

DOI: 10.7868/S2949179726010046

УДК 556.113.3(282.251.3)

Оригинальная статья

ПРОСТРАНСТВЕННАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ МУТНОСТИ ВОДЫ В БАССЕЙНЕ Р. ЛЕНЫ

© 2026 г. Е. А. Фингер¹, *, С. Р. Чалов^{1, 2}, Д. В. Магрицкий¹

¹Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, географический факультет, Москва, Россия

²Российский университет транспорта, Москва, Россия

* E-mail: fingerte@gmail.com

Поступила в редакцию 16.12.2024

После доработки 21.06.2025

Принята к публикации 17.10.2025

Аннотация. Сток наносов является важной характеристикой, отражающей интенсивность денудации в речном бассейне. Его оценка проводится на основе данных о стоке и мутности воды, доступных по ограниченному числу гидрометрических постов. В статье проведено обобщение информации с 53 гидрометрических постов (с продолжительностью измерений не менее 8 лет) в бассейне Лены. Выполнена оценка факторов формирования мутности для их водосборов (характеристики потери почвы, морфометрии рельефа, стока воды, антропогенной нарушенности русел). На этой основе получены регрессионные зависимости формирования мутности, пересчет которых на 700 водосборов средних рек бассейна позволил воспроизвести пространственное распределение мутности воды в пределах бассейна Лены за два отрезка времени, соответствующих всему периоду инструментальных наблюдений и современному климатическому периоду (после 1978 г.). Распределение мутности воды наглядно отражает контрастный режим эрозионно-аккумулятивных процессов в речном бассейне. Области эрозии с 2–3-кратным усилением денудации приурочены к горным районам, располагающимся по периферии водосбора. Средняя мутность воды в бассейне достигает максимальных значений >50 г/м³ на притоках Витима (Муя, Таксима, Бамбуйка, Мама), где ведется разработка полезных ископаемых, на притоках Олекмы-Чара и Дырын-Юрях, в восточной и южной частях бассейна Алдана. Полученные данные являются основой для дальнейших балансовых оценок перераспределения вещества в речном бассейне и могут быть использованы для определения стока наносов на неизученных участках речной сети.

Ключевые слова: сток наносов; водосбор; морфометрия; эрозия; климат; р. Лена

Финансирование. Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (проект 075-15-2025-008 от 27.02.2025 и в рамках государственного задания № 103-00001-26-00 от 15.01.2026).

Ссылка для цитирования: Фингер Е. А., Чалов С. Р., Магрицкий Д. В. (2026) Пространственная изменчивость мутности воды в бассейне р. Лены. *Геоморфология и палеогеография*. Т. 57. № 1. С. 58–78. <https://doi.org/10.7868/S2949179726010046>

SPATIAL VARIABILITY OF SUSPENDED SEDIMENT CONCENTRATION OVER THE LENA RIVER BASIN

E. A. Fingert^{a, #}, S. R. Chalov^{a, b}, and D. V. Magritskiy^a

^a*Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Moscow, Russia*

^b*Russian University of Transport, Moscow, Russia*

[#]*E-mail: fingerte@gmail.com*

Received December 16, 2024

Revised June 21, 2025

Accepted October 17, 2025

Abstract. Sediment flux is an important characteristic reflecting the intensity of denudation in a river basin. Its assessment is based on *SSC* data available from a limited number of hydrometric gauges. In the article, information from 53 hydrological gauges (with the duration of measurements not less than 8 years) was summarised for the Lena basin and the factors of its formation were assessed for the catchments of the gauges (characteristics of soil loss from the catchment, morphometry of relief, water runoff, anthropogenic disturbance of channels and climate). On this basis, regression dependencies of *SSC* formation were obtained, and their recalculation for 700 catchments of small and average rivers in the basin made it possible to reproduce the spatial distribution of water turbidity within the Lena basin for 2 time periods corresponding to the entire instrumental period of observations and the modern climatic period (after 1978). The distribution of *SSC* clearly reflects the contrasting regime of erosion and accumulation processes in the river basin. The area of erosion with 2–3 times increased denudation is confined to mountainous areas located on the periphery of the catchment. Average *SSC* in the basin reaches maximum values $>50 \text{ g/m}^3$ on the Vitim tributaries (Muya, Taksima, Bambuika, Mama), where mining operations are widespread, on the Olekma tributaries – Chara and Dyryn-Yuryakh, in the Aldan basin in its eastern and southern parts. The assessment obtained is the basis for further balance assessments of the redistribution of matter in the river basin and can be used to determine sediment load in unstudied parts of the river network.

Keywords: sediment yield; catchment; morphometry; erosion; climate; Lena River

Funding. The research is implemented under the financial support of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation (project 075-15-2025-008 from 27.02.2025) and state order of No. 103-00001-26-00 or 15.01.2026.

Acknowledgments. For citation: Fingert E. A., Chalov S. R., and Magritskiy D. V. (2026) Spatial variability of suspended sediment concentration over the Lena River Basin. *Geomorfologiya i Paleogeografiya*. Vol. 57. No. 1. P. 58–78 (in Russ). <https://doi.org/10.7868/S2949179726010046>

1. ВВЕДЕНИЕ

Речные бассейны представляют транзитную область материковой части глобального круговорота воды, где под действием водного стока и силы тяжести осуществляется нисходящий литодинамический поток, включающий в себя денудацию, транспорт и перераспределение продуктов эрозии (Алексеевский, Чалов, 1997; Чалов и др., 2017). Основную информацию для количественной оценки этих процессов несут данные о мутности воды как основном измеряемом параметре стока наносов (Алексеевский, 1998). При этом наблюдения за мутностью воды на реках России в последние десятилетия неуклонно сокращались. К концу 1970-х гг. сеть Гидрометслужбы СССР систематически наблюдала мутность воды, сток взвешенных наносов и их состав более чем на 1600 постах (Сток наносов..., 1977). В настоящее время эти измерения выполняются менее чем на 700 постах во всей стране (Чалов, 2024).

Недостаточность мониторинговой сети делает актуальным определение мутности по рекам-аналогам, по картам мутности (для рек с площадью водосбора >5 тыс. км²), по картам смыва почв с учетом коэффициента доставки наносов или по эмпирическим формулам. Современные данные о бассейновой составляющей стока наносов доступны из глобальных моделей эрозии почвы (Borelli, 2017) или региональных исследований (Шынберген, 2017; Maltsev, Ivanov, 2022; Мальцев и др., 2025), в том числе использующих алгоритмы определения русловой составляющей (Chalov, Ivanov, 2023).

Вопросы к точности и применимости моделей смыва для арктических территорий, сложности их верификации определяют актуальность применения для определения стока наносов эмпирических зависимостей, основанных на связях между измеренными характеристиками стока наносов и параметрами водосборов (Мозжерин, Мозжерин, 2011). В России (СССР) наибольшую известность получили результаты работ К. Н. Лисицыной (1966), получившей эмпирические уравнения характеристик стока наносов как функцию от следующих факторов: площадь водосбора, модуль стока воды и тип водного режима, продольный уклон русла для равнинных рек и средневзвешенная высота водосбора для горных районов, густота речной сети, состав коренных и почвообразующих пород, доля распаханых и залесенных земель, озерность и заболоченность. На этой основе были составлены карты мутности рек России и стран СНГ, последняя из которых была опубликована в 1996 г. Н. Н. Бобровицкой (2008).

Несмотря на то, что указанные работы охватывали территорию бассейна Лены, обновление

карты мутности является актуальной научной задачей. Здесь вопросы изучения стока наносов востребованы в исследованиях руслового режима рек (Чалов и др., 2019), при проведении исследований влияния разработок россыпей на русловые системы (Магрицкий, 2023), при исследованиях последствий изменения климата (Krylenko et al., 2024). Необходимость обновления данных о мутности воды связана также с наблюдающимися изменениями гидроклиматической системы, трендом на среднегодовое увеличение температуры приземного воздуха и годового объема стока (Магрицкий, 2015) и с 1980-х гг. — на увеличение годовой суммы осадков. Существенные изменения в сток наносов внесла антропогенная составляющая. С 1974 г. ведется эксплуатация Вилюйского водохранилища, а с 2004 г. функционирует Светлинское водохранилище на р. Вилюй. Для бассейна Лены характерными факторами изменения мутности также называют добычу россыпного золота (Shkolnyi, Magritsky, Chalov, 2024) и разрушение многолетнемерзлых пород (Gautier et al., 2021; Chalov, Prokopenko, 2022; Chalov et al., 2023). В то же время последние обобщения мутности воды выполнены на данных до 1978 г. (Тананаев, 2007).

Цель данного исследования — выявить основные факторы формирования средней (среднегодовой) мутности воды в бассейне р. Лены и провести ее пространственный анализ. Для этого решаются следующие задачи: 1) создание актуальной базы данных мутности воды по гидрологическим постам и факторов ее формирования для водосборов постов в среде ГИС; 2) анализ закономерностей пространственного распределения мутности воды и ее факторов и разбор связей между ними статистическими методами; 3) разработка расчетных уравнений мутности воды и создание на их основе карт мутности воды на бассейн Лены для разных временных периодов.

2. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Анализировались среднемесячные расходы наносов и расходы воды на постах в бассейне Лены, на основе которых были рассчитаны среднегодовые и среднегодовые значения мутности воды. Определялась средняя годовая мутность SSC (г/м³) из среднемесячных значений расходов взвешенных наносов R (кг/с) и воды Q (м³/с):

$$SSC = \sum_{i=1}^{12} R_i / \sum_{i=1}^{12} Q_i * 1000.$$

В свою очередь, среднемесячные расходы взвешенных наносов рассчитывают (в подразделениях Росгидромета) на основе среднесуточных или (чаще) среднедекадных значений мутности

и расходов воды. В первом случае для осреднения за сутки используют односрочные или двухсрочные измерения мутности на постоянной вертикали (в настоящее время — обычно вблизи берега), во втором — ежедневные измерения на вертикали с осреднением (объединением проб) за декаду, или по зависимостям между среднедекадными расходами воды и наносов. Переход от единичной (на вертикали) к средней (в гидростворе) мутности производят с помощью коэффициентов — индивидуальных для каждого поста.

Первичные данные по мутности воды и расходам наносов могут содержать ошибки. Их основные источники, особенно с 1990х гг., — это перенос станции и нерепрезентативность места отбора единичных проб воды на мутность, малые навески наносов на фильтрах (<0.01 г), недостаточное число измерений по всей ширине русла и не за все годы, инструментальные ошибки измерений (по РД 52.08.104—2002 предельные ошибки измерения мутности воды не должны превышать 10–30%), слабая или неоднозначная связь между единичной и средней мутностью, или между декадными R и Q , ошибки в измерениях самих расходов воды и недоучет стока, проходящего во время половодья и паводков по пойме, протокам. Кроме того, на многих постах в бассейне Лены измерения мутности воды и расходов наносов в период ледостава не проводят, используя постоянные, ранее полученные доли зимних месяцев в общей величине годового стока. К сожалению, возможности исследователей в понимании надежности первичных данных сильно ограничены, поскольку подобной информацией во всей ее полноте владеют лишь региональные УГМС. Редкие сведения можно встретить в монографиях “Ресурсы поверхностных вод” (раздел “Наносы” (Ресурсы ..., 1967)), в справочниках “Основные гидрологические характеристики” (в пояснениях к табл. № 11), в Гидрологических ежегодниках (в описании постов, в пояснениях к таблицам расходов наносов и мутности). Тем не менее, в Гидрологических ежегодниках, из которых авторы брали сведения по мутности воды и расходам наносов, принято размещать данные с предельными отклонениями менее ± 15 –20 (Наставления..., 1958). Кроме того, все данные проверялись авторами вручную, в том числе с привлечением дополнительной информации из справочников и тематической литературы, позволивших установить возможные нарушения рядов. В отдельных случаях по нескольким постам данные отбраковывались.

