УДК 556; 535.6 *https://doi.org/10.35567/1999-4508-2026-2-63-83*

Оригинальная статья/Original paper

Использование данных сетевых наблюдений для характеристики транспорта взвешенных наносов на примере участка Верхней Лены

Д. И. Школьный ✉, А. С. Цыпленков, Л. А. Турыкин, П. П. Головлев

✉ danila.hydro@yandex.ru

Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, Россия

АННОТАЦИЯ

Актуальность. В статье исследуются особенности транспорта взвешенных наносов на участке Верхней Лены в районе г. Ленска – территории, где прямые гидрологические наблюдения за мутностью потока отсутствуют и данные приходится восстанавливать по удаленным постам-аналогам. **Методы.** Проведен сравнительный анализ стока воды и наносов с учетом геоморфологических, климатических и антропогенных факторов. Построены зависимости расходов наносов от расходов воды и скоростей течения, оценены внутригодовые изменения мутности, крупности и структуры потока. **Результаты.** Выявлено, что россыпная добыча полезных ископаемых в бассейнах Витима, Олекмы и Чары оказывает существенное влияние на мутность и гранулометрический состав наносов, увеличивая объемы стока наносов, долю мелких фракций и пространственную неоднородность в потоке. Анализ показал ограниченную применимость сетевых данных Росгидромета из-за методических погрешностей измерений, нерегулярности отбора проб, недоучета коллоидных и глинистых частиц, а также локальных антропогенных воздействий. Полученные результаты позволяют обоснованно экстраполировать характеристики стока наносов в расчетный створ в районе г. Ленска и рассчитывать исходные данные для проектирования водозаборных и других гидротехнических сооружений.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: река Лена, сток наносов, мутность, гидрологический пост, россыпные разработки, гранулометрический состав, руслообразующие фракции

ФИНАНСИРОВАНИЕ: Исследование выполнено по планам НИР (ГЗ) научно-исследовательской лаборатории эрозии почв и русловых процессов географического факультета МГУ им. М. В. Ломоносова «Эрозионно-русловые системы: гидрологический режим, природно-антропогенные трансформации и прогноз опасных проявлений».

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Школьный Д. И., Цыпленков А. С., Турыкин Л. А., Головлев П. П. Использование данных сетевых наблюдений для характеристики транспорта взвешенных наносов на примере участка Верхней Лены // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2026. № 2. С. 63–83. https://doi.org/10.35567/1999-4508-2026-2-63-83; EDN: IBRBLO

© Школьный Д. И., Цыпленков А. С., Турыкин Л. А., Головлев П. П., 2026

Characteristics of Suspended Sediment Transport of the Upper Lena River using gauging network observations

Danila I. Shkolnyi, Anatoly S. Tsyplenkov, Leonid A. Turykin, Pavel P. Golovlev

danila.hydro@yandex.ru

Lomonosov Moscow State University, Russia

ABSTRACT

Relevance. This article examines the characteristics of suspended sediment transport in a section of the Upper Lena River near Lensk City. As this area has no suspended sediment measurements, data must be reconstructed using analogue stations. **Methods.** A comparative analysis of water and sediment discharge has been carried out, considering geomorphological, climatic, and anthropogenic factors. Relationships between sediment and water discharge, as well as flow velocities, have been identified. Intra-annual changes in suspended sediment concentration, grain size, and flow structure have been assessed. **Results.** It was found that placer mining in the Vitim, Olyokma, and Chara river basins significantly affects sediment concentration and grain size distribution. This influence increases sediment load, the proportion of finer sediments, and the spatial variation within the flow. The analysis showed that data from the Rosgidromet network has limited use because of measurement errors, infrequent sampling, the underestimation of colloidal and clay particles, and local anthropogenic impacts. The results obtained provide a basis for reasonably extending sediment transport characteristics to the calculated cross-section near Lensk City and for estimating initial data for the design of water intake and other hydraulic structures.

KEYWORDS: Lena River, suspended sediment load, suspended sediments, gauging station, placer mining, grain size, channel-forming fractions.

FUNDING: The work was carried out according to the State Task of the Makkaveev Laboratory of Soil Erosion and Fluvial Processes at Moscow State University “Erosion-channel systems: hydrological regime, natural and anthropogenic transformations, and forecast of hazardous processes”.

FOR CITATION: Shkolnyi D. I., Tsyplenkov A. S., Turykin L. A., Golovlev P. P. Characteristics of Suspended Sediment Transport of the Upper Lena River using gauging network observations. *Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management*. 2026. No. 2. P. 63–83. https://doi.org/10.35567/1999-4508-2026-2-63-83; EDN: IBRBLO

ВВЕДЕНИЕ

В статье проанализированы особенности транспорта взвешенных наносов на участке Верхней Лены в районе г. Ленска на основании архивных данных, рассмотрены особенности и ограничения, связанные с наличием

информации по характеристикам наносов. Несмотря на широкий спектр хозяйственных задач, требующих изучения условий переноса наносов (в первую очередь, проектирования и эксплуатации водозаборных сооружений, экологического нормирования допустимых сбросов загрязняющих веществ), и высокий уровень изученности физических особенностей транспорта наносов [1, 2], точность расчетных методик и прогнозирования не позволяет решать многие прикладные задачи в условиях недостаточности данных [3, 4].

В нормативных документах[1] указана необходимость выполнения детальных измерений характеристик мутности в исследуемых створах для выполнения расчетов (например, при проектировании водозаборов – не менее 24 раз в год) или использования данных рек-аналогов. В подавляющем большинстве случаев в качестве аналогов из-за отсутствия других источников информации используются данные наблюдений на постах наблюдательной сети Росгидромета. Наблюдения за мутностью и стоком наносов на гидрологических постах имеют значительные погрешности, и их применимость для расчетов ограничена рядом методических сложностей. В первую очередь, это инструментально-методические ошибки непосредственно измерения характеристик наносов (включая изменения методик и мест отбора проб) [5], ошибки измерений расходов воды (в основном возникающие при затоплении поймы или прохождении ледовых явлений, зачастую совпадающих с пиковыми расходами) и их пересчета, а также ошибки из-за недостаточного количества измерений мутности воды и расходов наносов на посту (особенно в период половодья и дождевых паводков) [4].

Анализ многолетних рядов данных о наносах, полученных на наблюдательной сети [3, 5], показал, что существующие протоколы мониторинга мутности воды содержат источник систематической погрешности. Вдобавок из-за особенностей измерений в определяемую на постах часть мутности не попадают коллоидные, глинистые частицы ($d < 0{,}001$ мм) и частично – пылеватые частицы ($d < 0{,}01$ мм). В зависимости от региона и источников взвешенных наносов такие частицы могут составлять до 10–20 % от общего объема, достигая в отдельных случаях 40 % и более, что может оказывать значительное влияние как на эксплуатацию водозаборных сооружений, так и на условия транспорта загрязняющих веществ с наносами. В связи с этим данные УГМС могут быть использованы только для оценочных определений характеристик стока наносов.

1 РД 52.24.622-2017 «Порядок проведения расчетов условных фоновых концентраций химических веществ в воде водных объектов для установления нормативов допустимых сбросов сточных вод», Пособие к СНиП 2.04.02-84 «Пособие по проектированию сооружений для забора поверхностных вод» и другие.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ И ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

Для расчетов стока наносов к створу г. Ленска (F = 450 тыс. км^2) использовались данные по ближайшим постам-аналогам (рис. 1): 1) г/п Змеиново (F = 140 тыс. км^2) вверх по течению р. Лены; 2) г/п Солянка (F = 770 тыс. км^2) вниз по течению Лены и 3) г/п Бодайбо (F = 186 тыс. км^2) на р. Витим вверх по течению Лены. Посты находятся в условиях, близких к расчетному створу по морфологии долины и уклонам русла, однако удалены от него на расстояние более 400 км по течению (см. рис. 1).

