in the Kolyma River, East Siberia, observed using satellite imagery. *Journal of geophysical research: Biogeosciences*, 2011, vol. 116, iss. G3. G03018. DOI: [10.1029/2010JG001634](https://doi.org/10.1029/2010JG001634).
- Gubin S.V. Paleopedologicheskii analiz verkhnepleistotsenovykh (edomnykh) otlozhenii

№ 3. С. 332–339.

DOI: [10.7868/S0321059617030075](https://doi.org/10.7868/S0321059617030075).

Чалов С.Р., Потемкина Т.Г., Пашикина М.П., Касимов Н.С. Многолетние изменения баланса взвешенных наносов в дельтах притоков Байкала // Метеорология и Гидрология. 2019. Т. 10. С. 50–59.

Шило Н.А., Томирдиаро С.В. Палеогеография и абсолютная геохронология позднего плейстоцена на северо-востоке Сибири // Мерзлотно-геологические процессы и палеогеография низменностей Северо-Востока Азии. Магадан, 1982. С. 9–22.

Agafonova S.A., Frolova N.A., Surkova G.V., Koltermann K.P. Modern characteristics of the ice regime of russian arctic rivers and their possible changes in the 21st century // Geography, environment, sustainability. 2017. Т. 10. № 4. С. 4–15. DOI: [10.24057/2071-9388-2017-10-4-4-15](https://doi.org/10.24057/2071-9388-2017-10-4-4-15).

Are F.E. The Contribution of Shore Thermoabrasion To the Laptev Sea // Permafrost: Proceedings of the Seventh International Conference (Yellowknife, NWT, Canada, June 23–27, 1998). Canada: Yellowknife, 1998. Collection Nordicana № 57. С. 25–30.

Chalov S.R., Liu S., Chalov R.S., Chalova E.R., Chernov A.V., Promakhova E. V., Berkovitch K.M., Chalova A.S., Zavadsky A.S., Mikhailova N. Environmental and human impacts on sediment transport of the largest Asian rivers of Russia and China // Environmental Earth Sciences. 2018. Т. 77. № 7. 274. DOI: [10.1007/s12665-018-7448-9](https://doi.org/10.1007/s12665-018-7448-9).

Chalov S., Prokopeva K., Habel M. North to south variations in the suspended sediment transport budget within large Siberian river deltas revealed by remote sensing data // Remote Sensing. 2021. Vol. 13. № 22. 4549. DOI: [10.3390/rs13224549](https://doi.org/10.3390/rs13224549).

Chavez P.S.J. Image-based atmospheric corrections – revisited and improved // Photogrammetric engineering and remote sensing. 1996. Т. 62. № 9. С. 1025–1036.

Dominguez Ruben L.G., Szupiany R.N., Latosinski F.G., López Weibel C., Wood M., Boldt J. Acoustic Sediment Estimation Toolbox (ASET): A software package for calibrating and processing TRDI ADCP data to compute suspended-sediment transport in sandy rivers // Computers and

obnazheniya Duvannyi Yar [Paleopedological analysis of the Upper Pleistocene (yedoma) deposits of the Duvanny Yar outcrop]. *Byulleten' Komissii po izucheniyu chetvertichnogo perioda [Bulletin of the Commission for the Study of the Quaternary Period]*, iss. 53. Moscow, Publ. Nauka, 1984, pp. 125–128. (In Russian).

Hadjimitsis D.G., Clayton C.R.I., Hope V.S. An assessment of the effectiveness of atmospheric correction algorithms through the remote sensing of some reservoirs. *International journal of remote sensing*, 2004, vol. 25, iss. 18, pp. 3651–3674. DOI: [10.1080/01431160310001647993](https://doi.org/10.1080/01431160310001647993).