Были отобраны посты, период наблюдения на которых составлял не менее 8 лет, что соответствует минимальной продолжительности ряда наблюдений за стоком взвешенных наносов рек,

корректной для оценки пространственно-временной изменчивости интенсивности эрозии (9.1 ± 1.2 года для оценки пространственной изменчивости, 7.6 ± 1.2 года для оценки временной изменчивости, согласно (Гусаров, 2017)). Таким образом, была создана электронная база данных рядов мутности по 53 постам с продолжительностью измерения от 9 до 72 лет.

Для каждого водосбора были рассчитаны значения мутности за весь инструментальный период наблюдений и отдельно за современный климатический период 1978–2020 гг. (Третий оценочный ..., 2022). Выбор 1978 г. определяется наблюдаемым трендом изменений климата в Арктике, установленным, в частности, по реанализу как для всего бассейна Лены, так и для его отдельных частей (Chalov, 2023). Весь период наблюдений на постах составляет от 9 лет на постах Орлово (р. Пилюда) и Миня (р. Миня) до 69 лет на посту Змеиново (р. Лена) (табл. 1).

Для 53 используемых в работе постов на основе ЦМР MERIT, имеющей разрешение 3 угловые секунды (Yamazaki et al., 2019), были выделены водосборы. Для всех водосборов определены значения 69 факторов формирования мутности воды, которые можно разделить на 6 категорий: условия развития бассейновой эрозии (I), морфометрические характеристики водосборов (II), характеристики водного стока (III), антропогенная нарушенность русел и речных долин (IV), климатические характеристики (V) и распространение многолетнемерзлых пород (ММП, VI). Факторы I, II, IV и VI рассматривались как статичные, неизменяющиеся во времени (между разными периодами оценки стока наносов), что соответствует существующим оценкам. Доступность многолетних рядов данных о гидрологических (категория III) и климатических (категория V) факторах позволила получить определения для разных периодов осреднения.

Среди факторов группы I рассматривались составляющие универсального уравнения эрозии почв (Цыпленков и др., 2022), и для каждого водосбора определялись минимальное, среднее и максимальное значения этих факторов. Всем факторам были присвоены числовые обозначения, используемые далее в статье: фактор C землепользования (1 — максимальное значение C , 2 — минимальное значение C , 3 — среднее значение C), фактор LS рельефа (4 — $\max LS$, 5 — $\min LS$, 6 — среднее LS), фактор эрозионного потенциала осадков R (7 — $\max R$, 8 — $\min R$, 9 — среднее R) и фактор эродированности почв K (10 — $\max K$, 11 — $\min K$, 12 — среднее K), а также их произведения $C*LS$ (13 — $\max C*LS$, 14 — $\min C*LS$, 15 — среднее $C*LS$), $C*R$ (16 — $\max C*R$, 17 — $\min C*R$, 18 — среднее $C*R$), $C*K$

Таблица 1. Среднемноголетние значения мутности, период и продолжительность измерений на гидрологических постах в бассейне р. Лены**Table 1.** Average SSC, measurement period and duration at hydrological gauges in the Lena River Basin

№	Пост	Мутность, г/м ³			Длина ряда наблюдений, лет			Годы измерений
		за весь период	до 1978	1978–2020	за весь период	до 1978	1978–2020	
1	Алдан–Верхоянский Перевоз	34.5	42.2	25.7	43	23	20	1956–1998
2	Алдан–Охотский Перевоз	17.5	24.3	15.2	56	14	42	1941, 1943–1945, 1969–2020
3	Алдан–Томмот	12.2	16.6	9.7	66	24	42	1943–1944, 1957–2020
4	Аллах–Юнь–Аллах	38.4		38.4	21	0	21	1987–2007
5	Амалат–Рассошино	19.7		19.7	30	0	30	1991–2020
6	Амга–Амга	13.8	15.3	12.8	26	10	16	1969–1990, 1994–1997
7	Багдарин–Багдарин	39.6	43.9	38.9	44	6	38	1966, 1973–1974, 1976–1986, 1988, 1990–2002, 2005–2020
8	Большой Патом–Патом	29.1		29.1	16	0	16	1985–1999, 2001
9	Большая Черепаниха–Бом	9.0	8.5	9.1	45	6	39	1973–1993, 1995–1996, 1998–2020
10	Большая Тира–Тира	13.8	13.9	13.7	19	13	6	1966–1980, 1982–1983, 1985, 1994
11	Ботома–Бролог	15.3	16.0	15.0	59	17	42	1962–2020
12	Верхняя Нерюнга–Нерюнгри	42.2	50.6	41.0	48	6	42	1973–2020
13	Виллой–Сунтар	7.5	12.6	4.9	64	22	42	1957–2020
14	Виллой–Сюльдюкар	4.9	10.5	4.1	16	2	14	1977–1992
15	Виллой–Усть-Амбардах	6.7	9.3	6.3	45	6	39	1973–1996, 2000–2020
16	Виллой–Хатырык–Хомо	29.0	38.7	22.7	51	20	31	1957–1966, 1968–1970, 1972–1997, 1999–2010
17	Витим–Бодайбо	37.0	42.9	30.7	50	26	24	1941–1942, 1946–1953, 1955, 1957–1961, 1969–1986, 1989, 1991–1994, 1996–1997, 2009–2017
18	Витим–Романовка	31.1	31.7	30.9	48	11	37	1957–1958, 1970–1986, 1989, 1991–2003, 2006–2020
19	Жуя–Светлый	61.1	67.0	56.3	20	9	11	1970–1989
20	Калар–Средний Калар	25.8		25.8	21	0	21	1991, 1993–2003, 2006–2014
21	Каренга–Тунгокочен	8.5		8.5	31	0	31	1989–2020
22	Киренга–Шорохово	9.1	12.0	7.0	67	29	38	1949–1955, 1957–1986, 1989–2000, 2002–2003, 2005–2020
23	Конда–Куанда	13.9		13.9	18	0	18	1990, 2003, 2005–2020
24	Кунерма–Кунерма	7.6		7.6	11	0	11	1991–2000, 2002
25	Кута–Максимово	29.7	35.6	27.5	51	14	37	1964–1968, 1970–1979, 1981–1986, 1989–2000, 2002–2005, 2007–2020

Таблица 1. Окончание
Table 1. End

№	Пост	Мутность, г/м ³			Длина ряда наблюдений, лет			Годы измерений
		за весь период	до 1978	1978–2020	за весь период	до 1978	1978–2020	
26	Кута–Ручей	24.6	28.5	22.3	54	20	34	1947–1951, 1954–1956, 1958, 1961–1963, 1971–1979, 1981–1982, 1984–1986, 1989–2000, 2002–2003, 2005–2014, 2017–2020
27	Кемпендай–Кемпендай	38.7		38.7	35	0	35	1986–2020
28	Лена–Кюсюр	40.3	39.7	40.7	53	21	32	1936, 1944, 1960–2010
29	Лена–Табага	32.9	38.8	29.8	64	22	42	1957–2020
30	Лена–Чанчур	10.3	9.2	10.4	34	2	32	1977–1986, 1989, 1991, 1993–1994, 1997, 1999–2005, 2009–2020
31	Лена–Змеиново	25.7	37.0	14.7	69	34	35	1941–1942, 1947–1983, 1985–1986, 1989–1999, 2001–2002, 2005–2006, 2008–2020
32	Лена–Солянка	30.9	25.8	33.9	66	24	42	1955–2020
33	Лена–Качуг	20.0	30.9	12.8	66	26	40	1953–1986, 1989–2020
34	Манзурка–Зуева	33.7		33.7	28	0	28	1989, 1991, 1993–2006, 2008, 2010–2020
35	Марха–Малыкай	17.0	19.6	16.6	49	7	42	1972–2020
36	Миня–Миня	11.4		11.4	9	0	9	1989–1996, 1999
37	Моркока–Хабардино	9.8	9.7	9.8	21	4	17	1975–1995
38	Муя–Таксимо	23.4		23.4	38	0	38	1980–1986, 1989–2003, 2005–2020
39	Намана–Мякинда	60.0	67.9	56.4	35	11	24	1965, 1969–1996, 1999–2001, 2003–2005
40	Нюя–Комака	4.0	3.0	4.1	29	3	26	1976–1989, 2006–2020
41	Олекма–Куду–Кель	20.3	13.5	22.6	56	14	42	1965–2020
42	Пеледуй–Сользавод	32.0	23.2	35.7	10	3	7	1976–1980, 1982–1986
43	Пилюда–Орлова	3.7		3.7	9	0	9	2009–2012, 2014–2016, 2018–2019
44	Таюра–Таюра	18.8	15.7	20.0	46	13	33	1966–1979, 1982, 1985–1986, 1989–2000, 2002–2003, 2005, 2007–2020
45	Тимптон–Нагорный	2.9	5.7	1.9	58	16	42	1963–2021, 2020
46	Тутура–Грехово	23.4	27.2	16.1	43	28	15	1950–1962, 1964–1986, 1991–1997
47	Улахан–Ботуобия–Захар	5.2		5.2	28	0	28	1993–2020
48	Улахан–Ботуобия–Тас–Юрях	14.5	25.7	11.3	18	4	14	1975–1992
49	Ципа–Ую	10.7		10.7	23	0	23	1991–2003, 2005–2014
50	Чара–Токко	40.9	26.8	45.6	56	14	42	1965–2020
51	Чара–Чара	47.5	63.5	41.0	59	17	42	1962–2020
52	Чона–Чона	6.0	9.7	5.8	45	3	42	1976–2020
53	Чульман–Чульман	15.5	14.5	16.6	44	23	21	1956–1999

(19 – $\max C^*K$, 20 – $\min C^*K$, 21 – среднее C^*K), LS^*R (22 – $\max LS^*R$, 23 – $\min LS^*R$, 24 – среднее LS^*R), LS^*K (25 – $\max LS^*K$, 26 – $\min LS^*K$, 27 – среднее LS^*K), R^*K (28 – $\max R^*K$, 29 – $\min R^*K$, 30 – среднее R^*K). Фактор эродированности почвы K был получен путем пересчета данных Harmonized World Soil Database по формуле (Wischmeier, Smith, 1978). Фактор эрозионного потенциала осадков R – из модели GLORED (Panagos et al., 2017). Фактор землепользования C был получен путем реклассификации файлов Land Use-Land Cover по модели GlobCover2009 (Bontemps et al., 2011).

Среди факторов категории II рассматривались площадь водосбора (31), длина линий тока (32, для водосборов площадью более 900 км²), плотность линий тока (33), а также минимальные, средние и максимальные значения высоты водосбора (34–36), его крутизны (37–39), факторы уклона и экспозиции склона, определяющие условия поступления суммарной солнечной радиации (40–42), общая (43–45) и профильная (46–48) кривизна, относительная высота над тальвегом русловой сети (49–51). Все характеристики получены с ЦМР MERIT встроенными инструментами SAGA GIS-длина линий тока (Channel Network) и относительная высота над урезом (Vertical Distance to Channel Network)-Terrain Analysis|Channels, крутизна (Slope), кривизна общая (General Curvature) и кривизна профильная (Profile Curvature)-Terrain Analysis|Morphometry, факторы уклона и экспозиции склона, по которым рассчитывается потенциальное поступление солнечной радиации (Annual Insolation)-Terrain Analysis|Lighting согласно модулю Saga-GIS Tool Potential Annual Insolation (https://saga-gis.sourceforge.io/saga_tool_doc/7.5.0/ta_lighting_7.html).

Были учтены следующие гидрографические и стоковые характеристики (категория III): длина водотоков (52) и густота речной сети (53), полученные путем оцифровки с топографических карт масштаба 1:500000, и среднегодовые расходы воды (54 – за весь период наблюдений, 55 – за 1978–2020 гг.). Исходные данные для определения брались из ежегодников и сервиса АИС-ГМВО.

Оценка антропогенной нарушенности в пределах водосборов (группа факторов IV) проводилась по таким параметрам, как длина нарушенных русел (56), их доля (57, отношение длин нарушенных русел ко всей длине речной сети) и густота нарушенных русел (58). К нарушенным руслам относились линейные участки антропогенно переформированного русла, характеризующиеся морфологическими изменениями русла и сведением растительности в пределах пойменного комплекса, приуроченные преимущественно к разработке россыпей. Для

определения факторов землепользования и антропогенной нарушенности использовались космические снимки “на конкретную дату”, которые соответствовали оценке (Shkolnyi et al., 2024).