Они значительно отличаются по площади водосборов, что связано с впадением крупных притоков: Лена с Витимом сливаются между вышележащими постами и створом, а Олекма впадает в Лену в 4 км выше г/п Солянка. В качестве референтного поста, характеризующего расходы воды, использован г/п Крестовский, расположенный в 163 км выше по течению от г. Ленска. Разница в площади водосбора с расчетным створом – 2 %.

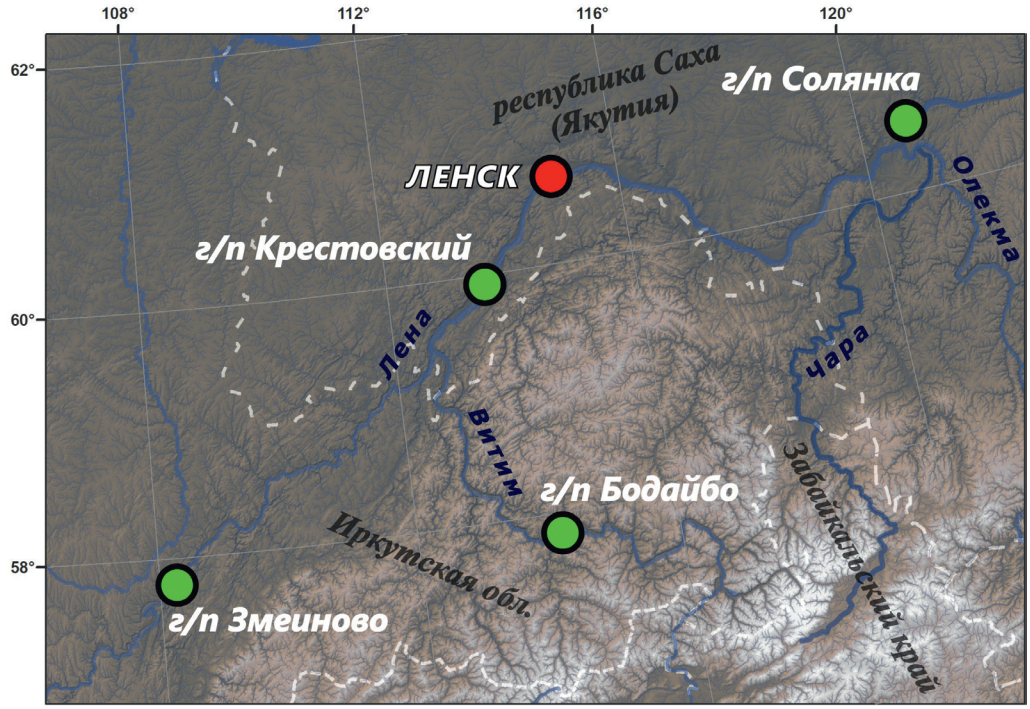


Рис. 1. Расположение сетевых гидрологических постов (зеленые точки) с наличием данных относительно участка исследований (красная точка)

Fig.1. Location of gauges with sediment data within the study area (green dots). The red dot indicates Lensk City

Для анализа и расчета использованы данные по крупности наносов (Круп., мм), а также данные об измеренных расходах наносов (G, кг/с) и воды (Q, м^3/с) за соответствующие даты в створах постов за безледный

период. Подобные данные очень ограниченны и публиковались в гидрологических ежегодниках только до 1980 г. В настоящее время сетевая информация об измеренных характеристиках расходов воды и наносов не публикуется в открытом доступе (за исключением рассчитанных среднедекадных значений мутности и расхода наносов, которые могут использоваться только в качестве справочных), поэтому в рамках настоящего исследования использованы архивные данные.

Для анализа был рассмотрен период с 1958 по 1979 г. как наиболее обеспеченный опубликованными данными о мутности воды и крупности наносов [6]. Однако даже в ежегодниках этого периода имеется большое количество пропусков и неточностей, количество измерений в различные годы очень неравномерно, информация о крупности – отрывочная (см. табл. 1). В зависимости от вида обработки проб нижний предел определения фракций изменялся от 0,05 до 0,001 мм. Статистические характеристики крупности взвеси рассчитаны с помощью программы GradiStat [7]. В качестве информации о распределении скоростей потока по сечению на участке использованы данные измерений доплеровского профилографа Sontek M9. Измерения выполнялись в створе г. Ленска в сентябре 2023 г., а также на участке между устьем Витима и г/п Крестовский в сентябре 2024 г.

Таблица 1. Количество измеренных значений характеристик по постам-аналогам в 1958–1979 гг.

Table 1. A number of gauged charasteristics values for the stations-analogues in 1958–1979

Пост	$Q_{безлед}$	G	Круп.
р. Лена – Змеиново	157	145	29
р. Лена – Солянка	276	212	47
р. Витим – Бодайбо	247	163	7

К требуемым для проектирования водозаборных сооружений характеристикам транспорта наносов относятся как общий объем стока наносов в расчетном створе, так и распределение стока наносов различных фракций при различных диапазонах расходов и скоростей течения. В естественных речных условиях за счет турбулентного характера течения осаждаться будут только взвешенные наносы наиболее крупных фракций, мелкие фракции после поступления в поток будут переноситься практически без потерь на осаждение [8]. Таким образом, при оценках заносимости для расчета осаждения допустимо принимать только руслообразующие фракции взвеси (т. е., $\varnothing > 0{,}05$ мм). При проектировании водозаборов, наоборот, необходимо оценивать и долю мелких фракций от общей мутности, а также распределение мутности по вертикали и ее характеристику в придонном слое.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Общая характеристика водного режима

Для рек бассейна Верхней Лены характерно продолжительное, многопиковое весенне-летнее половодье, начинающееся в конце апреля и связанное с постепенным таянием снега в горных частях водосбора, с наложением большого количества волн дождевых паводков (рис. 2). Для рек исследуемой территории, несмотря на крупные размеры их бассейнов, характерны достаточно резкие изменения уровней и расходов воды как в начале половодья (за счет распространения мерзлоты), так и во время паводков (за счет высоких уклонов и большого количества осадков), с чем могут быть связаны и характерные особенности транспорта наносов. Лена и Витим, имея близкие площади водосборов к точке слияния, значительно отличаются по режиму стока воды. Для Витима характерны более высокие

