

ПРИРОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ И ДИНАМИКА ГЕОСИСТЕМ

УДК 556.536.5

ГОДОВОЙ СТОК ВЗВЕШЕННЫХ НАНОСОВ РЕКИ ЕНИСЕЙ

© 2019 г. Н. И. Тананаев<sup>1, 2, \*</sup>, Р. Э. Тейссеренк<sup>2</sup>, Т. О. Ле Дантек<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, Якутск, Россия

<sup>2</sup> EcoLab, Университет Тулузы, CNRS, Тулуза, Франция

\*e-mail: TananaevNI@mpi.ysn.ru

Поступила в редакцию 09.06.2018 г.; после доработки 03.12.2018 г.; принята в печать 19.07.2019 г.

В замыкающем створе р. Енисей, в районе г. Игарка, в 2014–2016 гг. выполнены исследования, включавшие учащенный отбор проб воды для определения мутности. Установлено, что в период половодья наблюдается несколько пиков мутности, не связанных с изменениями расхода воды. Анализ кривых гистерезиса указывает на ведущую роль взмучивания отложившегося за зимнюю межень материала, а также размыва локальных источников – берегов и крупных аллювиальных массивов – в формировании этих пиков. На спаде половодья пики мутности связаны с прохождением волн наносов по притокам Енисея, в первую очередь – Нижней Тунгуске. Расчет годового стока взвешенных наносов выполнен для трех лет (2014–2016). Для этого использовались метод кривых транспорта наносов и вычислительная программа LOADEST, разработанная Геологической службой США. Средний за три года объем стока взвешенных наносов составил  $8.1 \pm 0.5$  млн т, что больше средних значений для периода 1970–2001 гг. (от 4.6 до 5.9 млн т), суммарный вынос материала за три года –  $24.2 \pm 2.1$  млн т.

**Ключевые слова:** сток взвешенных наносов, эффект гистерезиса, р. Енисей, г. Игарка, Российская Арктика, кривая транспорта наносов, регрессионный анализ.

**DOI:** <https://doi.org/10.31857/S2587-55662019668-82>

ВВЕДЕНИЕ

Гидрологический режим Северного Ледовитого океана, по сравнению с другими океанами, в наибольшей степени подвержен влиянию континентальных потоков вещества. Годовой сток впадающих в него рек составляет около 10% от мирового, тогда как его объем – лишь 1% от общего объема Мирового океана [23]. Климатические и гидрологические изменения, наблюдаемые в последние годы, в частности, увеличение водного стока северных рек [24, 27, 30], могут повлиять на стратификацию океана, океаническую циркуляцию и характеристики ледяного покрова [22].

Сток взвешенных наносов в замыкающем створе крупной реки – одновременно и результирующая многочисленных эрозионно-аккумулятивных процессов на ее водосборе, в долине и русле, и входной сигнал, влияющий на гидроморфологические процессы в устьях рек, береговой зоне и акватории морей и океанов [5]. Количественные оценки выноса реками терригенного материала, как одного из элементов геостока [2], необходимы для развития представлений о взаимодействии материков и океанов. Кроме того, они могут быть использованы для расчетов других составляющих речного стока.

Количество взвешенного вещества, переносимого реками, определяет также объем стока химических веществ [14, 15].

Во взвешенном состоянии переносятся также органические частицы, включая органический углерод, участвующий в биохимических процессах с выделением климатически-релевантных газов. Содержание взвешенного органического углерода в водах крупных рек Арктики составляет от 0.4 до 5.7% массы взвеси; для р. Енисей и притоков его оценки расходятся от 1.1% до 5% [9, 19, 20].

Несмотря на то что Енисей – крупнейшая река в России и в Арктике, с гидрологической точки зрения она исследована слабо. Сведения о ежедневных расходах воды опубликованы в справочной литературе не полностью, с многочисленными пропусками. Сведения об измеренной мутности и среднемесечном стоке взвешенных наносов фрагментарны и охватывают период до 2001 г. По опубликованным оценкам, среднемноголетний годовой объем стока взвешенных наносов в створе г.п. Игарка составляет от 4.6 до 5.9 млн т [4, 13].