Kaplina T.N., Giterman R.E., Lakhtina O.V. Duvannyi yar – opornyi razrez pozdnepleistotsenovykh otlozhenii Kolymskoi nizmennosti [Duvanny Yar - a reference section of the Late Pleistocene deposits of the Kolyma Lowland]. *Byulleten' Komissii po izucheniyu chetvertichnogo perioda [Bulletin of the Commission for the Study of the Quaternary Period]*, iss. 48. Moscow, Publ. Nauka, 1978, pp. 49–65. (In Russian).

Kirk J.T.O. The upwelling light stream in natural waters. *Limnology and oceanography*, 1989, vol. 34, iss. 8, pp. 1410–1425. DOI: [10.4319/lo.1989.34.8.1410](https://doi.org/10.4319/lo.1989.34.8.1410).

Kravtsova V.I., Inyushin A.N. Prirodnoe raionirovanie del'ty Leny dlya issledovaniya dinamiki ee morskogo kraya [Natural zoning of the Delta of Lena River for the research of the dynamics of its sea edge]. *Materialy Mezhdunarodnoi konferentsii «InterKarto. InterGIS. Geoinformatsionnoe obespechenie ustoichivogo razvitiya territorii» (Murmansk, Russia, 30 yanvarya – 2 fevralya 2019; Tokio, Yaponiya, 20 iyulya 2019) [Proceedings of the International conference «InterCarto. InterGIS. GI support of sustainable development of territories» (Murmansk, Russia, 30 January – 2 February 2019; Tokio, Japan, 20 July 2019)]*. Vol. 25. Part 2. Moscow, Publ. MSU, 2019, pp. 161–174. (In Russian; abstract in English). DOI: [10.35595/2414-9179-2019-2-25-161-174](https://doi.org/10.35595/2414-9179-2019-2-25-161-174).

Kulmala M., Lappalainen H., Petäjä T., Kerminen V.-M., Viisanen Y., Matvienko G., Melnikov V., Baklanov A., Bondur V., Kasimov N., Zilitinkevich S. Pan-Eurasian experiment (PEEX)