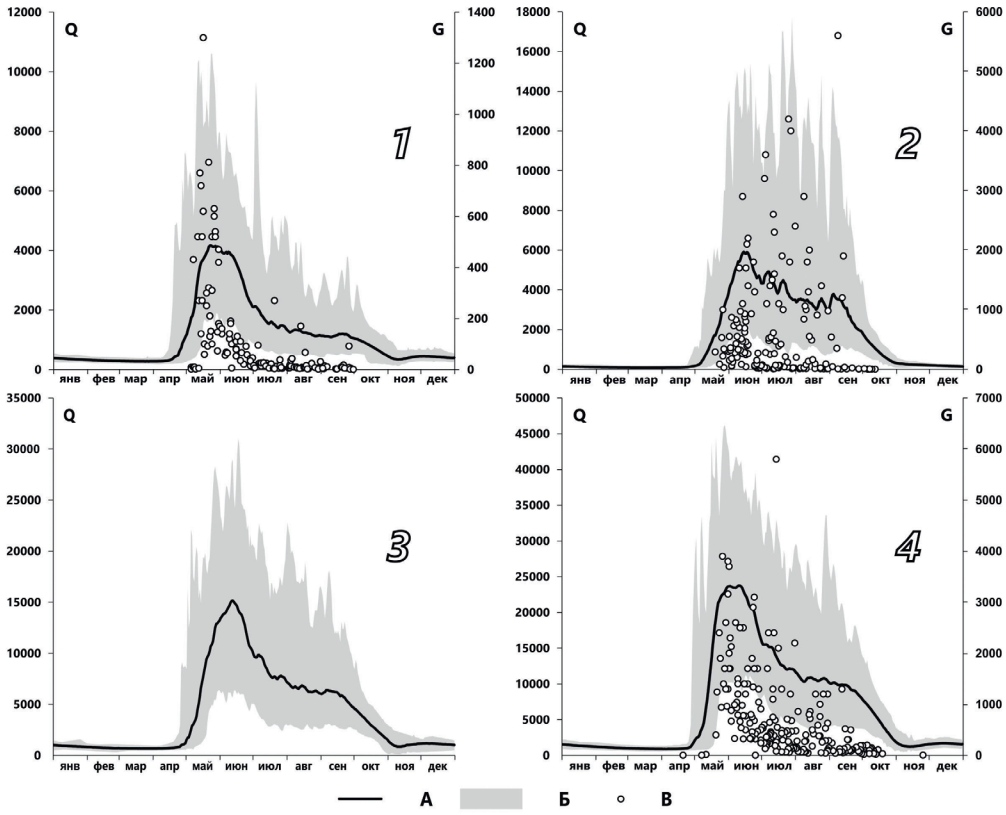


Рис. 2. Средние суточные расходы воды Q, м³/с (А), амплитуда их максимальных и минимальных значений за период наблюдений (Б) и измеренные расходы наносов G, кг/с (В) на постах Змеиново (*1*), Бодайбо (*2*), Крестовский (*3*) и Солянка (*4*) по данным GRDC [9]

Fig. 2. Average daily water discharges Q, cms (А), amplitude of their maximum and minimum values for the observation period (Б) and measured sediment discharges G, kg/s (В) at the Zmeinovo (*1*), Bodaibo (*2*), Krestovsky (*3*), and Solyanka (*4*) gauging stations according to GRDC data [9]

модуль стока и максимальные расходы воды, что связано с большей средней высотой водосбора. Для Лены основным источником питания является снеготаяние, тогда как для Витима характерно преобладание дождевого питания в годовом стоке. Нижележащий участок Лены имеет смешанный водный режим, обусловленный наложением стока двух рек. Здесь наблюдается растянутое половодье, на спад которого накладываются дождевые паводки (преимущественно с бассейна Витима).

Сравнивая приведенные к слиянию Витима и Лены значения годового стока, можно сделать вывод, что доля Витима преобладает в годовом стоке, составляя в среднем около 57 %. В половодье сток Лены выше, в то время как в летне-осенний период доля стока Витима увеличивается, зачастую превышая 65–70 % от общего объема. Среднегодовой гидрограф р. Лены в створе Солянка в целом аналогичен створу Крестовский с закономерным ростом расходов, связанным с увеличением площади бассейна (рис. 2). Максимальные расходы здесь характерны в половодье, на летне-осенний период накладываются волны проходящих по бассейну Олекмы паводков.

Многолетние изменения стока воды и наносов

При оценке стока взвешенных наносов значимое влияние на результат оказывает место выборки используемых данных в многолетних тенденциях. Рассматриваемый период с наличием детальных данных по стоку наносов лежит на границе между фазами понижения и повышения средних годовых и сезонных температур воздуха [10]. С общим потеплением климата и увеличением количества осадков связан и постепенный рост расходов воды [11], наблюдающийся на исследуемых постах (рис. 3). При этом на Верхней Лене (к посту Змеиново) эти изменения менее выражены, чем на Витиме, Олекме и Лене ниже их впадения: ряд расходов в Змеиново однороден, в то время как для Солянки и Бодайбо проверка по критерию Стьюдента показывает неоднородность. При этом перегиб тренда среднегодовых расходов для всех постов произошел после периода с наличием данных – в 1981 г. для Бодайбо, в 1988 г. для Змеиново и в 1996 г. для Солянки [12].

Изменения мутности потока сложно оценивать статистически из-за большого количества пропусков в данных. Можно отметить, что на Лене они демонстрируют положительную связь с ростом среднегодовых расходов только в замыкающем створе участка (р. Лена – Солянка), в створе Змеиново наблюдается устойчивое снижение мутности, в то время как на Витиме в створе Бодайбо рост мутности в 1970-х годах сменился спадом значений (рис. 3). Период наличия данных по наносам на постах Змеиново и Бодайбо пришелся на период повышенных значений среднегодовой мутности, в то время как на посту Солянка мутность к настоящему моменту выросла на треть. Это необходимо учитывать при оценках и расчетах.

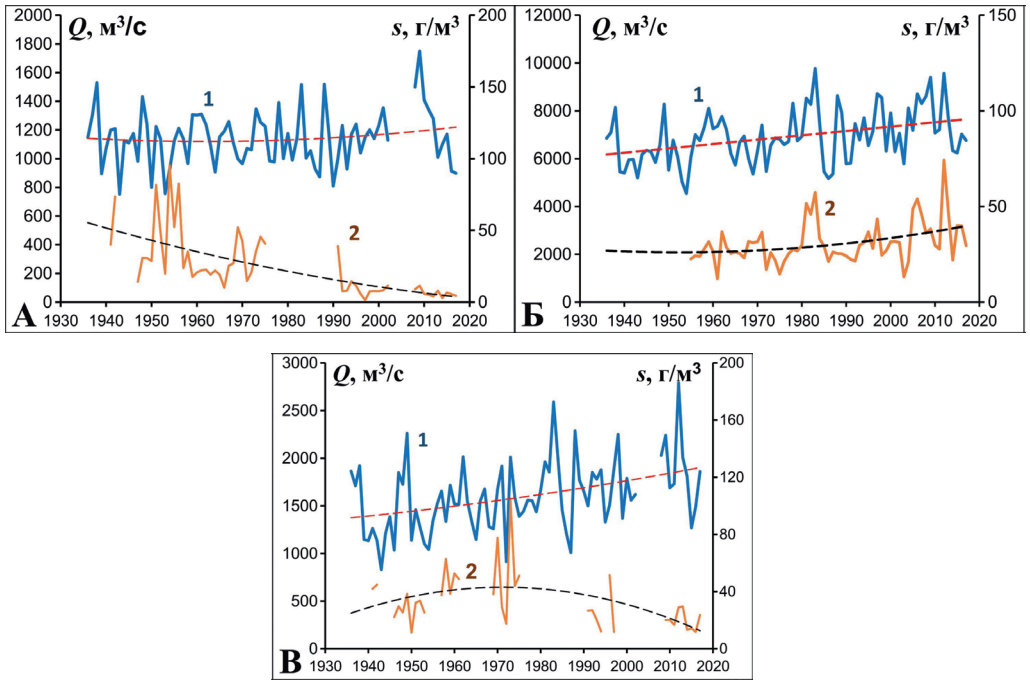


Рис. 3. Ход среднегодовых значений расхода воды (1) **и мутности** (2) **воды на постах Змеиново** (А)**, Солянка** (Б) **и Бодайбо** (В) **(по данным [11])**

Fig. 3. Changes of average annual values of water discharge (1) **and water turbidity** (2) **at the Zmeinovo** (А)**, Solyanka** (Б)**, and Bodaibo** (В) **gauging stations (according to [11])**

Существенным фактором формирования стока взвешенных наносов на участке исследования является добыча золота и других металлов в долинах рек открытым способом. Россыпные разработки значительно влияют на сток наносов и их физические характеристики [13] – в первую очередь за счет изменения рельефа долин и создания больших массивов взрыхленного грунта, легко вовлекающегося в поток при смыве за счет таяния снега и ливневых осадков. Не исключены аварийные и технологические сбросы с повышенной мутностью. Общий объем стока наносов и максимальные мутности рек ниже разработок возрастают в 5–100 раз и более в зависимости от площадей нарушенных земель и механизма добычи [14].