В качестве климатических факторов (группа факторов V) рассматривались суммарные осадки (59 – за весь период наблюдений, 60 – за 1978–2020 гг.), водный эквивалент растаявшего снега (61–62), температура почвы в слое 0–7 см (63–64), температура воздуха (65–66), глубина снега в метрах водного эквивалента (67–68). Данные характеристики осреднялись за те же периоды, что и мутность, и были получены из реанализа ERA5-Land. Отдельно рассчитывался процент покрытия водосбора многолетнемерзлыми породами ММП (69, группа факторов VI) по данным Circum-Arctic Map of Permafrost and Ground-Ice Conditions, Version 2 (Brown et al., 2002). Поиск связей между факторами формирования мутности воды и средней мутностью проводился на нескольких пространственных уровнях (рис. 1). Во-первых, все 53 водосбора были включены в 4 крупнейших гидрографических бассейна – Вилюя (10 водосборов), Алдана (8 водосборов), верхней Лены (29 водосборов), средней и нижней Лены (6 водосборов). Деление на верхнюю, среднюю и нижнюю Лену производилось согласно водному кадастру: Лена–Солянка относится к среднему и нижнему течению, а Лена–Змеиново – к верхней Лене. Между ними бассейны притоков относятся к верхней Лене, а межбассейновые территории, у которых замыкающий створ – Солянка, попали в категорию средней и нижней Лены.

Во-вторых, объединялись бассейны по широтным зонам (50–55° с.ш. (8 водосборов), 55–60° с.ш. (24 водосбора), 60–65° с.ш. (20 водосборов)). Такое выделение отражает климатическое влияние через средние температуры за год и по сезонам, даты формирования снежного покрова и вскрытия рек. Три бассейна попали в зону 65–70° с.ш. и были исключены из статистического анализа в связи с малым размером выборки.

В-третьих, бассейны были объединены по средней высоте водосбора (возвышенности 200–500 м – 19 водосборов, низкие горы 500–1000 м – 18 водосборов и средние горы 1000–2000 м – 16 водосборов). В-четвертых, чтобы учесть азональные и полизональные бассейны, районирование производилось по величине водосбора: малые (<2000 км² – 7 водосборов), средние (2000–50000 км² – 31 водосбор) и большие (>50000 км² – 15 водосборов). В-пятых, были выделены районы по схожим условиям распространения многолетнемерзлых пород: со сплошной мерзлотой 90–100% площади водосбора – 23 водосбора, с прерывистой

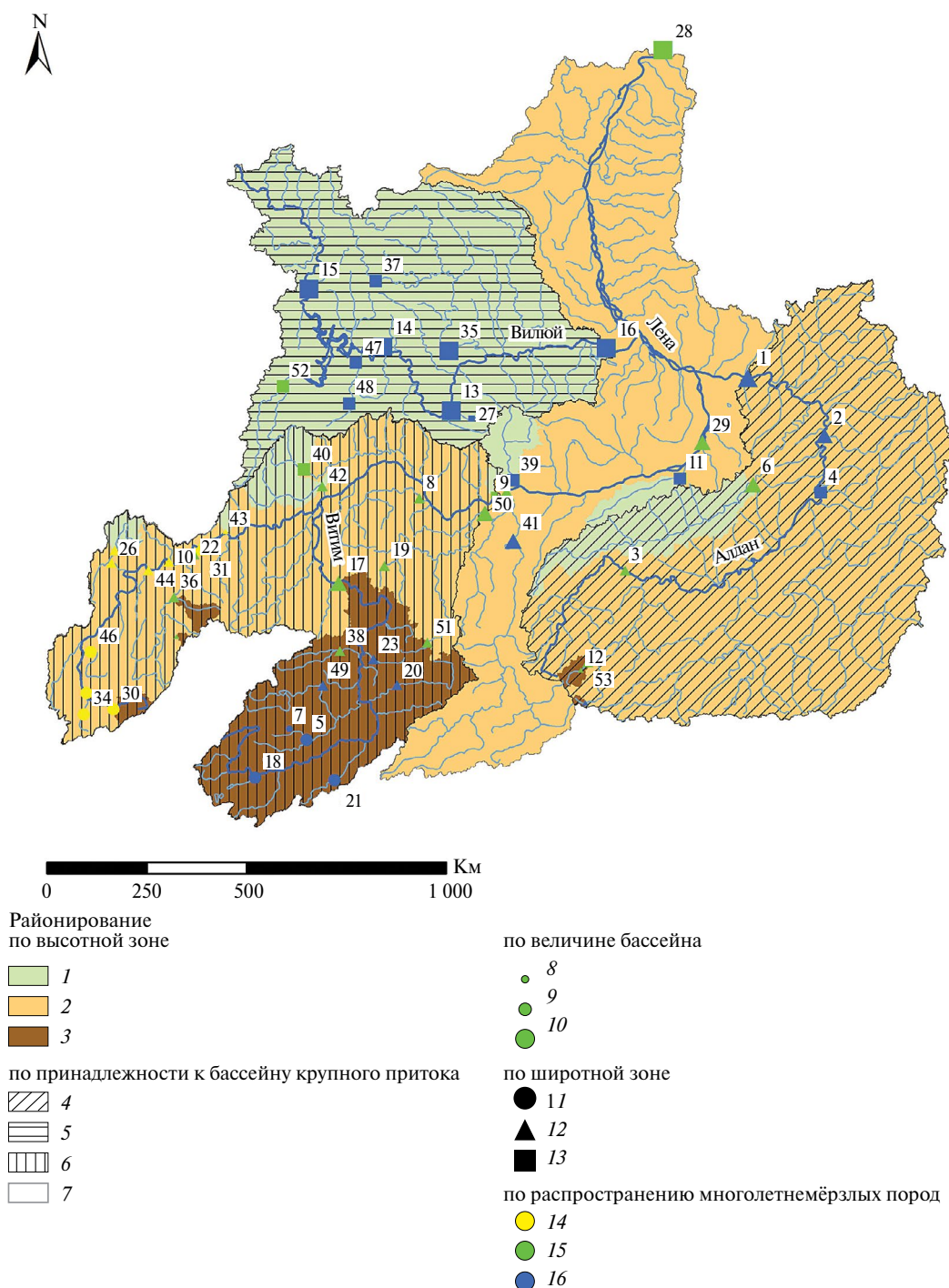


Рис. 1. Районирование бассейна р. Лены.

По высотной зональности: 1 – возвышенности, 2 – низкоротный, 3 – средневисотный; по принадлежности к крупному бассейну притока: 4 – Алдан, 5 – Вилуй, 6 – верхняя Лена, 7 – средняя и нижняя Лена; по размеру бассейна: 8 – малый, 9 – средний, 10 – большой; по широтной зональности: 11 – 50–55° с.ш., 12 – 55–60° с.ш., 13 – 60–65° с.ш.; по распространению многолетнемерзлых пород, в %: 14 – 10–50, 15 – 50–90, 16 – 90–100. Гидросеть построена на основе оцифрованных топографических карт масштаба 1:50000. 1–53 – номера гидрометрических постов (см. табл. 1).

Fig. 1. Lena River Basin zoning.

By altitude zone: 1 – upland, 2 – low mountains, 3 – medium mountains; by belonging to a major tributary basin: 4 – Aldan, 5 – Vilyui, 6 – upper Lena, 7 – middle and lower Lena; by basin size: 8 – small, 9 – medium, 10 – large; by latitude zone: 11 – 50–55° N, 12 – 55–60° N, 13 – 60–65° N; by distribution of permafrost, %: 14 – 10–50, 15 – 50–90, 16 – 90–100. River network is based on topographic maps of scale 1:50000. 1–53 – numbers of hydrometrical gauges from tabl. 1.

мерзлотой 50–90% – 20 водосборов и с островной мерзлотой 10–50% – 7 водосборов. У трех водосборов площадь мерзлоты <10% в пределах водосбора.

Для двух выбранных периодов рассчитывались парные корреляции Пирсона связи мутности с факторами ее формирования. Коэффициенты корреляции >0.7 считались значимыми и >0.5 – достоверными. По отобранным на основе парных корреляций Пирсона предикторам, имеющим достоверную корреляцию ($\text{corr} > 0.5$) с мутностью воды, для соответствующих выборок водосборов были получены уравнения множественной регрессии. Предикторы, связанные с мутностью воды наибольшими коэффициентами множественной корреляции при уровне статистической значимости менее 0.05 ($p \leq 0.05$), отобраны для построения регрессионных уравнений мутности воды для соответствующих пространственных группировок.

Для экстраполяции полученных регрессионных уравнений на неизученную часть бассейна выделены 687 водосборов на основе ЦМР GMTED2010 с разрешением 250 м (Danielson, J.J., Gesch, 2011). Выделение проводилось с учетом критического числа ячеек сетки ($n = 500$), при “слиянии” которых образуется речная сеть, близкая к фактической на топографической карте масштаба 1:4000000, средняя площадь водосбора при этом получается около 2000 км². Указанное выделение соответствует используемой в модели формирования стока в программном комплексе ECOMAG (Мотовилов, 2017), что позволяет в дальнейшем совместить результаты расчетов мутности воды с данными гидрологического моделирования. Для этих 687 водосборов посчитаны факторы, использованные в качестве предикторов в регрессионных уравнениях, и для них выполнены расчеты средней мутности воды SSC .

3. РЕЗУЛЬТАТЫ

3.1. Факторы формирования мутности воды

Крупный речной бассейн отличается контрастными условиями формирования стока наносов. Оценка отклонений от среднего в процентах для каждого водосбора показала (рис. 2), что около $1/3$ рассмотренных факторов изменяются в бассейне Лены в диапазоне от ± 2 до $\pm 6\%$ от среднего плюс 2 стандартных отклонения. Отклонения максимальных значений от среднего достигают здесь 13–17%. Наибольшей вариабельностью ($\pm 400\%$) между водосборами постов отличается общая кривизна (категория II, 43–45), определяющая скорость склоновых процессов. Общая кривизна является совокупной мерой кривизны земной поверхности и стремится к нулю (прямой профиль). Общая кривизна слабо выражена: ее минимальные

значения не ниже -0.04 , а максимальные не превышают 0.04. Профильная кривизна дифференцирует склоны в вертикальном направлении на выпуклые (преобладает эрозия), вогнутые (преобладает аккумуляция) или прямые. Профильная кривизна (46–48) имеет разброс значений на порядок меньше общей. Стремятся к прямому профилю малые водосборы на верхней Лене, наибольшие перепады крутизны характерны для замыкающих створов крупных притоков и нижнего течения р. Лены.

В пределах средних значений меняются гидрографические факторы (категория III) – длина водотоков (52), среднегодовой расход воды (54) и густота речной сети (53). Последний фактор ниже в бассейне Вилюя в среднем по всему бассейну составляет ≈ 0.3 км/км² и >0.4 для малых водосборов на верхней Лене (р. Миня и Кунерма). Наравне с гидрографическими и стоковыми факторами выделяются факторы антропогенной нарушенности (категория IV) – доля нарушенных русел (57), их густота (58) и длина (56). Нарушенные участки русел наблюдаются на 29 из 53 водосборов, преимущественно в бассейнах Алдана и Витима. Доля нарушенных русел по этим 29 бассейнам не превышает первых процентов, за исключением постов Аллах–Юнь–Аллах (5.9%), Жуя–Светлый (12.8%) и Багдарин–Багдарин (21.5%). Изменчивость в $\pm(2–6)\%$ характерна для статичных факторов, связанных с длиной водотока, за исключением среднесноголетнего значения расхода воды.

Условия развития бассейновой эрозии (LS , R и C) (категория I) и факторы рельефа (относительная высота над урезом, крутизна, высота) (категория II) меняются между отдельными водосборами в пределах 2–4%.