- geosciences. 2020. Т. 140. DOI: [10.1016/j.cageo.2020.104499](https://doi.org/10.1016/j.cageo.2020.104499).
- Chander G., Markham B.L., Helder D.L. Summary of current radiometric calibration coefficients for Landsat MSS, TM, ETM+, and EO-1 ALI sensors // *Remote Sensing of Environment*. 2009. Т. 113. № 5. С. 893–903. DOI: [10.1016/J.RSE.2009.01.007](https://doi.org/10.1016/J.RSE.2009.01.007).
- Griffin C.G., Frey K.E., Rogan J., Holmes R.M. Spatial and interannual variability of dissolved organic matter in the Kolyma River, East Siberia, observed using satellite imagery // *Journal of geophysical research: Biogeosciences*. 2011. Т. 116. № G3. G03018. DOI: [10.1029/2010JG001634](https://doi.org/10.1029/2010JG001634).
- Hadjimitsis D.G., Clayton C.R.I., Hope V.S. An assessment of the effectiveness of atmospheric correction algorithms through the remote sensing of some reservoirs // *International journal of remote sensing*. 2004. Т. 25. № 18. С. 3651–3674. DOI: [10.1080/01431160310001647993](https://doi.org/10.1080/01431160310001647993).
- Kirk J.T.O. The upwelling light stream in natural waters // *Limnology and oceanography*. 1989. Т. 34. № 8. С. 1410–1425. DOI: [10.4319/lo.1989.34.8.1410](https://doi.org/10.4319/lo.1989.34.8.1410).
- Kulmala M., Lappalainen H., Petäjä T., Kerminen V.-M., Viisanen Y., Matvienko G., Melnikov V., Baklanov A., Bondur V., Kasimov N., Zilitinkevich S. Pan-Eurasian experiment (PEEX) program: grand challenges in the arctic-boreal context // *Geography, environment, sustainability*. 2016. Т. 9. № 2. С. 5–18. DOI: [10.15356/2071-9388_02v09_2016_01](https://doi.org/10.15356/2071-9388_02v09_2016_01).
- Latosinski F.G., Szupiany R.N., García C.M., Guerrero M., Amsler M.L. Estimation of concentration and load of suspended bed sediment in a large river by means of acoustic doppler technology // *Journal of hydraulic engineering*. 2014. Т. 140. № 7. С. 04014023. DOI: [10.1061/\(ASCE\)HY.1943-7900.0000859](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0000859).
- McClelland J.W., Holmes R.M., Peterson B.J., Raymond P.A., Striegl R.G., Zhulidov A.V., Zimov S.A., Zimov N., Tank S.E., Spencer R.G.M., Staples R., Gurtovaya T.Y., Griffin C.G. Particulate organic carbon and nitrogen export from major Arctic rivers // *Global biogeochemical cycles*. 2016. DOI: [10.1002/2015GB005351](https://doi.org/10.1002/2015GB005351).
- Moreido V.M., Chalov S.R., Ivanov V.A., Krastyn' E.A. Primenenie dopplerovskikh izmeritelei techenii dlya otsenki stoka nanosov [Application of Doppler current meters to assess sediment runoff]. *Materialy konferentsii «Makkaveevskie chteniya» (online, 7 dekabrya 2020 goda) [Proceedings of the Makkaveev Readings conference (online, December 7, 2020)]*. Moscow, Publ. MSU, 2020, pp. 35–45. (In Russian).
- Mueller D.S., Wagner C.R., Rehm M.S., Oberg K.A., Rainville F. *Measuring discharge with acoustic Doppler current profilers from a moving boat (ver. 2.0, December 2013)*. U.S. Geological Survey Techniques and Methods, book 3, chap. A22, 2013. 95 p. DOI: [10.3133/tm3A22](https://doi.org/10.3133/tm3A22).
- Murton J.B., Goslar T., Edwards M.E., Bateman M.D., Danilov P.P., Savvinov G.N., Gubin S.V., Ghaleb B., Haile J., Kanevskiy M.,

T. 30. № 5. C. 629–643.

DOI: [10.1002/2015GB005351](https://doi.org/10.1002/2015GB005351).

Mueller D.S., Wagner C.R., Rehmel M.S., Oberg K.A., Rainville F. Measuring discharge with acoustic Doppler current profilers from a moving boat (ver. 2.0, December 2013) // U.S. Geological Survey Techniques and Methods, book 3, chap. A22, 2013. 95 p. DOI: [10.3133/tm3A22](https://doi.org/10.3133/tm3A22).

Murton J.B., Goslar T., Edwards M.E., Bateman M.D., Danilov P.P., Savvinov G.N., Gubin S.V., Ghaleb B., Haile J., Kanevskiy M., Lozhkin A. V., Lupachev A. V., Murton D.K., Shur Y., Tikhonov A., Vasil'chuk A.C., Vasil'chuk Y.K., Wolfe S.A. Palaeoenvironmental interpretation of Yedoma Silt (ice complex) deposition as cold-climate loess, Duvanny Yar, Northeast Siberia // *Permafrost and periglacial processes*. 2015. T. 26. № 3. C. 208–288. DOI: [10.1002/PPP.1843](https://doi.org/10.1002/PPP.1843).

Pokrovsky O.S., Manasypov R.M., Loiko S., Shirokova L.S., Krickov I.A., Pokrovsky B.G., Kolesnichenko L.G., Kopysov S.G., Zemtsov V.A., Kulizhsky S.P., Vorobyev S.N., Kirpotin S.N. Permafrost coverage, watershed area and season control of dissolved carbon and major elements in western Siberian rivers // *Biogeosciences*. 2015. T. 12. № 21. C. 6301–6320. DOI: [10.5194/bg-12-6301-2015](https://doi.org/10.5194/bg-12-6301-2015).