В 2014–2016 гг. в замыкающем створе р. Енисей – г. Игарка в рамках международного проекта *ТОМСАР–Permafrost* (“Terrestrial

organic carbon characterization in Arctic rivers through molecular and isotopic analysis”, <http://www.tomcar.fr>) был организован учащенный отбор образцов воды, в том числе для определения мутности. В период половодья образцы воды нередко отбирались ежедневно, что позволило повысить точность расчета годового стока наносов за период полевых наблюдений.

В статье представлены результаты анализа полевого материала: описание эффекта гистерезиса во временных рядах мутности и расхода воды; оценки годового стока наносов, полученные различными методами; сравнение полученных оценок годового стока взвешенных наносов р. Енисей с ранее опубликованными.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Отбор проб воды из р. Енисей производился в районе г. Игарка, в 3 км ниже устья Игарской протоки (рис. 1), в центральной части русла с поверхности реки, в пластиковые бутылки объемом 1.05 л. Всего отобрано 85 проб: в 2014 г. – 27, в 2015 г. – 40 и в 2016 г. – 18, преимущественно в период половодья (рис. 2).

Мутность воды определялась гравиметрическим методом; образцы фильтровались через стекловолоконный фильтр Millipore GF/F с эквивалентным диаметром пор 0.45 мкм, фильтры высушивались

в течение 24 часов при температуре 45°C, после чего взвешивались с точностью до 0.1 мг на весах I (специального) класса точности.

Сведения о ежедневных расходах воды в створе р. Енисей – г. Игарка за 2014–2016 гг. представлены отделом гидрологии Среднесибирского УГМС. Ежедневные расходы воды на г.п. Игарка рассчитываются по данным об уровнях воды. Уровень воды измеряется на гидрологическом посту, расположенном в Игарской протоке в 7 км выше створа полевых наблюдений. При падении уровня ниже 400 см над “0” графика г.п. Игарка он определяется по данным об уровне на выше-расположенном г.п. Селиваниха (с. Туруханск). Сведения о расходах воды в створах р. Енисей – г. Енисейск, р. Подкаменная Тунгуска – пос. Суломай и Нижняя Тунгуска – фактория Большой Порог за 2014–2015 гг. получены из АИС ГМВО (Автоматизированная информационная система государственного мониторинга водных объектов, <https://gmvo.skniivh.ru/>).

По детальным полевым данным для половодья каждого года построены совместные графики изменения расхода и мутности воды. Они характеризуют неоднозначность связи этих величин во времени, когда в разные фазы водного режима одному и тому же значению расхода воды соответствуют различные значения мутности, и потому называются гистерезисными кривыми (петлями) [7].

Из соображений наглядности их нередко представляют не только в абсолютных величинах, но и в относительных координатах [18], как сделано и в данной работе. Относительное время рассчитывалось в долях от продолжительности выбранного периода. Относительные величины ежедневного расхода  $Q_{отн}$  для каждого  $i$ -ого члена ряда  $Q_i$  определялись относительно экстремумов ряда – минимального расхода  $Q_{min}$  и максимального  $Q_{max}$  за выбранный период:

$$Q_{отн} = (Q_i - Q_{min}) / (Q_{max} - Q_{min}), \quad (1)$$

относительная мутность определялась из уравнения, аналогичного (1).

Для расчета годового стока наносов строились кривые транспорта наносов (КТН) [7], по данным о ежедневных расходах воды  $Q$ , м<sup>3</sup>/с, и измеренной мутности  $s$ , мг/л, для каждого года в отдельности и для всего периода 2014–2016 гг. Коэффициенты уравнений КТН определялись методом нелинейной регрессии в программе RStudio [25], графической оболочке языка программирования R, с использованием встроенной функции  $nls()$ .

Определение годового стока взвешенных наносов  $W_{Rr}$ , млн т, с целью сравнения расчетных методик, выполнялось с применением нескольких различающихся подходов.