Для гидрологических постов, использованных в работе, затронутость бассейнов россыпной добычей значительно различается [15]. К створу г/п Змеиново длина нарушенных русел в бассейне незначительна (17 км, что соответствует трансформации стока с 0,2 % площади бассейна). К створу г/п Солянка эти значения увеличиваются до 2484 км и 8,1 %, к створу г/п Бодайбо – до 643 км и 9,6 %. Основная часть разработок в бассейне г/п Бодайбо находится на значительном удалении от поста, в верховьях бассейна Витима. При этом пост расположен выше впадения р. Бодайбо, бас-

сейн которой является крупнейшим центром золотодобычи и практически полностью изменен открытыми россыпями (см. рис. 4 (*1*)). К устью Витима показатели трансформации за счет этого увеличиваются до 1032 км и 10,3 %. В результате этого мутность Витима ниже гидропоста значительно повышается, что хорошо читается на спутниковых снимках (рис. 4 (*2*)). Аналогичное влияние характерно и для поста Солянка.

Ниже устья Витима значительно повышают мутность притоки Большой и Малый Патом, общие показатели нарушенности которых суммарно составляют 530 км и 5,2 % (относительно всего межприточного прироста площади водосбора). Бассейн Олекмы характеризуется показателями



Рис. 4. Россыпные разработки, влияющие на сток наносов на участке (*1*), и связанные с ними шлейфы мутности на снимках Sentinel от июня 2024 г. (*2* – на впадении Бодайбо в Витим, *3* – на слиянии Витима с Леной, *4* – на слияниях Чары с Олекмой и Олекмы с Леной)

Fig. 4. Placer mining sites affecting sediment runoff in the area (*1*) and associated turbidity plumes in Sentinel images from June 2024 (*2* – at the confluence of the Bodaibo with the Vitim, *3* – at the confluence of the Vitim with the Lena, *4* – at the confluences of the Chara with the Olyokma and the Olyokma with the Lena)

899 км и 11,2 %, при этом разработки хоть и имеют значительную протяженность, лежат в верхней части бассейна на значительном удалении от устья. Основной вклад в мутность на посту вносит р. Жуя – левый приток Чары, для которого показатели нарушенности составляют 547 км и 28,7 % бассейна. Слияние таких крупных рек с сопоставимыми и большими объемами стока приводит к разделению потока на мощные «струи» со значительно различающейся мутностью, причем перемешивание по длине рек происходит достаточно медленно. Так, Витимская «струя» (рис. 4 (*3*)) отчетливо читается в мутности Лены даже в створе г. Ленска (на удалении более 200 км от устья Витима). На г/п Солянка (рис. 4 (*4*)) часто прослеживаются четыре отдельные «струи» – вода самой Лены, воды ее правых притоков Большого и Малого Патомов, вода Чары и вода Олекмы (от левого к правому берегу).

За счет механической сортировки при создании отвалов и промывке увеличивается доля мелкой фракции в стоке наносов. Так, для одного из наиболее затронутых добычей районов на территории России – Верхней Колымы – содержание мелкой фракции в половодье, т. е. при максимальных годовых мутностях, достигает 50–90 % [16]. Принимая во внимание недоучет мелкой фракции (о чем было указано выше), данные на постах, находящихся под влиянием стоков с участков разработок, также могут быть занижены, а результаты наблюдений за наносами могут значительно отличаться друг от друга в зависимости от условий и места отбора проб. Все это является дополнительным источником погрешности при определении средних мутностей и их осреднению по сечению на гидропостах. Можно предположить, что данные по наносам для Солянки будут сильно завышены по сравнению с условиями в Ленске, а также – что в них будет наблюдаться значительный разброс в зависимости от условий стока на реках-притоках и особенностей отбора проб.

Характеристика стока взвешенных наносов

Для Витима, имеющего паводочный режим, характерны сравнительно высокие расходы наносов (более 500 кг/с) на протяжении всего теплого периода, что связано с наличием в бассейне большого количества межгорных впадин (Куандинская, Баунтовская и другие), сложенных четвертичными, легкоразмываемыми озерными отложениями. В пределах этих впадин наблюдаются активные горизонтальные русловые деформации, которые являются дополнительным источником наносов. Естественные максимумы (до 4100 кг/с) приурочены к высоким паводкам, наивысшие наблюденные расходы наносов за период (5700 кг/с) связаны, согласно примечаниям к таблице в Гидрологическом ежегоднике, с работой драги выше поста. Верхняя часть бассейна Лены сложена преимущественно известняками кембрийского возраста с отдельными участками магматиче-

ских интрузий, русла преимущественно врезанные, галечные, с чем связано в основном бассейновое происхождение наносов. Это сказывается на внутригодовом распределении: большую часть года расходы наносов не превышают 200 кг/с (для поста Змеиново), увеличиваясь только в мае – июне (на пике половодья, до 1320 кг/с) и редко – в высокие паводки. К посту Солянка расходы наносов повышаются и большую часть года превышают 200 кг/с с максимумами до 3850 кг/с на пике половодья и повышенными значениями на протяжении остального теплого периода, что связано, как было сказано выше, с изменениями стока наносов под воздействием россыпных разработок в бассейнах Большого и Малого Патомов и Чары (рис. 5). В холодный период года (январь – апрель и октябрь – декабрь) сток наносов, как и расходы воды, минимальны. Для Лены характерно запаздывание максимальных показателей стока наносов относительно волны половодья и постепенное их снижение в течение теплого периода; на Витиме, наоборот, максимальный сток наносов проходит до пиков половодья, после чего быстро снижается.

Анализ рядов измеренных значений позволяет сделать вывод, что для р. Лены характерно закономерное повышение мутности воды и стока наносов с увеличением расходов воды (т. е. значительный вклад вносит русловая составляющая, выражающаяся во взмучивании донных наносов и их выносе), в то время как для Витима характерны импульсные повышения стока наносов: высокие отдельные измеренные значения мутности не всегда тождественны значительному росту стока наносов за счет кратковременности своего увеличения или небольшого расхода воды, особенно в летний паводочный период. Таким образом, логично предположить, что для Витима преобладает вклад бассейнового смыва, происходящего при

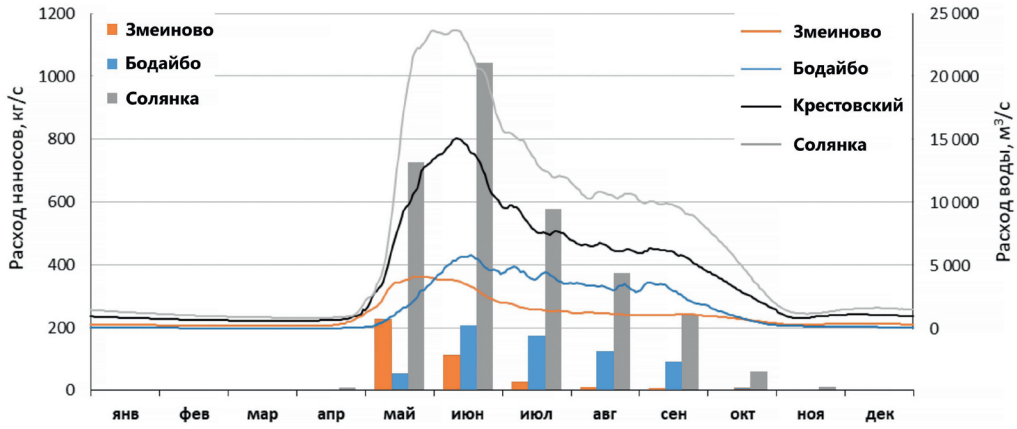


Рис. 5. Среднемесячные расходы наносов и среднесуточные расходы воды за доступный период на используемых постах

Fig. 5. Average monthly sediment discharge and average daily water discharge for the available period at used gauging stations

снеготаянии. Русло же Витима практически на всем протяжении за счет геологических особенностей и больших уклонов сложено крупной фракцией (галькой и валунами), в связи с чем мобилизация донных наносов незначительна, а описываемые выше плановые деформации русел носят локальный и эпизодический характер.