Sher A. Yedoma as a store of paleoenvironmental records in Beringida // *Beringia Paleoenvironmental Workshop* / Под ред. Elias S., Brigham-Grette J. 1997. C. 92–94.

Szupiany R.N., Weibel C.L., Guerrero M., Latosinski F., Wood M.S., Ruben L.G.D., Oberg K. Estimating sand concentrations using ADCP-based acoustic inversion in a large fluvial system characterized by bi-modal suspended-sediment distributions // *Earth Surface Processes and Landforms*. 2019. T. 44. № 6. C. 1295–1308. DOI: [10.1002/esp.4572](https://doi.org/10.1002/esp.4572).

Zanina O.G., Gubin S. V., Kuzmina S.A., Maximovich S. V., Lopatina D.A. Late-Pleistocene (MIS 3-2) palaeoenvironments as recorded by sediments, palaeosols, and ground-squirrel nests at Duvanny Yar, Kolyma lowland, northeast Siberia // *Quaternary science reviews*. 2011. T. 30. №17–18. C. 2107–2123. DOI: [10.1016/j.quascirev.2011.01.021](https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2011.01.021).

Lozhkin A. V., Lupachev A. V., Murton D.K., Shur Y., Tikhonov A., Vasil'chuk A.C., Vasil'chuk Y.K., Wolfe S.A. Palaeoenvironmental interpretation of Yedoma Silt (ice complex) deposition as cold-climate loess, Duvanny Yar, Northeast Siberia. *Permafrost and periglacial processes*, 2015, vol. 26, iss. 3, pp. 208–288. DOI: [10.1002/PPP.1843](https://doi.org/10.1002/PPP.1843).

Pokrovsky O.S., Manasypov R.M., Loiko S., Shirokova L.S., Krickov I.A., Pokrovsky B.G., Kolesnichenko L.G., Kopysov S.G., Zemtsov V.A., Kulizhsky S.P., Vorobyev S.N., Kirpotin S.N. Permafrost coverage, watershed area and season control of dissolved carbon and major elements in western Siberian rivers. *Biogeosciences*, 2015, vol. 12, iss. 21, pp. 6301–6320. DOI: [10.5194/bg-12-6301-2015](https://doi.org/10.5194/bg-12-6301-2015).

Rusanov B.S., Borodenkova Z.F., Goncharov V.F. *Geomorfologiya Vostochnoi Yakutii [Geomorphology of Eastern Yakutia]*. Yakutsk, Publ. Yakutknigoizdat, 1967. 376 p. (In Russian).

Sher A. Yedoma as a store of paleoenvironmental records in Beringida. In Elias S., Brigham-Grette J. (eds.) *Beringia Paleoenvironmental Workshop*. 1997, pp. 92–94.

Shilo N.A., Tomirdiaro S.V. Paleogeografiya i absolyutnaya geokhronologiya pozdnego pleistotsena na severo-vostoke Sibiri [Paleogeography and absolute geochronology of the late Pleistocene in the northeast of Siberia]. In Shumilov Yu.V. (ed.) *Merzlotno-geologicheskie protsessy i paleogeografiya nizmennosti Severo-Vostoka Azii [Permafrost-geological processes and paleogeography of the lowlands of Northeast Asia]*. Magadan, 1982, pp. 9–22. (In Russian).

Solov'ev P.A. Alasnyi rel'ef Tsentral'noi Yakutii i ego proiskhozhdenie [Alas relief of Central Yakutia and its origin]. In Grave N.A. (ed.) *Mnogoletnemerzlye porody i soputstvuyushchie im yavleniya na territoriya Yakutskoi ASSR [Permafrost rocks and accompanying phenomena on the territory of the Yakut ASSR]*. Moscow, Publ. of Academy of Science USSR, 1962, pp. 38–53. (In Russian).