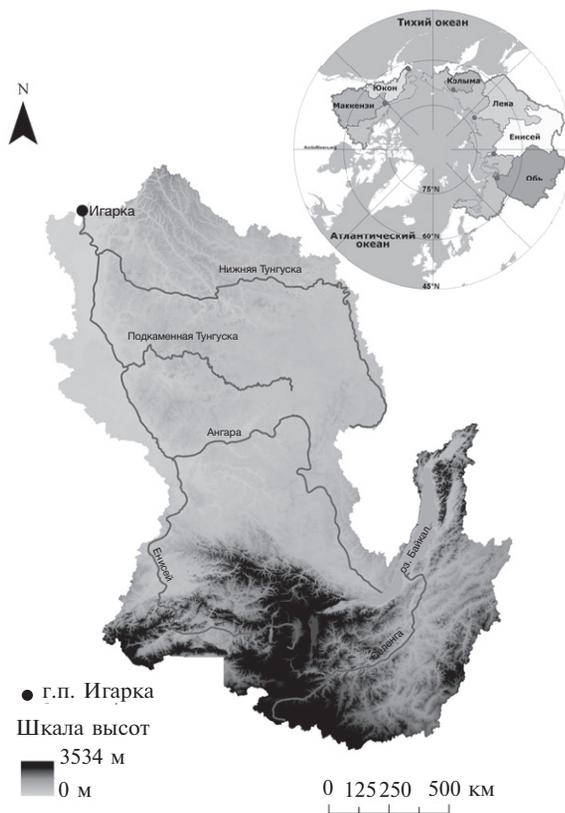
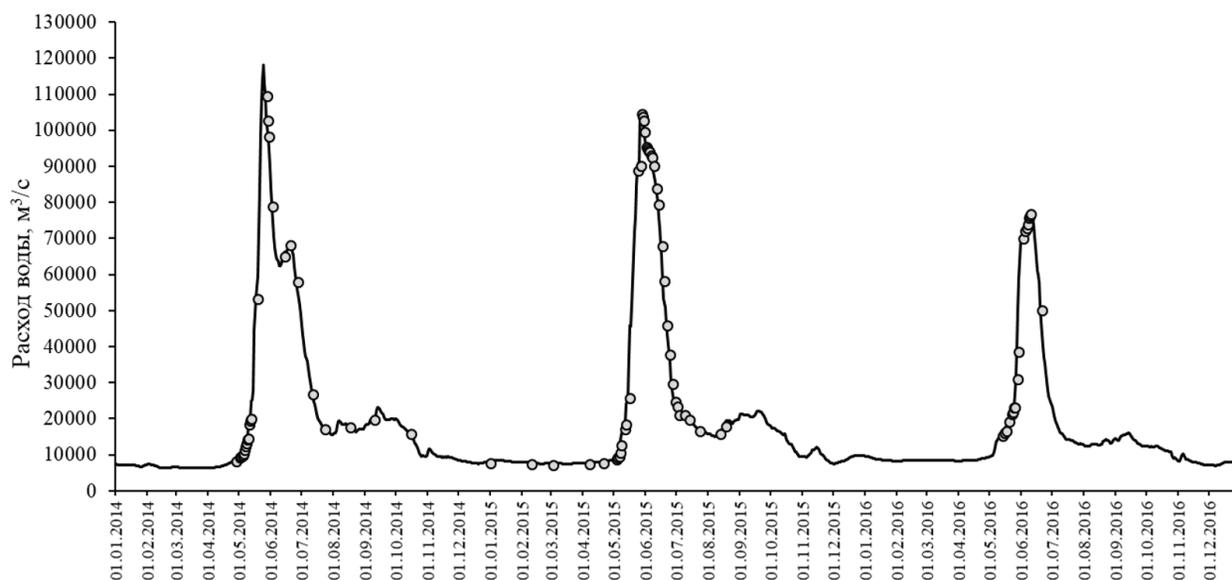


Рис. 1. Схема бассейна р. Енисей выше замыкающего створа (г.п. Игарка).



**Рис. 2.** Гидрограф р. Енисей в створе г. Игарка за 2014–2016 гг. (данные предоставлены Среднесибирским УГМС); точками показаны даты отбора образцов воды.