Важной информацией для оценки режима стока наносов являются характеристика крупности взвеси и ее изменчивость в течение года. Для г/п Бодайбо доступно лишь 7 валидных измерений, охватывающих, однако, весь диапазон летних расходов воды. Диапазон средних и медианных крупностей совпадает (от 0,05 до 0,59 мм), при этом минимальная крупность отмечается для пика половодья. Это может быть связано с воздействием сбросов с россыпных разработок, т. к. другое измерение, сделанное на подъеме половодья, характеризуется наибольшей из наблюденных крупностей, отражающей смыв материала с бассейна и поймы. Во время летних паводков средняя и медианная крупности составили 0,24 и 0,21 мм соответственно, с преобладанием фракции 0,5–0,2 мм (48 % по весовому содержанию, что соответствует мелким пескам). Связь между расходом воды и крупностью взвеси отсутствует.

Данные для г/п Змеиново и Солянка более полные, измерения наносов на верхнем посту (Змеиново) охватывают только половодье (май – июнь), в то время как данные для Солянки распределены более равномерно в течение года. Диапазон крупностей для Змеиново достаточно узок, изменяясь для средних от 0,03 до 0,2 мм, для медианных – от 0,003 до 0,16 мм. Из подобного распределения можно сделать вывод о превышении фоновых крупностей взвеси Витима над теми же показателями Лены без учета стоков с разработок, которые лежат вне бассейнов постов. Однозначная связь между расходом воды и крупностью взвеси также отсутствует (рис. 6). Однако можно предположить петлеобразную изменчивость крупности: подъему и максимальным расходам воды соответствуют наименьшие крупности, а при спаде они повышаются. Мутности, наоборот, выше на подъеме половодья. Это можно объяснить отсутствием значимого источника бассейновых наносов и преобладанием руслового источника, что подтверждается и связью между средней крупностью и мутностью – она практически повторяет связь крупности и расхода, однако можно сделать вывод, что крупность практически не меняется с ростом мутности, а при увеличении крупности (соответствующем спаду половодья) мутность не растет.

В створе г/п Солянка диапазон средних крупностей взвеси изменяется от 0,03 до 0,43 мм, медианных – от 0,008 до 0,54 мм, т. е. соответствует общему размаху крупностей на постах Змеиново и Бодайбо. При этом максимальная крупность наблюдается осенью во время ледохода, остальные

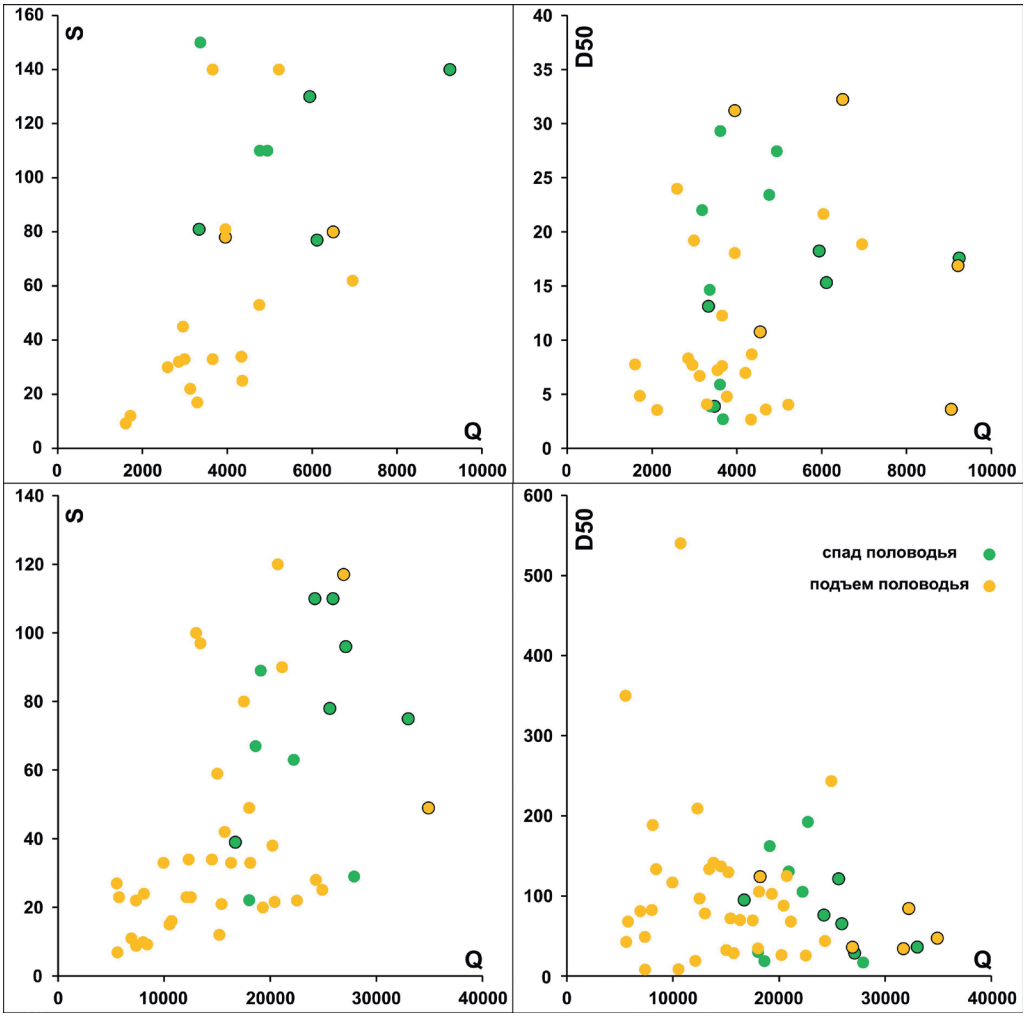


Рис. 6. Связи расходов воды Q, м³/с с мутностью S, г/м³ (*слева*) и медианными крупностями взвеси D50, мм (*справа*) на г/п Лена – Змеиново (*сверху*) и г/п Лена – Солянка (*снизу*). Черной окружностью выделены значения в пределах двух дней от пика половодья

Fig. 6. Relationships between water discharge Q, cms and turbidity S, g/m³ (*left*) and median suspended sediment sizes D50, mm (*right*) of the Lena river at Zmeinovo (*top*) and Solyanka (*bottom*), measurements taken within two days around the flood peak are circled

значения соответствуют этим показателям в Змеиново. Явной связи с фазами режима не наблюдается (что объясняется опять же наличием отдельных «струй» с разными характеристиками и наложением друг на друга фаз режима на притоках), однако можно отметить сравнительно невысокие крупности при максимальных расходах. Отмечается уменьшение крупности с ростом средних скоростей потока (рис 6). Наибольший разброс крупностей (отношение D90/D10) наблюдается на спаде половодья, при относительно низких расходах и мутностях.

Обобщая имеющуюся информацию о крупности наносов р. Лены на данном участке, можно отметить преобладание мелкой фракции (пылеватых и более мелких частиц) в составе взвеси большую часть года и слабую связь характеристик взвеси с водностью и фазой режима, что связано со значительным удалением источника наносов от постов.

Для определения расходов наносов и их временных характеристик и изменчивости были построены и проанализированы связи между расходами воды и наносов. Согласно [17], такие связи должны аппроксимироваться степенными зависимостями вида $G = A * Q^m$, где A – эрозионный коэффициент, определяющий природные условия водосбора и их влияние на формирование стока наносов, а степенной показатель ^{m} отражает состав взвеси. На практике данные зависимости наиболее хорошо работают для небольших водосборов и для таких створов, где постоянно преобладает бассейновая составляющая. Для больших водосборов, имеющих в своих пределах различные природные условия и, следовательно, различные условия стока наносов, корреляция данной зависимости снижается, и значительную роль начинают играть местные факторы.