Фактор землепользования C изменяется от 0 в зоне многолетнемерзлых пород до 0.1 в ряде бассейнов на верхней Лене и Витиме (с максимумом 0.15 в бассейне Витима–Бодайбо). Фактор рельефа LS изменяется в широких пределах: от 0 на равнинных участках до >300 на Алдане и Олекме. Эрозионный потенциал осадков наибольшие значения принимает на притоках Витима, Чаре и притоках Алдана, наименьшие – в бассейне Вилюя.

Относительная высота над урезом, крутизна и высота определяют скорость поступления эрозионного материала с водосбора в водоток. Наиболее крутые склоны наблюдаются в бассейне Чары (1.2°), наименее крутые приурочены к Центральноякутской равнине. Наибольший перепад относительных высот над урезом отмечен для притока Чара, наименьший – для притоков Вилюя.

Склоновые процессы наиболее активны на верхней Лене и в восточной части бассейна, где преобладает горный рельеф. Исток Лены берет

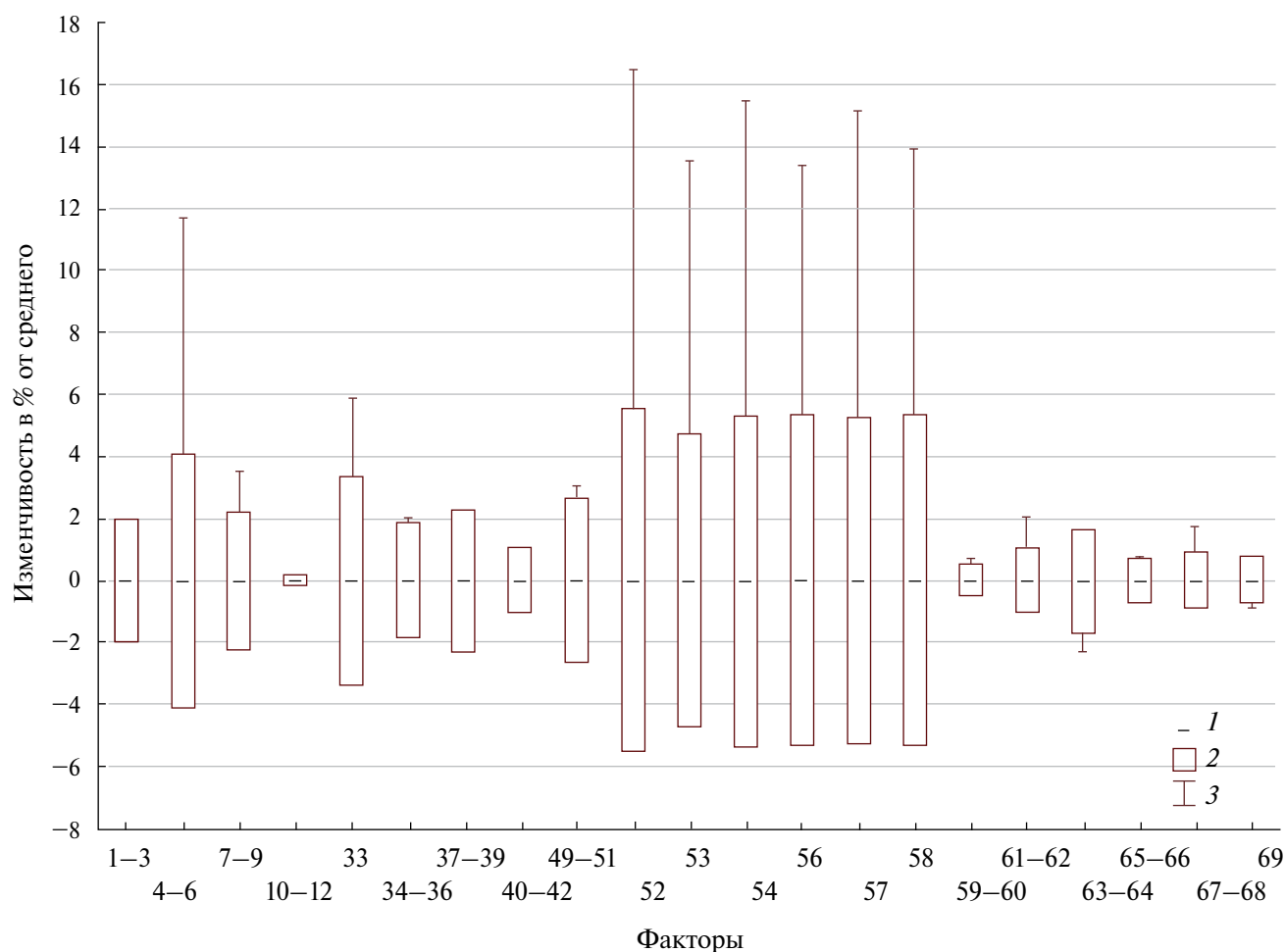


Рис. 2. Изменчивость факторов формирования мутности воды в % от среднего по бассейну Лены.

1 – μ , 2 – $\mu \pm 2\sigma$, 3 – минимум–максимум.

На рисунке отмечены факторы в их совокупном значении: если высота водосбора, то она включает и все максимальные, и все минимальные значения, произведения факторов не учитываются. Номера факторов даны согласно обозначениям в тексте: 1–3 – максимальное, среднее и минимальное значение фактора C , 4–6 – max, среднее и min LS , 7–9 – max, среднее и min R , 10–12 – max, среднее и min K , 33 – плотность линий тока, 34–36 – max, среднее и min значение высоты водосбора, 37–39 – max, среднее и min значение крутизны, 40–42 – max, среднее и min значения условий поступления суммарной солнечной радиации, 49–51 – max, среднее и min значение относительной высоты над тальвегом русловой сети, 52 – длина водотоков, 53 – густота речной сети, 54 – расходы воды за весь период наблюдений, 56 – длина нарушенных русел, 57 – доля нарушенных русел, 58 – густота нарушенных русел, 59–60 – суммарные осадки, где 59 – за весь период наблюдений, 60 – за 1978–2020 гг., 61–62 – водный эквивалент растаявшего снега, 63–64 – температура почвы в слое 0–7 см, 65–66 – температура воздуха, 67–68 – глубина снега в м водного эквивалента.

Fig. 2. Variability of factors of water turbidity formation in % of the average for the Lena River Basin.

1 – mean value, 2 – mean $\pm 2\sigma$, 3 – min–max.

The figure shows the factors in their total value: if the catchment height, it includes all maximum and all minimum values, the multiplications of factors are not taken into account. Numbers according to the designations in the text: 1–3 – maximum, average and minimum values of factor C , 4–6 – max, average and min LS , 7–9 – max, average and min R , 10–12 – max, average and min K , 33 – density of current lines, 34–36 – max, average and min value of catchment elevation, 37–39 – max, average and min value of slope, 40–42 – max, average and min values of conditions of receipt of total solar radiation, 49–51 – max, average and min value of relative height above the thalweg of the channel network, 52 – length of watercourses, 53 – density of river network, 54 – water discharge for the whole observation period, 56 – length of disturbed channels, 57 – share of disturbed channels, 58 – density of disturbed channels, 59–60 – total precipitation (59 – for the whole observation period, 60 – for 1978–2020), 61–62 – water equivalent of melted snow, 63–64 – soil temperature in 0–7cm layer, 65–66 – air temperature, 67–68 – snow depth in m of water equivalent.

начало на склонах Байкальского хребта. Верховья Лены приурочены к Лено-Ангарскому плато и Предбайкальской впадине, которые относятся к среднегорному рельефу. Чуть выше по высотным отметкам водосборы в бассейне Витима, где расположены Становое нагорье, Делюн-Уранский, Кодар, Каларский, Северо- и Южно-Муйский хребты, Витимское плоскогорье. В среднем течении Лены с правого берега впадают притоки с более высокими высотными отметками (протекающие на Патомском нагорье, Олекмо-Чарском нагорье, Олекминском становике, Становом хребте), левобережные притоки протекают по Приленскому плато. Самые низкие водосборы расположены в бассейне Вилюя, где значительную часть занимает Центральная Якутская равнина. Водосборы гидрологических постов Вилюй–Усть-Амбардах и Моркока–Хабардино расположены на Вилюйском плато. Существенно выше хребты в бассейне Алдана: Алданское нагорье, Алдано-Учурский хребет, хребет Сетте-Дабан, хребет Улаханбом, Эльгинское плоскогорье, отроги хребта Сунтар-Хаята. На востоке водораздел бассейна Лены проходит по Верхоянским цепям, на юго-востоке – по хребту Джугджур, на юге – по Становому хребту и хребту Черского, на западе граница с притоками Енисея не так ярко выражена в рельефе.

Наименьший размах имеют динамические климатические факторы (категория V), распространение многолетнемерзлых пород (категория VI, от 0 до 100% покрытия водосбора) и фактор эродированности почвы (от 0.146 для северо-восточных районов бассейна до 0.167 в центральных небольших водосборах – минимальные значения фактора, максимальные приурочены к водосборам Алдана и Олекмы (0.19)).

3.2. Оценка роли различных факторов в формировании стока наносов

Неоднородность пространственного распределения факторов формирования мутности воды определяет сложную систему количественных связей между ними и характеристиками стока наносов. Значимые и достоверные корреляции мутности воды с факторами ее формирования прослеживаются только в пределах отдельных группировок водосборов.

Наиболее высокие корреляции факторов и мутности воды выявлены при делении бассейнов по размеру рек на малые ($n = 7$), средние ($n = 31$) и большие ($n = 15$). Для малых бассейнов достоверные связи были отмечены с морфометрическими характеристиками рельефа (категория II – крутизна и кривизна рельефа), для средних бассейнов – с параметрами условий развития бассейновой эрозии (категория I) и антропогенной

нарушенности русел (категория IV). Для крупных бассейнов (табл. 2) достоверно ($\text{corr} = 0.55$) средняя мутность воды растет на водосборах с высокими значениями фактора рельефа (из крупных рек максимальные значения характерны для рек Чара (пост Токко), Алдан (пост Верхоянский перевоз), Лена (пост Змеиново)) и эрозионным потенциалом осадков, принимающим значения от 43 в бассейне Вилюя до 1670 в бассейне Алдана. При этом наблюдается рост SSC с увеличением площади водосбора ($\text{corr} = 0.54$) и среднегодового расхода воды ($\text{corr} = 0.56$). В результате по длине крупных рек наблюдается рост средней мутности: в верховьях Вилюя $\approx 6 \text{ г/м}^3$, затем после Вилюйского водохранилища она падает и на посту Вилюй–Сюльдюкар составляет 4 г/м^3 , и увеличивается в 3–4 раза к устью Вилюя. На Алдане от Охотского Перевоза к Верхоянскому Перевозу среднемноголетняя мутность увеличивается вдвое – с 17.0 до 32.5 г/м^3 . На Лене от Змеиново к Кюсюру мутность равномерно увеличивается с 25.5 г/м^3 до 40.3 г/м^3 . В масштабах бассейна влияние на мутность воды оказывают как суммарные осадки ($\text{corr} = 0.58$), так и эквивалент стаявшего снега ($\text{corr} = 0.54$), что отражает совместное влияние талой и дождевой эрозии в формировании стока наносов.

Среди группировок водосборов, однородных по средней высоте территории, больше всего статистически достоверных факторов выявлено у рек с высотой бассейнов от 200 до 500 м ($n = 19$). Достоверные корреляции ($\text{corr} = 0.53$ – 0.54) отмечены с эрозионными факторами (максимальный и средний эрозионный потенциал осадков и его производные), а также с факторами рельефа (плотность линий тока, максимальная общая и профильная кривизна). Для бассейнов с низкорельефом 500–1000 м ($n = 18$) выявлены достоверные связи мутности со средней относительной высотой над урезом ($\text{corr} = 0.69$), значимые связи – с долей нарушенных русел ($\text{corr} = 0.77$). Для среднегорных бассейнов (1000–2000, $n = 16$) выявлены связи только с морфометрическими факторами рельефа – максимальной высотой ($\text{corr} = 0.54$), минимальной и максимальной общей и профильной кривизной ($\text{corr} = 0.55$ – 0.57).