1. Для каждого года отдельно; среднесуточная мутность вычислялась по кривой транспорта наносов (а) для всего года, (б) только вне периода половодья; в период половодья она определялась интерполяцией между соседними значениями измеренной мутности [6].

2. Для всего периода 2014–2016 гг. по кривой транспорта наносов, параметры которой определялись по всем значениям измеренной мутности за три года.

Такие же подходы использовались для расчетов по рядам суточного объема стока воды  $W_Q$ , км<sup>3</sup>, и наносов  $W_R$ , тыс. т. Для каждого года методом КТН получено шесть оценок суммарного стока взвешенных наносов.

В работе также использовалась программа LOADEST для расчетов валового стока примесей [17, 26]. Калибровочными данными для ее работы служат ряды измеренной мутности и соответствующих им расходов воды. По этим ря-

дам модифицированным методом наибольшего правдоподобия [12] программой определялись коэффициенты заложенных в нее регрессионных моделей (табл. 1), отдельно для каждого года и для всего периода 2014–2016 гг.

Оптимальная модель выбиралась на основании информационного критерия Акаике с поправкой на малую выборку  $AICc$ :

$$AICc = 2k - 2\ln L + [2k(k + 1) / (n - k - 1)],$$

где  $k$  – число параметров модели,  $L$  – максимизированное значение функции правдоподобия модели,  $n$  – размер выборки, а также по критерию Нэша–Сатклиффа  $NS$  [21]:

$$NS = 1 - [\Sigma(W_{Robs} - W_{Rsim}) / \Sigma(W_{Robs} - W_{Robs}^*)],$$

где  $W_{Robs}$  и  $W_{Rsim}$  – наблюдаемые и рассчитанные величины суточного стока взвешенных наносов,  $W_{Robs}^*$  – среднее арифметическое из наблюдаемых значений.

**Таблица 1.** Регрессионные модели пакета программ LOADEST, по [26]

№ модели	Регрессионная модель для $\ln s$
(1)	$a_0 + a_1 \cdot \ln Q$
(2)	$a_0 + a_1 \cdot \ln Q + a_2 \cdot \ln Q^2$
(3)	$a_0 + a_1 \cdot \ln Q + a_2 T$
(4)	$a_0 + a_1 \cdot \ln Q + a_2 \cdot \sin(2\pi T) + a_3 \cdot \cos(2\pi T)$
(5)	$a_0 + a_1 \cdot \ln Q + a_2 \cdot \ln Q^2 + a_3 T$
(6)	$a_0 + a_1 \cdot \ln Q + a_2 \cdot \ln Q^2 + a_3 \cdot \sin(2\pi T) + a_4 \cdot \cos(2\pi T)$
(7)	$a_0 + a_1 \cdot \ln Q + a_2 \cdot \sin(2\pi T) + a_3 \cdot \cos(2\pi T) + a_4 T$
(8)	$a_0 + a_1 \cdot \ln Q + a_2 \cdot \ln Q^2 + a_3 \cdot \sin(2\pi T) + a_4 \cdot \cos(2\pi T) + a_5 T$
(9)	$a_0 + a_1 \cdot \ln Q + a_2 \cdot \ln Q^2 + a_3 \cdot \sin(2\pi T) + a_4 \cdot \cos(2\pi T) + a_5 T + a_6 T^2$