Анализируя кривые связей данного типа для исследуемых постов (рис. 7), можно увидеть, что достаточно тесная связь наблюдается для ниж-

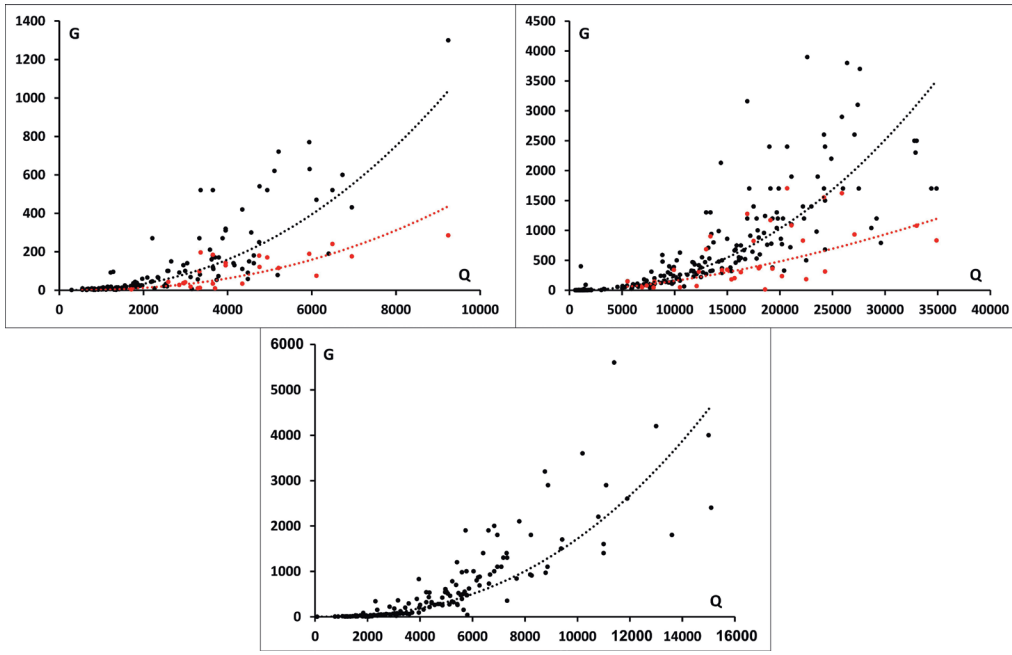


Рис. 7. Связи между расходами воды Q, м³/с и расходами наносов G, кг/с (черным отмечены общие расходы, красным – руслообразующей фракции > 0,05 мм) на г/п Лена – Змеиново (*слева*), Лена – Солянка (*справа*), Витим – Бодайбо (*внизу*)

Fig. 7. Relationships between water discharge Q, cms and sediment discharge G, kg/s (black – total, red – channel-forming fraction > 0.05 mm) at the Lena – Zmeinovo (*left*), Lena – Solyanka (*right*), Vitim – Bodaibo (*bottom*) gauging stations

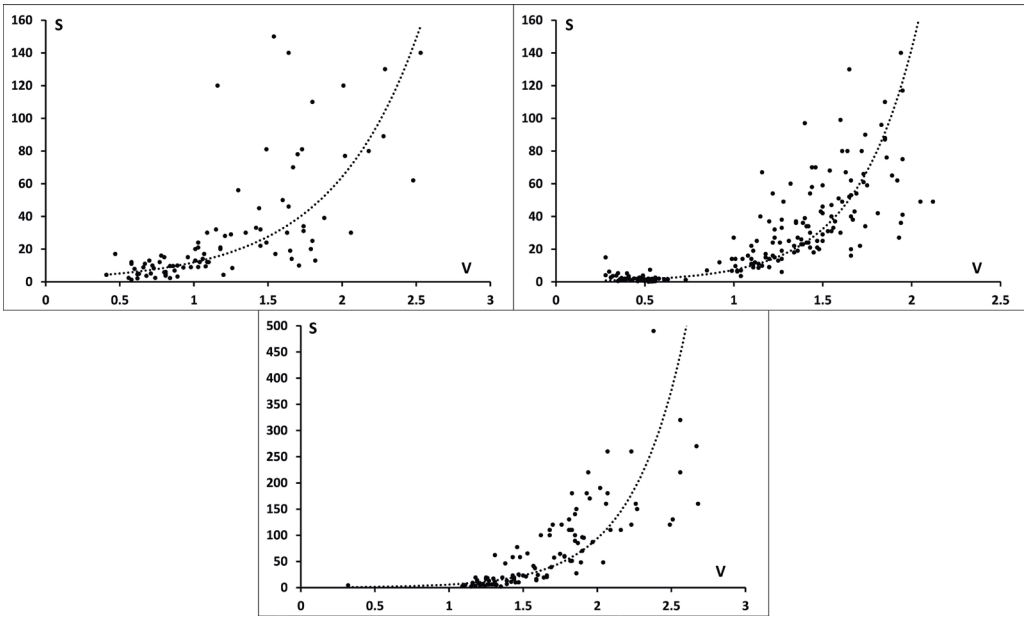


Рис. 8. Связи между мутностью воды S, г/м³ и средними скоростями V, м/с потока на г/п Лена – Змеиново (*слева*), Лена – Солянка (*справа*), Витим – Бодайбо (*снизу*)

Fig. 8. Relationships between water turbidity S, g/m³ and average flow velocities V, m/s at the Lena – Zmeinovo (*left*), Lena – Solyanka (*right*), Vitim – Bodaibo (*bottom*) gauging stations

них диапазонов расходов, для которых характерны невысокие мутности. Связи между расходом руслообразующей фракции > 0,05 мм и расходами воды имеют другой характер. Так, для г/п Змеиново данная связь близка к линейной (однако при добавлении данных измерений при низких расходах связь также становилась бы степенной) и имеет сравнительно небольшую дисперсию, доля расходов этой фракции составляет в среднем 25 % от общей, изменяясь в широких пределах от 6 % до 72 %. Для г/п Солянка связь значительно менее тесная, и для расчета стока руслообразующей фракции в этом случае можно использовать верхнюю огибающую поля точек, изменяющуюся по линейной зависимости.

Также при анализе необходимо учитывать структуру скоростного поля потока, определяющего вовлечение наносов, их перемещение и осаждение. Зависимости между мутностями и средними скоростями потока имеют более четкие, близкие к экспоненциальным связи для г/п Солянка и Бодайбо (рис. 8), в то время как для г/п Змеиново связь относительно устойчива только для малых значений мутности. Подавляющая часть транспорта наносов проходит при средней и высокой водности, в летний период. Этому периоду соответствуют высокие скорости – для г/п Змеиново > 0,8 м/с, для г/п Крестовский, Солянка и Бодайбо > 1,1 м/с. Максимальные мутности на всех постах проходят при средних скоростях потока 1,5 м/с и выше. При

таких скоростях даже алевриты и песок, составляющие руслообразующую фракцию наносов, свободно переносятся потоком в турбулентной форме, осаждение частиц будет происходить только в скоростных тенях потока, морфологические условия для формирования которых редко встречаются на участке.

Вертикальное распределение скоростей по потоку может быть охарактеризовано по измерениям профилографа, выполненным в характерных для участка створах в 2023–2024 гг. (с корытообразным, глубоким руслом, преобладающим на Верхней Лене). Измерения показали малую изменчивость скоростей по вертикали с их уменьшением ко дну на 10–30 % и при значительных пульсациях, выражающихся в ломаной форме эпюр. К таким пульсациям обычно приурочены отдельные вихри с повышенной мутностью потока. Падение скоростей начинается в придонном слое толщиной 1–1,5 м ото дна, придонные скорости составляют не менее 0,75 от средней скорости по потоку.