Мутность рек с водосборов, объединенных по расположению в разных зонах распространения многолетнемерзлых пород, слабее связана с факторами формирования стока наносов. Для районов с долей мерзлоты $>90\%$ достоверная связь ($\text{corr} = 0.5$) есть только с плотностью линий тока, что можно рассматривать как признак ведущей роли мерзлоты в развитии эрозионных процессов. Для районов прерывистого распространения многолетнемерзлых пород отмечены связи

Таблица 2. Корреляционные связи между мутностью воды и факторами ее формирования (для малых, средних и больших рек)
Table 2. Correlation matrix for large, medium and small basins with significant sediment concentration formation factors

Фактор	4	6	7	28	22	16	31	36	35	37	39	38	40	42	43	44	45	46	48	47	49	51	50	52	54	55	56	57	58	59	60	61	62					
Малые водосборы																																						
Мутность средняя за весь период	0.81	0.83	0.57	0.56	0.65	0.55	0.74	0.64	0.67	0.89	0.87	0.82	0.85	0.75	0.87	0.93	0.93	0.98	0.91	0.72	0.13	0.48	0.40	0.68	0.47	0.54	0.68	0.71	0.44	0.29	0.30	0.31	0.05	0.08				
Мутность средняя 1978—2020 гг.	0.82	0.84	0.57	0.56	0.65	0.55	0.74	0.64	0.67	0.89	0.87	0.82	0.85	0.75	0.87	0.93	0.93	0.98	0.92	0.72	0.13	0.48	0.40	0.68	0.47	0.54	0.68	0.72	0.45	0.29	0.30	0.31	0.03	0.07				
Количество достоверных факторов	0						5 — минимальная крутизна, максимальная и средняя общая крутизна, минимальная и максимальная профильная кривизна						0						0						0													
Средние водосборы																																						
Мутность средняя за весь период	0.50	0.28	0.23	0.19	0.32	0.22	0.17	0.15	0.12	0.24	0.19	0.27	0.13	0.06	0.10	0.14	0.15	0.19	0.08	0.30	0.00	0.20	0.15	0.24	0.20	0.14	0.15	0.54	0.05	0.14	0.15	0.21	0.21	0.22				
Мутность средняя 1978—2020 гг.	0.51	0.28	0.20	0.19	0.29	0.20	0.19	0.10	0.12	0.21	0.19	0.29	0.13	0.06	0.10	0.09	0.14	0.15	0.15	0.08	0.30	0.03	0.23	0.24	0.20	0.16	0.15	0.58	0.06	0.14	0.14	0.21	0.21	0.21				
Количество достоверных факторов	1 — максимальный LS						0						0						1 — доля нарушенных русел						0													
Большие водосборы																																						
Мутность средняя за весь период	0.06	0.55	0.68	0.70	0.54	0.67	0.52	0.76	0.57	0.28	0.81	0.64	0.73	0.74	0.75	0.82	0.85	0.36	0.71	0.76	0.63	0.76	0.63	0.67	0.56	0.57	0.58	0.56	0.53	0.58	0.53	0.48	0.48	0.48				
Мутность средняя 1978—2020 гг.	0.16	0.54	0.70	0.70	0.54	0.68	0.52	0.75	0.56	0.25	0.79	0.68	0.73	0.74	0.75	0.81	0.85	0.36	0.71	0.76	0.63	0.76	0.63	0.67	0.56	0.57	0.58	0.71	0.58	0.58	0.58	0.54	0.54	0.54				
Количество достоверных факторов	5 — средний LS , максимальный R , максимальный K^*R , максимальный R^*LS , максимальный R^*C						15 — площадь, максимальная и средняя высота, максимальная и средняя крутизна, максимальное и минимальное поступление солнечной радиации, максимальная и минимальная общая кривизна, минимальная профильная кривизна, максимальная, средняя и минимальная относительные высоты над урезом																	5 — длина водотоков, среднееголетний расход воды за весь период и за 1978—2020 гг.					3 — длина, доля и густота нарушенных русел					8 — суммарные осадки и эквивалент стаявшего снега				

Примечание. Приведены только достоверные корреляции.

с отдельными параметрами факторов всех категорий, кроме гидрографических (стоковых). Гораздо меньше связей у бассейнов с островным распространением ММП, однако все они значимые ($\text{corr} > 0.7$) – минимальная крутизна ($\text{corr} = 0.97$), средняя общая кривизна ($\text{corr} = 0.92$), минимальная относительная высота над урезом ($\text{corr} = 0.94$).

Наконец, у рек, объединенных в группировки по гидрографическому признаку и широтному положению, статистические связи между мутностью и факторами формирования стока наносов почти не прослеживаются. Мутность воды в бассейне Вилюя значимо связана со средним произведением эродируемости почв на эрозионный потенциал осадков ($\text{corr} = 0.77$), плотностью линий тока ($\text{corr} = 0.79$), максимальной крутизной ($\text{corr} = 0.75$), минимальным значением условия поступления солнечной радиации ($\text{corr} = 0.76$), минимальными общей ($\text{corr} = 0.78$) и профильной ($\text{corr} = 0.86$) кривизной. В бассейне Алдана играют роль средний фактор рельефа ($\text{corr} = 0.72$) и температура воздуха ($\text{corr} = 0.71$). Для района верхней Лены достоверные корреляции отмечены с максимальным фактором рельефа ($\text{corr} = 0.67$) и его произведением на фактор эродируемости почв ($\text{corr} = 0.67$), а также с долей нарушенных русел ($\text{corr} = 0.58$). Мутность воды в регионах средней и нижней Лены коррелирует только с плотностью линий тока ($\text{corr} = 0.86$). Для широт $50\text{--}55^\circ$ с.ш. значимые связи выявлены для среднего произведения эрозионного потенциала осадков и фактора рельефа ($\text{corr} = 0.77$) и для доли нарушенных русел ($\text{corr} = 0.82$). Для широт $55\text{--}60^\circ$ с.ш. мутность воды коррелирует с долей нарушенных русел ($\text{corr} = 0.5$). Для широт $60\text{--}65^\circ$ с.ш. характерны связи мутности воды с морфометрическими характеристиками рельефа – плотностью линий тока ($\text{corr} = 0.63$), минимальным значением солнечной радиации ($\text{corr} = 0.62$), максимальной профильной крутизной ($\text{corr} = 0.62$) и минимальной относительной высотой над урезом ($\text{corr} = 0.62$).

Для каждого территориального разделения строились регрессионные модели мутности со всеми возможными сочетаниями факторов, достоверно ($\text{corr} > 0.5$) коррелирующих с мутностью воды. Из полученных серий региональных статистических уравнений для разных территорий и типов рек бассейна Лены были отобраны уравнения с наибольшим коэффициентом корреляции мутности воды.

Для территориальных делений и периодов обобщения (современный 1978–2020 гг. и весь период), в которых хотя бы для одного региона не наблюдалось достоверных корреляций, регрессионные модели не строились. Наличие тех или иных факторов

в итоговых уравнениях позволяет судить о процессах, определяющих формирование стока наносов в разных природных условиях или на реках разного размера. Ниже приведены соответствующие модели для обоих периодов для малых, средних и крупных рек (табл. 3), для всего периода наблюдений для различных высотных зон и зон распространения многолетнемерзлых пород (табл. 4) и для современного периода для бассейнов крупных притоков и различных широтных зон (табл. 5).

Полученные уравнения, построенные для рек разного размера (табл. 3), применены для расчета *SSC*₆₉₇ водосборов малых ($n = 209$) и средних ($n = 488$) рек. Выбор именно этих зависимостей для расчета мутности воды на весь бассейн связан с их максимальной достоверностью среди всех полученных моделей. Воспроизведено пространственное распределение мутности воды в пределах бассейна Лены за два периода времени (рис. 3).

Полученная карта отражает существование двух районов повышенной мутности в бассейне Лены. Области эрозии с 2–3-кратным усилением денудации приурочены к горным районам, располагающимся по периферии водосбора, в первую очередь в его восточной и южной частях. Средняя мутность воды в бассейне достигает максимальных значений >50 г/м³ на притоках Витима (Муя, Таксима, Бамбуйка, Мама), где распространены разработки полезных ископаемых, на притоках Олекмы–Чара и Дырын–Юрях, в бассейне Алдана в его восточной и южной частях. Область минимальных значений мутности воды характерна для большинства рек бассейна Вилюя, центральной части бассейна Алдана, бассейнов верхних звеньев речной сети в верховьях Лены, Витима и Олекмы, а также левобережных водосборов на средней и нижней Лене.

Сопоставление двух карт позволяет выявить основные тенденции изменения мутности воды на разных участках бассейна Лены. В целом, средние значения мутности воды современного периода (после 1978 г.) ниже, чем за весь период инструментальных наблюдений (табл. 6): 12 бассейнов при рассмотрении всего периода находились в категории 11–20 мг/л, а при рассмотрении современного периода – в категории 0–10 мг/л, 12 бассейнов – в категориях 21–30 мг/л в 11–20 мг/л соответственно, 1 бассейн – в категориях 31–40 мг/л и 21–30 мг/л. Как правило, это верхние звенья речной сети на верхней Лене и Алдане, а также бассейны Вилюя, что объясняется влиянием водохранилища. Увеличение мутности воды характерно для зон с повышенной мутностью – в частности, в пределах бассейнов Чара–Токко и Аллах–Юнь–Аллах, что связано с увеличением добычи полезных

Таблица 3. Регрессионные модели мутности для рассматриваемых периодов для малых, средних и больших бассейнов

Table 3. Sediment concentration regression models ranged by small, medium and large basins

Период	$SSC, \text{ г/м}^3$	R	p
Малые бассейны			
Весь период	$SSC = 160428 \times \text{минимальная крутизна} - 6886670 \times \text{средняя общая кривизна} + 21231 \times \text{максимальная профильная кривизна} - 26$	0.98	0.0130
1978–2020 гг.	$SSC = 169085 \times \text{минимальная крутизна} - 7259148 \times \text{средняя общая кривизна} + 22376 \times \text{максимальная профильная кривизна} - 27$	0.98	0.0140
Средние бассейны			
Весь период	$SSC = 2.83 \times \text{доля нарушенных русел} + 17.03$	0.54	0.0016
1978–2020 гг.	$SSC = 3.02 \times \text{доля нарушенных русел} + 16.37$	0.57	0.0008
Большие бассейны			
Весь период	$SSC = 135.67 \times \text{максимальная крутизна} + 1025.08 \times \text{максимальная общая кривизна} - 8902.39 \times \text{максимальная профильная кривизна} - 60.37$	0.93	0.00004
1978–2020 гг.	$SSC = 148.51 \times \text{максимальная крутизна} + 1040.65 \times \text{максимальная общая кривизна} - 9683.59 \times \text{максимальная профильная кривизна} - 68.49$	0.91	0.0002

Таблица 4. Регрессионные модели мутности для всего периода наблюдений по высотным зонам и распространению многолетнемерзлых пород

Table 4. Sediment concentration regression models for the whole observational period ranged by cover altitude zones and permafrost distribution

Пространственное деление	$SSC, \text{ г/м}^3$	R	p
По высотным отметкам	Бассейны возвышенностей		
	$SSC = 0.019 \times \text{максимальный фактор эрозионного потенциала осадков} + 10.88$	0.51	0.0268
	Низкогорные бассейны		
	$SSC = 3.10 \times \text{доля нарушенных русел} + 18.47$	0.77	0.0002
	Среднегорные бассейны		
	$SSC = 0.138 \times \text{максимальная высота} - 11.24$	0.54	0.0324
По распространению ММП	Сплошная мерзлота		
	$SSC = 332.22 \times \text{плотность линий тока} + 13.42$	0.51	0.0137
	Прерывистая мерзлота		
	$SSC = -8.44 \times \text{температура почвы в слое 0–7 см} + 3.12 \times \text{доля нарушенных русел} + 37.21$	0.82	0.0001
	Островная мерзлота		
	$SSC = -4899715 \times \text{средняя общая кривизна} + 27.12$	0.93	0.0023

Таблица 5. Регрессионные модели мутности для периода 1978–2020 гг. наблюдения по бассейнам крупных притоков и широтным зонам

Table 5. Regression models of sediment concentrations for 1978–2020 period ranged by major tributaries and latitudinal zones

Пространственное деление	$SSC, \text{ г/м}^3$	R	p
Крупные притоки	Вилуй		
	$SSC = 190.89 \times \text{плотность линий тока} + 5.44$	0.66	0.0372
	Алдан		
	$SSC = 3.90 \times \text{средний фактор рельефа} + 4.48$	0.72	0.0459
	Верхняя Лена		
	$SSC = 0.19 \times \text{максимальный фактор рельефа} + 1.17 \times \text{доля нарушенных русел} + 10.55$	0.79	0.00003
	Средняя и нижняя Лена		
	$SSC = 476.30 \times \text{плотность линий тока} + 20.98$	0.86	0.0286
Широтные зоны	50–55° с.ш.		
	$SSC = 1.13 \times \text{доля нарушенных русел} + 15.53$	0.52	0.0134
	55–60° с.ш.		
	$SSC = 2.63 \times \text{доля нарушенных русел} + 18.53$	0.51	0.0044
	60–65° с.ш.		
	$SSC = 365.37 \times \text{плотность линий тока} + 2559.02 \times \text{минимальная профильная кривизна} - 0.85$	0.82	0.0035

ископаемых в последние десятилетия (Shkolnyi, Magritsky, Chalov, 2024).