Szupiany R.N., Weibel C.L., Guerrero M., Latosinski F., Wood M.S., Ruben L.G.D., Oberg K. Estimating sand concentrations using ADCP-based acoustic inversion in a large fluvial system

characterized by bi-modal suspended-sediment distributions. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2019, vol. 44, iss. 6, pp. 1295–1308. DOI: [10.1002/esp.4572](https://doi.org/10.1002/esp.4572).

Tomirdiario S.V. Lessovo-ledovaya formatsiya verkhnepleistotsenovoi giperzony v Severnom polusharii [Loess-ice formation of the Upper Pleistocene hyperzone in the Northern Hemisphere]. *Trudy Severo-Vostochnogo kompleksnogo instituta DVNTs AN SSSR [Proceedings of the North-Eastern Complex Institute of the Far Eastern Scientific Center of the USSR Academy of Sciences]*. Iss. 68. Magadan, Book publishing house, 1975, pp. 170–197. (In Russian).

Tomirdiario S.V. *Lessovo-ledovaya formatsiya Vostochnoi Sibiri v pozdnem pleistotsene i golotsene [Loess-ice formation of Eastern Siberia in the late Pleistocene and Holocene]*. Moscow, Publ. Nauka, 1980. 184 p. (In Russian).

Tomirdiario S.V. Chernen'kii B.I. *Kriogenno-eolovye otlozheniya Vostochnoi Arktiki i Subarktiki [Cryogenic-eolian deposits of the Eastern Arctic and Subarctic]*. Moscow, Publ. Nauka, 1987. 196 p. (In Russian).

Vasil'chuk Yu.K., Vaykmyae R.A., Punning Ya.-M.K., Leybman M.O. Oxygen isotope distribution, palynology and hydrochemistry of wedge ice in the organomineral complex of Duvanny Yar type section. *Transactions (Doklady) of the USSR Academy of Sciences. Earth Science Sections. Geology*, 1987, vol. 292, pp. 69–72 (Russ. ed.: Vasil'chuk Yu.K., Vaikmyae R.A., Punning Ya.M., Leibman M.O. Izotopiya, palinologiya i gidrokimiya povtorno-zhil'nykh l'dov organo-mineral'nogo kompleksa Duvannyi Yar. *Doklady akademi nauk SSSR*, 1987, vol. 292, iss. 5, pp. 1207–1211).

Vasil'chuk Y.K., Budantseva N.A., Bartova A.V., Zimov S.A. Variatsii stabil'nykh izotopov kisloroda v povtorno-zhil'nykh l'dakh tsiklitnoi edomy Stanchikovskogo Yara na reke Malyi Anyui [Variations of the stable oxygen isotopes in massive ice wedges of cyclical Yedoma of Stanchikovsky Yar on the Maly Anyui River]. *Arktika i Antarktika [Arctic and Antarctica]*, 2018, no. 3, pp. 37–56.

(In Russian; abstract in English).
DOI: [10.7256/2453-8922.2018.3.27121](https://doi.org/10.7256/2453-8922.2018.3.27121).

Vas'kovskii A.P. Ocherk stratigrafii antropogennykh (chetvertichnykh) otlozhenii krainego severo-vostoka Azii [Essay on the stratigraphy of anthropogenic (Quaternary) deposits of the extreme northeast of Asia]. In Egiazarov B.Kh. (ed.), *Geologiya Koryakskogo nagor'ya* [*Geology of the Koryak Highlands*]. Moscow, Publ. Gosgortekhizdat, 1963, pp. 143–168. (In Russian).

Zanina O.G., Gubin S. V, Kuzmina S.A., Maximovich S. V, Lopatina D.A. Late-Pleistocene (MIS 3-2) palaeoenvironments as recorded by sediments, palaeosols, and ground-squirrel nests at Duvanny Yar, Kolyma lowland, northeast Siberia. *Quaternary science reviews*, 2011, vol. 30, iss. 17–18, pp. 2107–2123.
DOI: [10.1016/j.quascirev.2011.01.021](https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2011.01.021).