Таким образом, при решении хозяйственных задач для створов в окрестностях г. Ленска, связанных со стоком наносов, можно принимать особенности стока и крупности взвешенных наносов по Змеиново как характерные. При планировании сооружений необходимо учитывать наличие «струй» мутности в потоке, пропорции которых значительно меняются

Таблица 2. Характерные параметры стока взвешенных наносов в створе г. Ленска при различных гидрологических фазах

Table 2. Characteristic parameters of the suspended sediments discharge at Lensk city in different hydrological phases

Фаза режима	Диапазон расхода, м³/с	Диапазон придонной скорости, м/с	Диапазон мутности, г/м³	Крупность, мм	Примечание
Зимняя межень (ноябрь – апрель)	100–1000	0,15–0,5	< 70	< 0,03	по г/п Солянка
Подъем половодья	1000–10 000	0,7–1,1	70–100	0,03–0,1	включая весенние ледовые явления, по г/п Змеиново
Пики (низкой водности)	10 000–18 000	0,9–1,1	50–100	0,03–0,15	по г/п Змеиново и г/п Бодайбо
Пики (высокой водности)	18 000–30 000 и более	0,9–1,2	100–150	0,03–0,05	по г/п Змеиново
Спад половодья	5000–15 000	0,5–0,8	30–80	0,05–0,2	по г/п Змеиново
Летние паводки	5000–20 000	0,7–1,0	10–50	0,01–0,43	по г/п Бодайбо для условий стока с разработок
Летне-осенняя межень	3000–10 000	0,3–0,6	50–80	0,05	по г/п Змеиново

в течение года. Так, сравнение суточных расходов Лены и Витима (приведенных через прирост площади водосбора к их слиянию) показывает, что подавляющую часть времени (в среднем 330 дней в году) расход Верхней Лены составляет треть и более от общего расхода ниже по течению (предположительно, в такой ситуации, с учетом смешения, воды Витима будут оказывать значительное влияние на показатели воды, поступающей на насосные сооружения). При этом в отдельные годы, характеризующиеся сравнительно низкой меженью на р. Лене и прохождением паводков по Витиму, доля расходов Верхней Лены может падать до 10 % от общего. Максимальная продолжительность периода подавляюще высоких расходов Витима (больше 2/3 от общего) составила 38 дней. Как было показано выше, таким условиям соответствуют повышенные крупности и содержание песчаной фракции. В период половодья, когда предположительно наибольшего процентного содержания в стоке Витима достигает мелкая взвесь с разработок, доля расхода Верхней Лены составляет 63 % и выше. Охарактеризовать транспорт наносов и его внутригодовую изменчивость на данном участке можно согласно приведенным в табл. 2 значениям. Для оценки скоростей кольматации сооружений допустимо использовать максимальные значения в каждом диапазоне, соответствующие наихудшим условиям из возможных.

ВЫВОДЫ

Проведенный анализ транспорта взвешенных наносов на участке Верхней Лены в районе г. Ленска, выполненный на основе архивных данных гидрологических постов-аналогов (Змеиново, Солянка, Бодайбо), позволил выявить ключевые особенности формирования и переноса наносов в условиях сложного пространственного взаимодействия природных и антропогенных факторов. Установлено, что данные наблюдательной сети Росгидромета, несмотря на их широкое применение в практических расчетах, обладают существенной систематической погрешностью, обусловленной как методическими ограничениями измерений, так и пространственной неоднородностью потока, особенно в условиях влияния россыпной добычи полезных ископаемых в бассейнах Витима, Олекмы и Чары. Именно антропогенная трансформация рельефа и гидрологического режима притоков приводит к формированию выраженных «струй» мутности, сохраняющих свои характеристики на протяжении сотен километров вниз по течению. Это обусловливает высокую локальную изменчивость мутности, крупности и гранулометрического состава наносов, что затрудняет их осреднение по сечению и требует учета не только гидрологической фазы, но и соотношения стоков основных притоков.

Выявлено различие в типах транспорта наносов: для Верхней Лены характерен преимущественно русловой тип с выраженной связью расходов наносов и воды в половодье, в то время как для Витима доминирует бассейновый смыв, усиливающийся за счет размыва делювиальных и озерных отложений, а также техногенных отвалов. Сопоставление данных постов-аналогов, дополненное современными измерениями скоростного поля, позволило обоснованно реконструировать внутригодовую динамику мутности, крупности и расходов наносов, а также оценить диапазоны гидравлических и седиментационных характеристик по фазам водного режима.

В совокупности результаты исследования свидетельствуют о возможности и одновременно необходимости критического переосмысления подходов к использованию сетевых данных при решении прикладных задач. В частности, при проектировании водозаборных и иных гидротехнических сооружений, где недооценка роли мелкодисперсных фракций или игнорирование пространственной структуры потока может привести к существенным ошибкам в прогнозе кольматации и долговечности эксплуатации. Таким образом, адекватная оценка транспорта наносов на слабоизученных участках крупных рек возможна лишь при комплексном учете геоморфологических, гидрологических и антропогенных факторов, а также при переходе от формализованного применения усредненных сетевых данных к их содержательной интерпретации в контексте локальных особенностей формирования стока.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

CONFLICT OF INTERESTS
The authors declare no relevant conflict of interests.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Караушев А. В. Теория и методы расчетов речных наносов. Л.: Гидрометеоиздат, 1977. 272 с.
2. Алексеевский Н. И. Формирование и движение речных наносов. М.: Моск. ун-т, 1998. 204 с.
3. Чалов С. Р. Речные наносы. М.: Издательский дом «Инфра-М», 2024. 469 с.
4. Шмакова М. В. К вопросу о расчетах расхода взвешенных наносов // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2020. № 1. С. 50–71. https://doi.org/10.35567/1999-4508-2020-1-4
5. Чалов С. Р., Терский П. Н., Ефимова Л. Е., Терская А. И., Ефимов В. А., Данилович И. С. Проблемы гидрологического мониторинга в бассейнах трансграничных рек Восточной Европы (на примере Западной Двины) // Инженерные изыскания. 2019. Т. XIII, № 1. С. 32–44. https://doi.org/10.25296/1997-8650-2019-13-1-32-44
6. Магрицкий Д. В. Годовой сток взвешенных наносов российских рек водосбора Северного Ледовитого океана и его антропогенные изменения // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. 2010. № 6. С. 17–24.
7. Blott S. J., Pye K. GRADISTAT: a grain size distribution and statistics package for the analysis of unconsolidated sediments // Earth Surface Processes and Landforms. 2001. Vol. 26. No. 11. P. 1237–1248. https://doi.org/10.1002/esp.261

8. Великанов М. А. Движение наносов. М.: Изд-во Министерства речного флота СССР, 1948. 208 с.
9. GRDC: Data Portal. [Электронный ресурс]. URL: https://grdc.bafg.de/data/data_portal/ (дата обращения: 29.11.2025 г.)
10. Георгиади А. Г., Кашутина Е. А. Многолетние изменения годового и сезонного стока рек бассейна Лены // Известия РАН. Серия географическая. 2014. № 2. С. 71–83. https://doi.org/10.15356/0373-2444-2014-2-71-83
11. Магрицкий Д. В., Банщикова Л. С. Реакция стока наносов рек в бассейне р. Лены на изменения климата и хозяйственную деятельность // Динамика и взаимодействие геосфер Земли. Материалы Всероссийской конференции с международным участием. Т. 2. Томск: Изд-во Томского ЦНТИ, 2021. С. 61–64.
12. Фролова Н. Л., Магрицкий Д. В., Киреева М. Б., Григорьев В. Ю., Гельфан А. Н., Сазонов А. А., Шевченко А. И. Сток рек России при происходящих и прогнозируемых изменениях климата: обзор публикаций. 1. Оценка изменений водного режима рек России по данным наблюдений // Водные ресурсы. 2022. № 3. С. 251–269. https://doi.org/10.31857/S032105962203004X
13. Чалов С. Р. Эрозионно-русловые системы в условиях горнодобывающей деятельности // Эрозия почв и русловые процессы. 2024. № 1. С. 107–121. https://doi.org/10.71367/3034-4638-2024-1-1-107-121
14. Виноградова О. В., Хмелева Н. В. Русловые процессы и формирование аллювиальных россыпей золота. М.: МГУ, 2009. 171 с.
15. Shkolnyi D., Magritsky D., Chalov S. Impact of open-cast placer mining on sediment transport across Far Eastern rivers of Russia // International Journal of Sediment Research. 2024. Vol. 39. No. 5. P. 702–713. https://doi.org/10.1016/j.ijsrc.2024.03.001
16. Ушаков М. В. Влияние добычи россыпного золота на мутность воды реки Колымы // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2016. № 9. С. 316–325.
17. Маккавеев Н. И. Русло реки и эрозия в ее бассейне. М.: Изд-во АН СССР, 1955. 247 с.