4. ОБСУЖДЕНИЕ

Полученные карта и сводка региональных зависимостей на максимально детальном уровне реализуют инструменты математической статистики, активно развиваемые в настоящее время с использованием геоинформационных баз данных для анализа стока наносов (Cohen et al., 2013). Учитывая ограничения физических моделей, в первую очередь за счет сложности описания процессов формирования стока наносов (Vercruysse, Grabowski, Rickson, 2017), такой инструмент является актуальным и перспективным, особенно для условий относительно слабо изученного в гидрометрическом отношении и такого сложного бассейна, как р. Лена. В то же время наше исследование имеет ряд допущений, связанных с рядом осреднений исследуемых факторов (по растру тематической карты и для водосбора поста), слабой развитостью сетевых наблюдений и их неравномерностью. Так,

гидрологические посты распределены в бассейне Лены крайне неравномерно: в верхнем бассейне их в 5 раз больше, чем в среднем и нижнем бассейнах. Следует учитывать неопределенности сетевых измерений мутности воды (Chalov et al., 2019), что определяет отклонения оцениваемой величины SSC от фактического среднегодового показателя.

Краковременные пики мутности воды, вызванные дождевыми паводками или сбросами дренажных вод с территорий добычи россыпей, могут теряться при декадном формате данных, что влияет даже на годовые значения стока наносов (Shkolnyi, Magritsky, Chalov, 2024). Наш анализ проводился для двух временных рядов: за весь период наблюдений и в интервале с 1978 по 2020 гг. Динамические факторы усреднялись по этим периодам. Наконец, точность определения некоторых использованных в построении модели факторов также может влиять на результат. Например, фактор землепользования C , включенный в универсальное уравнение эрозии почв (группа факторов I), принимает в бассейне Лены значения от 0 до 0.15, соответствуя ≈ 20 типам

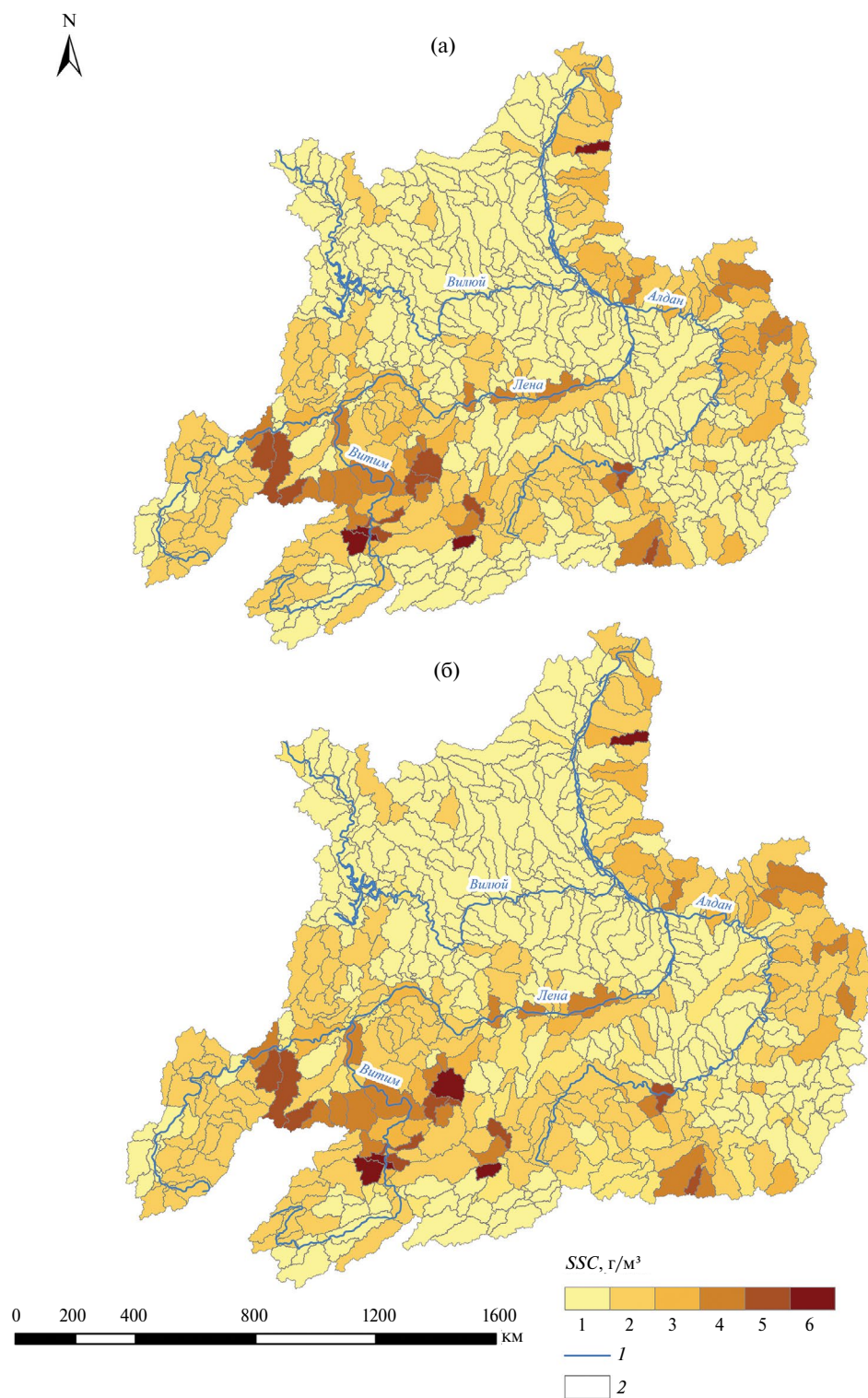


Рис. 3. Карта мутности малых и средних рек бассейна р. Лены: (а) – за весь период наблюдений; (б) – с 1978 по 2020 гг. *1* – основные реки, *2* – границы малых и средних водосборов.

Диапазоны значений SSC , $г/м^3$: 1 – менее 10, 2 – 11–20, 3 – 21–30, 4 – 31–40, 5 – 41–50, 6 – 51–60 (картографическая основа в соответствии с делением водосборов в модели ECOMAG, Мотовилов, 2017).

Fig. 3. Sediment concentration map of small and medium-sized rivers of the Lena River basin: (a) – for the entire observation period; (b) – 1978–2020. *1* – main rivers, *2* – Boundary of small and middle-size catchment.

Ranges of SSC $г/м^3$ values: 1 – less than 10, 2 – 11–20, 3 – 21–30, 4 – 31–40, 5 – 41–50, 6 – 51–60 (map according to catchment delineation in Ecomag model, Motovilow, 2017).

Таблица 6. Значения мутности воды по малым и средним водосборам бассейна Лены за инструментальный период наблюдений и 1978–2020 гг.

Table 6. Comparison of values of SSC in small and medium-sized catchments of the Lena basin for instrumental measurements period and 1978–2020

Диапазон мутности, г/м ³	Количество водосборов, шт. (%)	
	за весь период	за 1978–2020 гг.
0–10	421 (61)	433 (63)
10–20	178 (26)	178 (26)
20–30	50 (7)	39 (5)
30–40	23 (3)	22 (3)
40–50	11 (2)	10 (1)
50–60	4 (1)	5 (1)

подстилающей поверхности, однако, для многих из них достоверных параметрических оценок нет. Оценка морфометрических характеристик водосборов существенно зависит от разрешения ЦМР (Tavares da Costa, Mazzoli, Bagli, 2019).

В то же время полученные карты мутности воды дают основу выявления региональных особенностей интенсивности денудации в бассейне, а при их совмещении с данными о стоке воды – для оценок баланса наносов и определения соотношения бассейновой и русловой составляющих в бассейне Лены (Цыпленков и др., 2022), стока взвешенных наносов неизученных участков рек. Средневзвешенная мутность воды бассейна Лены за период

1978–2020 гг. составляет по карте (рис. 3) 9.8 г/м³, в бассейне Алдана – 10.3, в бассейне Вилюя – 2.9 г/м³. Наибольшая средневзвешенная мутность воды приурочена к рекам Чая на верхней Лене, рр. Витим и Алгама в верховьях Алдана. Большие значения средней мутности воды по краевым частям водосбора отражают рост доли аккумулирующих эрозионно-русловых систем с отрицательным балансом наносов по направлению от верхних к нижним звеньям речной сети (Сидорчук, 2015). Одновременно такая структура распределения мутности в бассейне подтверждает ранее полученные выводы о задержке значительной доли (до 97%) всего переносимого материала и его перехвате в разных звеньях эрозионно-русловой сети (Чалов и др., 2021; Chalov, Prokoreva, 2022).

Полученные модели формирования мутности воды существенно отличаются от результатов, полученных в середине XX в. в СССР (Лисицына, 1966; Сток наносов..., 1977), что связано как с методическими причинами, так и с многолетними изменениями стока наносов. За счет возможностей применения геоинформационных баз данных набор анализируемых предикторов существенно увеличен по сравнению с предшествующими работами. Так, К. Н. Лисицына определила эрозионный коэффициент *A* по связи модуля стока наносов и 8 факторов – модуля стока воды, продольного уклона русла, средней взвешенной высоты водосбора (в горных районах), густоты речной сети, площади водосбора, залесенности, озерности, заболоченности и распаханности (Лисицына, 1966). Значительное уточнение этих факторов (в нашей работе пространственное разрешение оценки указанных факторов на несколько порядков выше, чем

Таблица 7. Сравнение измеренной и рассчитанной мутности для постов в бассейне Лены

Table 7. Comparison of measured and calculated sediment concentrations for hydrological gauges in the Lena basin

Река–пост	Средняя мутность, г/м ³			Ошибка, %	
	измеренная на посту	рассчитанная по (Лисицына, 1966)	рассчитанная в данной работе	рассчитанная по (Лисицына, 1966)	рассчитанная в данной работе
Бол. Тира–Тира	12.2	35.1	17.03	188	40
Багдарин–Багдарин	36.3	182.3	35.6	402	–2
Лена–Табага	32.1	23.44	36.1	–27	12
Лена–Кюсюр	40.3	23.02	36.1	–43	–10
Алдан–Охотский Перевоз	16.9	23.6	18.74	40	11

в работах К. Н. Лисицыной), и включение целого комплекса других параметров (как было сказано выше, всего 69 факторов) позволило значительно детализировать и оценку. Для малых водосборов определяющую роль играют крутизна и кривизна рельефа, определяющие склоновые процессы на водосборе. Силы потока верхних звеньев эрозионно-руслевой сети не хватает для преобладания русловой составляющей стока наносов над бассейновой. Для средних водосборов антропогенный фактор определяет отклонение мутности воды от среднего значения по статистической выборке. Максимальная нарушенность русел присуща именно средним рекам (Shikhov et al., 2023).

Сопоставление оценок стока наносов, полученных по моделям, предложенным в данной работе, с уравнениями К. Н. Лисицыной и с данными измерений на гидрологических постах, демонстрирует отличия воспроизводимости предложенной нами расчетной схемы (табл. 7). Почти для всех водосборов относительная ошибка рассчитанной средней мутности воды по методике К. Н. Лисицыной больше, чем в нашей оценке. Скорее всего, это связано с построением зависимостей на коротких рядах наблюдений, неучетом антропогенной деятельности на водосборе, сильным влиянием площади водосбора в предложенных К. Н. Лисицыной зависимостях.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе получены современные эмпирические модели средней мутности воды бассейна Лены, представляющие собой расчетные средства для ее определения на неизученных водосборах. Выявлены определяющая роль рельефа в формировании мутности для малых и больших бассейнов и значимая роль антропогенного фактора для средних по размеру бассейнов. Неоднородность условий формирования стока наносов в пределах крупного бассейна Лены определяет отличия регрессионных зависимостей для разных территорий внутри бассейна.

Детальные карты мутности, генерализованные для почти 700 элементарных водосборов, частично отражают распределение зон интенсивной денудации и их приуроченность к горным районам, располагающимся по периферии водосбора преимущественно в восточной (хребет Сунтар-Хаята и Сетте-Дабан), южной (Алданское нагорье) и юго-западной (Северо-Байкальское нагорье) частях. Средневзвешенная мутность воды бассейна Лены для периода 1978–2020 гг. оценивается величиной 9.8 г/м^3 . Она достигает максимальных значений $>50 \text{ г/м}^3$ на притоках Витима (Муя, Таксима, Бамбуйка, Мама).

Анализ полученных карт мутности в двух временных разрезах (за весь период инструментальных наблюдений и для периода 1978–2020 гг.) показывает преобладающие в бассейне тенденции на уменьшение средней мутности, проявляющиеся в увеличении числа элементарных водосборов с малыми значениями мутности. Эта оценка не учитывает активного влияния развивающейся горнорудной деятельности на водосборах Витима, Олекмы и Алдана, установить которую можно лишь частично в связи с малой дискретностью сетевых измерений и их неравномерностью.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Алексеевский Н.И. (1998) Формирование и движение речных наносов. М.: Изд-во МГУ. 202 с.
- Алексеевский Н.И., Чалов Р.С. (1997) Движение наносов и русловые процессы. М.: Изд-во МГУ. 170 с.
- Бобровицкая Н.Н. (2008) Водноэрозионные процессы на склонах и сток наносов рек в современных условиях. В сб.: *Труды VI Всероссийского гидрологического съезда*. М.: Метеоагентство Росгидромета. С. 228–233.
- Государственный водный кадастр: Ежегодные данные о режиме и ресурсах поверхностных вод суши. 1980 г. Часть 1. Реки и каналы. Том 8. Выпуск 0–7. Бассейны морей Лаптевых, Восточно-Сибирского до р. Колымы (1983) Под ред. Р.Г. Гаева. Л.: Гидрометеиздат. 525 с.
- Гусаров А.В. (2017) Определение минимальной продолжительности ряда наблюдений за стоком взвешенных наносов с целью корректной оценки пространственно-временной изменчивости интенсивности эрозии в их бассейнах. *Геоморфология*. № 1. С. 19–29. <https://doi.org/10.15356/0435-4281-2017-1-19-29>
- Лисицына К.Н. (1966) Опыт составления карты эрозионных районов. Труды ГГИ. Вып. 132. С. 165–171.
- Магрицкий Д.В. (2015) Факторы и закономерности многолетних изменений стока воды, взвешенных наносов и теплоты Нижней Лены и Вилюя. *Вестник Московского университета. Серия 5. География*. № 6. С. 85–95.
- Магрицкий Д.В. (2023) Недропользование в бассейне р. Алдан и его влияние на сток наносов рек. В сб.: *Материалы II Международной научно-практической конференции “Куражковские чтения”*. Астрахань: Астраханский госуниверситет. С. 635–639.
- Мальцев К.А., Чалов С.Р., Иванов М.А. и др. (2025) Динамика эрозии и поступления наносов в реки на слабо освоенных равнинных водосборах Центральной Сибири в связи с изменениями землепользования и лесными пожарами. *Геоморфология и палеогеография*. Т. 56. № 2. С. 231–250. <https://doi.org/10.31857/S2949178925020043>
- Можерин В.И., Можерин В.В. (2011) Мировой сток взвешенных наносов: его геоморфологическая

- и геоэкологическая интерпретация. *Геоморфология*. № 1. С. 13–24.
<https://doi.org/10.15356/0435-4281-2011-1-13-24>
- Наставления гидрометеорологическим станциям и постам (1958) Вып. 6. Часть III. Составление и подготовка к печати гидрологического ежегодника. 290 с.
- Орлов А.А., Орлов А.И. (2024) Коэффициенты корреляции: шкала Чеддока и значимость. *Контроллинг*. № 4 (94). С. 28–37.
- РД 52.08.104–2002. Руководящий документ. Методические указания. Мутность воды. Методика выполнения измерений (утв. Росгидрометом 28.12.2001). [Электронный ресурс]. URL: <https://docload.ru/docload.spb.ru/Basesdoc/48/48865/index.htm> (дата обращения: 05.06.2025).
- Ресурсы поверхностных вод СССР: Основные гидрологические характеристики (1967) Том 17. Лено-Индигирский район. Под ред. А.В. Шестакова. Л.: Гидрометеиздат. 447 с.
- Сидорчук А.Ю. (2015) Баланс наносов в эрозионно-руслых системах. *Геоморфология*. № 1. С. 14–21.
<https://doi.org/10.15356/0435-4281-2015-1-14-21>
- Сток наносов, его изучение и географическое распределение (1977) Под ред. А.В. Караушева. Л.: Гидрометеиздат. 240 с.
- Тананаев Н.И. (2007) Сток наносов и русловые процессы на реках криолитозоны. Автореф. дис. ... канд. геогр. наук. М.: МГУ. 26 с.
- Третий оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. Общее резюме (2022) СПб: Научно-технологии. 124 с.
- Цыпленков А.С., Чалов С.Р., Шинкарева Г.Л. (2022) Водная эрозия почв в бассейнах крупнейших рек Сибири. *Известия Русского географического общества*. Т. 154. № 5–6. С. 86–111.
<https://doi.org/10.31857/S0869607122050093>
- Чалов С.Р., Голосов В.Н., Сидорчук А.Ю. (2017) Эрозионно-русловые системы. М.: ИНФРА-М. 702 с.
- Чалов С.Р. (2024) Речные наносы: учебник. М.: Изд-во ИНФРА-М. 472 с.
- Чалов С.Р., Тарасов М.К., Чалова А.С. (2021) Закономерности сезонных изменений стока наносов в пределах разветвленного русла реки Лены. *География и природные ресурсы*. Т. 42. № 4. С. 95–104.
<https://doi.org/10.15372/GIPR20210410>
- Чалов С.Р., Терский П.Н., Ефимова Л.Е. и др. (2019) Проблемы гидрологического мониторинга в бассейнах трансграничных рек Восточной Европы (на примере Западной Двины). *Инженерные изыскания*. Т. 13. № 1. С. 32–44.
<https://doi.org/10.25296/1997-8650-2019-13-1-32-44>
- Чалов С.Р., Завадский А.С., Ботавин Д.В. и др. (2019) Покровско-Якутский водный узел на р. Лене: современные деформации и управление русловыми процессами. *Известия Российской академии наук. Серия географическая*. № 6. С. 83–96.
<https://doi.org/10.31857/S2587-55662019683-96>
- Шынбергенов Е.А., Ермолаев О.П. (2017) Потенциальная эрозия почв бассейна р. Лена. *Вестник Удмуртского университета*. Т. 27. № 4. С. 513–528.
- Borelli P., Robinson D.A., Fleischer L.R. et al. (2017) An assessment of the global impact of 21st century land use change on soil erosion. *Nat. Commun.* No. 8. Article number: 2013(2017).
<https://doi.org/10.1038/s41467017-02142-7>
- Brown J., Ferrians O., Heginbottom J.A. et al. (2002) Circum-Arctic Map of Permafrost and Ground-Ice Conditions, Version 2. National Snow and Ice Data Center.
<https://doi.org/10.7265/skbkg-kf16>
- Chalov S., Ivanov V. (2023) Catchment and in-channel sources in three large Eurasian Arctic rivers: Combining monitoring, remote sensing and modelling data to construct Ob, Yenisey and Lena rivers sediment budget. *Catena*. Vol. 230. 107212.
<https://doi.org/10.1016/j.catena.2023.107212>
- Chalov S., Prokopeva K. (2022) Sedimentation and Erosion Patterns of the Lena River Anabranching Channel. *Water*. Vol. 14. Iss. 23. 3845.
<https://doi.org/10.3390/w14233845>
- Chalov S., Prokopeva K., Magritsky D. et al. (2023) Climate change impacts on streamflow, sediment load and carbon fluxes in the Lena River delta. *Ecol. Indic.* Vol. 157. 111252.
<https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2023.111252>
- Chalov S.R., Terskii P.N., Efimova L.E. et al. (2019) Problems of hydrological monitoring in transboundary rivers of Eastern Europe (on the example of the Western Dvina). *Engineering survey*. Vol. 13. No. 1.
<https://doi.org/10.25296/1997-8650-2019-13-1-32-44>
- Cohen S., Kettner A.J., Syvitski J.P.M. et al. (2013) WBM-sed, a distributed global-scale riverine sediment flux model: Model description and validation. *Comput. Geosci.* Vol. 53. P. 80–93.
<https://doi.org/10.1016/j.cageo.2011.08.011>
- Danielson, J.J., Gesch, D.B. (2011) Global multi-resolution terrain elevation data 2010 (GMTED2010): U.S. Geological Survey Open-File Report. 26 p.
- Gautier E., Dépret T., Caverio J. et al. (2021) Fifty-year dynamics of the Lena River islands (Russia): Spatio-temporal pattern of large periglacial anabranching river and influence of climate change. *Sci. Total Environ.* Vol. 783. 147020.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.147020>
- GLobCover 2009- Global Land Cover Map [Electronic data]. URL: https://due.esrin.esa.int/page_globcover.php (access date: 09.06.2025).
- Krylenko I.N., Pavlyukevich E.D., Zavadskii A.S. et al. (2024) Modelling of potential impact of climate change on water regime and channel processes in the river Lena near city Yakutsk: possibilities and limitations. *Geography, Environment, Sustainability*. Vol. 17. No. 4. P. 112–120.
<https://doi.org/10.24057/2071-9388-2024-3723>
- Maltsev K., Ivanov M. (2022). Comparative Study on Sediment Delivery from Two Small Catchments within the Lena River, Siberia. *Water*. Vol. 14. Iss. 19. 3055.
<https://doi.org/10.3390/w14193055>