REFERENCES

1. Karaushev A. V. Theory and methods of the river alluvium calculations. L.: Gidrometeoizdat, 1977. 272 p. (In Russ.)
2. Alekseyevskiy N. I. Formation and movement of river alluvium. M.: Moscow University. 1998. 204 p. (In Russ.)
3. Chalov S. R. River alluvium. M.: Infra-M Publishing House, 2024. 469 p. (In Russ.)
4. Shmakova M. V. On the issue of the suspended alluvium discharge calculations. *Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management.* 2020. No. 1. P. 50–71. (In Russ.) https://doi.org/10.35567/1999-4508-2020-1-4
5. Chalov S. R., Terskiy P. N., Efimova L. E., Terskaya A. I., Efimov V. A., Danilovich I. S. Problems of hydrological monitoring in transboundary rivers of Eastern Europe (on the example of the Western Dvina). *Engineering survey.* 2019. Vol. 13. No. 1. P. 32–45. (In Russ.) https://doi.org/10.25296/1997-8650-2019-13-1-32-44
6. Magritsky D. V. Annual runoff of the suspended alluvium of Arctic Acean catchment Russian rivers and its anthropogenic changes. *Moscow University Bulletin.* Ser. 5, Geography. 2010. No. 6. P. 17–24. (In Russ.)
7. Blott S. J., Pye K. GRADISTAT: a grain size distribution and statistics package for the analysis of unconsolidated sediments. *Earth Surface Processes and Landforms*. 2001. Vol. 26. No. 11. P. 1237–1248. https://doi.org/10.1002/esp.261
8. Velikanov M. Alluvium movements. M.: Publishing House of the Ministry of Inland Water Transport of the USSR, 1948. 208 p. (In Russ.)

9. GRDC: Data Portal. [Electronic resource]. URL: https://grdc.bafg.de/data/data_portal/ (accessed 29.11.2025).
10. Georgiadi A. G., Kashutina Ye. A. The Features of Long-term Annual and Seasonal Runoff Changes for Lena Basin Rivers. Proceedings of the Russian Academy of Sciences. Series: Geography. 2014. Vol. 2. P. 71–83. (In Russ.) https://doi.org/10.15356/0373-2444-2014-2-71-83
11. Magritskiy D. V., Banshchikova L. S. The Lena River basin rivers alluvium runoff response to climate change and economic activities. Proceedings of "The Earth geospheres' Dynamics and Interactions" all-Russian Conference with international participation. Vol. 2. Tomsk: Tomsk SNTI Publishing house. 2021. P. 61–64. (In Russ.)
12. Frolova N. L., Magritskiy D. V., Kireyeva M. B., Grigoriev V. Yu., Gelfan A. N., Sazonov A. A., Shevchenko A. I. Streamflow of Russian rivers under current and forecasted climate changes: a review of publications. 1. Assessment of changes in the water regime of russian rivers by observation data. *Water Resources.* 2022. Vol. 49. No. 3. P. 333–350. https://doi.org/10.1134/S0097807822030046
13. Chalov S. R. Fluvial systems affected by open-cast mining. *Soil erosion and river channel processes.* 2024. No. 1. P. 107–121. (In Russ.) https://doi.org/10.71367/3034-4638-2024-1-1-107-121
14. Vinogradova O. V., Khmeleva N. V. Channel processes and formation of alluvial gold deposits. M.: Moscow state University Publishing House. 2009. 171 p. (In Russ.)
15. Shkolnyi D., Magritsky D., Chalov S. Impact of open-cast placer mining on sediment transport across Far Eastern rivers of Russia. *International Journal of Sediment Research.* 2024. Vol. 39. No. 5. P. 702–713. https://doi.org/10.1016/j.ijsrc.2024.03.001
16. Ushakov M. V. The alluvial gold mining impact on the Kolyma River turbidity. Information analytical bulletin of mining. 2016. No. 9. P. 316–325. (In Russ.)
17. Makkaveyev N. I. A river bed and erosion in its basin. M.: The USSR Academy of Sciences Publishing House.1955. 247 p. (In Russ.)

Сведения об авторах:

Школьный Данила Игоревич, научный сотрудник, кафедра гидрологии суши, географический факультет, ФГБОУ ВО «Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова», Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1; https://orcid.org/0009-0005-1954-8652; e-mail: danila.hydro@yandex.ru

Цыпленков Анатолий Сергеевич, канд. геогр. наук, старший научный сотрудник, НИЛ эрозии почв и русловых процессов им. Н. И. Маккавеева, географический факультет, ФГБОУ ВО «Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова», Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1; https://orcid.org/0000-0003-4144-8402, e-mail: atsyplenkov@geogr.msu.ru

Турыкин Леонид Анатольевич, канд. геогр. наук, старший научный сотрудник, НИЛ эрозии почв и русловых процессов им. Н. И. Маккавеева, географический факультет, ФГБОУ ВО «Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова», Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1; https://orcid.org/0000-0003-3712-2370, e-mail: filigorod@list.ru

Головлев Павел Петрович, младший научный сотрудник, НИЛ эрозии почв и русловых процессов им. Н. И. Маккавеева, географический факультет, ФГБОУ ВО «Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова», Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1; https://orcid.org/0009-0007-6604-4849, e-mail: pavel_golovlev@list.ru

About the authors:

Danila I. Shkolnyi, Researcher, Department of Land Hydrology, Faculty of Geography, M.V. Lomonosov Moscow State University. Leninskie Gory, 1, Moscow, 119991, Russia; https://orcid.org/0009-0005-1954-8652; e-mail: danila.hydro@yandex.ru

Anatoly S. Tsyplenkov, Candidate of Geographic Sciences, Senior Researcher, The Makkaveev laboratory of Soil Erosion and Fluvial Processes, Faculty of Geography, M. V. Lomonosov Moscow State University. Leninskie Gory, 1, Moscow, 119991, Russia; https://orcid.org/0000-0003-4144-8402, e-mail: atsyplenkov@geogr.msu.ru

Leonid A. Turykin, Candidate of Geographic Sciences, Senior Researcher, The Makkaveev laboratory of Soil Erosion and Fluvial Processes, Faculty of Geography, M. V. Lomonosov Moscow State University. Leninskie Gory, 1, Moscow, 119991, Russia; https://orcid.org/0000-0003-3712-2370, e-mail: filigorod@list.ru

Pavel P. Golovlev, Junior Researcher, The Makkaveev laboratory of Soil Erosion and Fluvial Processes, Faculty of Geography, M. V. Lomonosov Moscow State University. Leninskie Gory, 1, Moscow, 119991, Russia; https://orcid.org/0009-0007-6604-4849, e-mail: pavel_golovlev@list.ru

Поступила в редакцию / Received 08.12.2025.
Поступила после рецензирования / Revised 07.03.2026.
Принята к публикации / Accepted 10.04.2006. .