- Panagos P., Borrelli P., Meusburger K. et al. (2015) Estimating the soil erosion cover-management factor at the European scale. *Land use policy*. No. 48. P. 38–50. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2015.05.021>
- Shikhov A., Ilyushina P., Makarieva O. et al. (2023) Satellite-based mapping of gold-mining-related land-cover changes in the Magadan region, northeast Russia. *Remote Sens.* Vol. 15. Iss. 14. P. 3564–3564. <https://doi.org/10.3390/rs15143564>
- Shkolniy D., Magritsky D., Chalov S. (2024) Impact of open-cast placer mining on sediment transport across Far Eastern rivers of Russia. *Int. J. Sediment Res.* Vol. 39. Iss. 5. P. 702–713. <https://doi.org/10.1016/j.ijsrc.2024.03.001>
- Tavares da Costa R., Mazzoli P., Bagli S. (2019) Limitations Posed by Free DEMs in Watershed Studies: The Case of River Tanaro in Italy. *Frontiers in Earth Sci.* Vol. 7. 141. <https://doi.org/10.3389/feart.2019.00141>
- Vercruyse K., Grabowski R.C., Rickson R.J. (2017) Suspended sediment transport dynamics in rivers: Multi-scale drivers of temporal variation. *Earth-Sci. Rev.* Vol. 166. P. 38–52. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2016.12.016>
- Yamazaki D., Ikeshima D., Sosa J. et al. (2019) MERIT Hydro: A High-Resolution Global Hydrography Map Based on Latest Topography Dataset. *Water Resour. Res.* Vol. 55. Iss. 6. P. 5053–5073. <https://doi.org/10.1029/2019WR024873>
- Chalov S., Prokopenko K. (2022) Sedimentation and Erosion Patterns of the Lena River Anabranching Channel. *Water*. Vol. 14. Iss. 23. 3845. <https://doi.org/10.3390/w14233845>
- Chalov S., Prokopenko K., Magritskiy D. et al. (2023) Climate change impacts on streamflow, sediment load and carbon fluxes in the Lena River delta. *Ecol. Indic.* Vol. 157. 111252. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2023.111252>
- Chalov S.R. (2024) *Rechnye nanosy: uchebnik (River sediment: textbook)*. M.: INFRA-M (Publ.). 472 p (in Russ).
- Chalov S.R., Tarasov M.K., Chalova A.S. (2021). The patterns of seasonality of the suspended sediment load along the braided channel of the Lena River. *Geography and Nat. Resources*. Vol. 42. No. 4. P. 353–360. <https://doi.org/10.1134/S1875372821040041>
- Chalov S.R., Terskii P.N., Efimova L.E. et al. (2019) Problems of hydrological monitoring in transboundary rivers of Eastern Europe (on the example of the Western Dvina). *Engineering survey*. Vol. 13. No. 1. P. 32–44 (in Russ). <https://doi.org/10.25296/1997-8650-2019-13-1-32-44>
- Chalov R.S., Golosov V.N., Sidorchuk A. Yu. (2017) *Eroзионно-ruslovye sistemy (Erosion and channel systems)*. Moscow: INFRA-M (Publ.). 702 p (in Russ).
- Chalov R.S., Zavadskii A.S., Botavin D.V. et al. (2019) Pokrovsko-Yakutsky Reach of the Lena River: transformation of complex conjugated channel, recent deformations and management of channel changes. *Izvestiya Rossiiskoi akademii nauk. Seriya geograficheskaya*. No. 6. P. 83–96 (in Russ). <https://doi.org/10.31857/S2587-55662019683-96>
- Cohen S., Kettner A.J., Syvitski J.P.M. et al. (2013) WBM-sed, a distributed global-scale riverine sediment flux model: Model description and validation. *Comput. Geosci.* Vol. 53. P. 80–93. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2011.08.011>
- Danielson J.J., Gesch D.B. (2011) Global multi-resolution terrain elevation data 2010 (GMTED2010): U.S. Geological Survey Open-File Report. 26 p.
- Gaeva R.G. (Eds.) (1983) *Gosudarstvennyi vodnyi kadastr: Ezhegodnye dannye o rezhime i resursakh poverkhnostnykh vod sushi 1980. Chast' 1. Reki i kanaly. Tom 8. Vyp. 0–7. Basseiny morei Laptevykh, Vostochno-Sibirskogo do r. Kolymy (State Water Cadastre: Annual data on the regime and resources of terrestrial surface waters 1980 g. Part 1. Rivers and canals. Vol. 8. Iss. 0–7. The basins of the Laptev and East Siberian Seas up to the Kolyma River)*. Leningrad: Gidrometeoizdat (Publ.). 525 p (in Russ).
- Gautier E., Dépret T., Caverio J. et al. (2021) Fifty-year dynamics of the Lena River islands (Russia): Spatio-temporal pattern of large periglacial anabranching river and influence of climate change. *Sci. Total Environ.* Vol. 783. 147020. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.147020>
- GLobCover 2009- Global Land Cover Map [Electronic data]. URL: https://due.esrin.esa.int/page_globcover.php (access date: 09.06.2025)

REFERENCES

- Alekseevskii N.I. (1998) *Formirovanie i dvizhenie rechnykh nanosov (Formation and movement of river sediment)*. Moscow: MGU (Publ.). 202 p (in Russ).
- Alekseevskii N.I., Chalov R.S. (1997) *Dvizhenie nanosov i usloviya protsessy (Sediment movement and channel processes)*. Moscow: MGU (Publ.). 170 p (in Russ).
- Bobrovitskaya N.N. (2008) Water erosion processes on slopes and river sediment runoff in modern conditions. In: *Trudy VI Vserossiiskogo gidrologicheskogo s'ezda*. Moscow: Meteoenstvo Rosgidrometa (Publ.). P. 228–233 (in Russ).
- Borelli P., Robinson D.A., Fleischer L.R. et al. (2017) An assessment of the global impact of 21st century land use change on soil erosion. *Nat. Commun.* No. 8. Article number: 2013(2017). <https://doi.org/10.1038/s41467017-02142-7>
- Brown J., Ferrians O., Heginbottom J.A. et al. (2002) *Circum-Arctic Map of Permafrost and Ground-Ice Conditions, Version 2*. National Snow and Ice Data Center. <https://doi.org/10.7265/skbg-kf16>
- Chalov S., Ivanov V. (2023) Catchment and in-channel sources in three large Eurasian Arctic rivers: Combining monitoring, remote sensing and modelling data to construct Ob, Yenisey and Lena rivers sediment budget. *Catena*. Vol. 230. 107212. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2023.107212>

- Gusarov A.V. (2017) Minimum length of suspended sediment yield time-series for a proper estimation of spatio-temporal variability of erosion rates in river basins. *Geomorfologiya*. No. 1. P. 19–29 (in Russ). <https://doi.org/10.15356/0435-4281-2017-1-19-29>
- Karashev A.V. (Eds.) (1977) Stok nanosov, ego izucheniye i geograficheskoe raspredeleniye (Sediment load runoff, its study and geographical distribution). Leningrad: Gidrometeoizdat (Publ.). 240 p (in Russ).
- Krylenko I.N., Pavlyukevich E.D., Zavadskii A.S. et al. (2024) Modelling of potential impact of climate change on water regime and channel processes in the river Lena near city Yakutsk: possibilities and limitations. *Geography, Environment, Sustainability*. Vol. 17. No. 4. P. 112–120. <https://doi.org/10.24057/2071-9388-2024-3723>
- Lisitsyna K.N. (1966) Experience in mapping erosion areas. *Trudy GGI*. Iss. 132. P. 166–171 (in Russ).
- Magritskiy D.V. (2015) Factors and trends of the long-term fluctuations of water, sediment and heat runoff in the lower reaches of the Lena River and the Vilyui River. *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 5. Geografiya*. No. 6. P. 85–95 (in Russ).
- Magritskiy D.V. (2023). Mining in the basin of the Aldan River and its influence on river sediment runoff. In: *Materialy II Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii "Kurazhkovskie chteniya"*. Astrahan': Atrahanskii gosudarstvennyi universitet (Publ.). P. 635–639 (in Russ).
- Maltsev K., Ivanov M. (2022). Comparative Study on Sediment Delivery from Two Small Catchments within the Lena River, Siberia. *Water*. Vol. 14. Iss. 19. 3055. <https://doi.org/10.3390/w14193055>
- Maltsev K.A., Chalov S.R., Ivanov M.A. et al. (2025) Dynamics of erosion and sediment supply in near-pristine lowland catchments of Central Siberia due to land use changes and forest fires. *Geomorfologiya i Paleogeografiya*. Vol. 56. No. 2. P. 231–250 (in Russ). <https://doi.org/10.31857/S2949178925020043>
- Mozzherin V.I., Mozhherin V.V. (2011) Global suspended sediment yield: its geomorphological and geocological interpretation. *Geomorfologiya*. No. 1. P. 13–24 (in Russ). <https://doi.org/10.15356/0435-4281-2011-1-13-24>
- Nastavleniya gidrometeorologicheskimi stantsiyami i postami (1958) Vyp. 6. Chast' III. Sostavleniye i podgotovka k pechati gidrologicheskogo ezhegodnika. Leningrad. 290 p (in Russ).
- Orlov A.A., Orlov A.I. (2024). Correlation coefficients: the Cheddock scale and significance. *Kontrolling*. No. 4 (94). P. 28–37 (in Russ).
- Panagos P., Borrelli P., Meusburger K. et al. (2015) Estimating the soil erosion cover-management factor at the European scale. *Land use policy*. No. 48. P. 38–50. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2015.05.021>
- RD52.08.104–2002. Rukovodiyashchii dokument. Metodicheskie ukazaniya. Mutnost' vody. Metodika vypolneniya izmerenii (utv. Rosgidrometom 28.12.2001) [Electronic data]. Access way: <https://docload.ru/docload.spb.ru/Basesdoc/48/48865/index.htm> (access date: 05.06.2025)
- Shestakov A.V. (Eds.) (1967) Resursy poverkhnostnykh vod SSSR: Osnovnye gidrologicheskie kharakteristiki. Tom 17. Leno-Indigirskii raion (Surface Water Resources of the USSR: Main Hydrological Characteristics. Vol. 17. Lena-Indigirsky District). Leningrad: Gidrometeoizdat (Publ.). 447 p (in Russ).
- Shikhov A., Ilyushina P., Makarieva O. et al. (2023) Satellite-based mapping of gold-mining-related land-cover changes in the Magadan region, northeast Russia. *Remote Sens*. Vol. 15. Iss. 14. P. 3564–3564. <https://doi.org/10.3390/rs15143564>
- Shkolnyi D., Magritskiy D., Chalov S. (2024) Impact of open-cast placer mining on sediment transport across Far Eastern rivers of Russia. *Int. J. Sediment Res*. Vol. 39. Iss. 5. P. 702–713. <https://doi.org/10.1016/j.ijsrc.2024.03.001>
- Shynbergenov E.A., Ermolaev O.P. (2017) Potential soil erosion of the Lena River Basin. *Vestnik Udmurtskogo universiteta*. Vol. 27. No. 4. P. 513–528 (in Russ).
- Sidorchuk A.Yu. (2015) Sediment balance in the erosion-deposition systems. *Geomorfologiya*. No. 1. P. 14–21 (in Russ). <https://doi.org/10.15356/0435-4281-2015-1-14-21>
- Tananaev N.I. (2007) Stok nanosov i usloviye protsessy na rekakh kriolitozony (Sediment runoff and channel processes in cryolithozone rivers). PhD thesis. Moscow: MGU. 26 p (in Russ).
- Tavares da Costa R., Mazzoli P., Bagli S. (2019) Limitations Posed by Free DEMs in Watershed Studies: The Case of River Tanaro in Italy. *Frontiers in Earth Sci*. Vol. 7. 141. <https://doi.org/10.3389/feart.2019.00141>
- Tretii otsenochnyi doklad ob izmeneniyakh klimata i ikh posledstviyakh na territorii Rossiiskoi Federatsii. Obshchee rezume (2022) (Third Assessment Report on Climate Change and its Impacts on the Territory of the Russian Federation. General summary). Sankt-Peterburg: Naukoemkie tekhnologii (Publ.). 124 p (in Russ).
- Tsyplenkov A.S., Chalov S.R., Shinkareva G.L. (2022) Assessment of Basin-Scale Soil Erosion within the Largest Siberian Rivers. *Izvestiya Russkogo geograficheskogo obshchestva*. Vol. 154. No. 5–6. P. 86–111 (in Russ). <https://doi.org/10.31857/S0869607122050093>
- Vercruyssen K., Grabowski R.C., Rickson R.J. (2017) Suspended sediment transport dynamics in rivers: Multi-scale drivers of temporal variation. *Earth-Sci. Rev*. Vol. 166. P. 38–52. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2016.12.016>
- Yamazaki D., Ikeshima D., Sosa J. et al. (2019) MERIT Hydro: A High-Resolution Global Hydrography Map Based on Latest Topography Dataset. *Water Resour. Res*. Vol. 55. Iss. 6. P. 5053–5073. <https://doi.org/10.1029/2019WR024873>