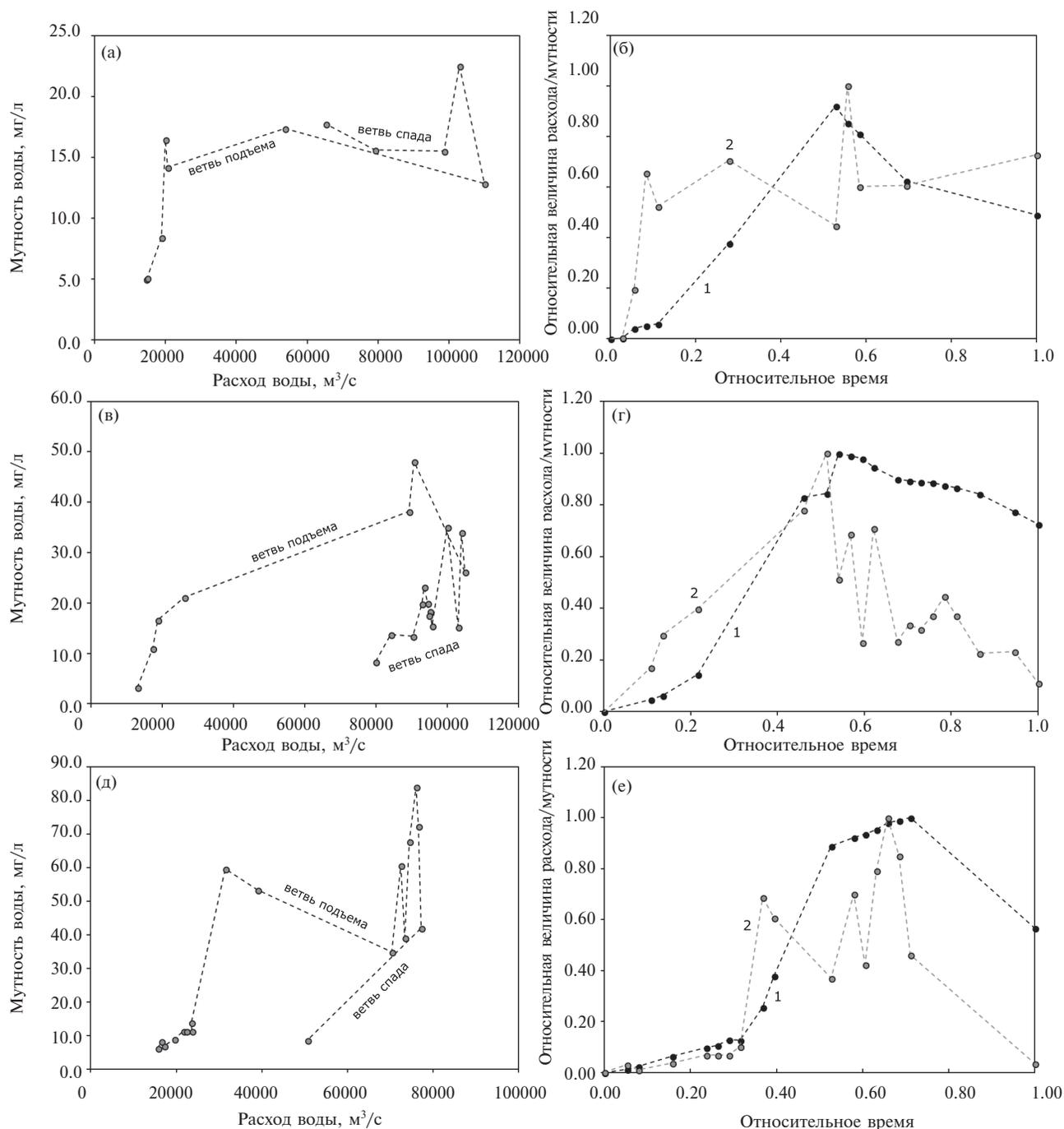
*Примечание.*  $a_{0...n}$  – регрессионные коэффициенты модели;  $T$  – десятичное время.

Расчет стока взвешенных наносов выполнялся для каждого года в отдельности и периода 2014–2016 гг. в целом. Качество использованных моделей анализировалось с помощью графиков отклонений модельных ошибок от нормального распределения. Регрессия ошибок модели по рассчитанным величинам строилась для оценки независимости величины модельной ошибки от их значения.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

*Эффект гистерезиса и источники наносов в период половодья*

Учащенный отбор проб воды позволяет подробно рассмотреть временной ход мутности воды и установить наличие эффекта гистерезиса – неравенства величин мутности при равном расходе воды на петлях подъема и спада



**Рис. 3.** Гистерезисные петли, построенные по полевым материалам 2014 г. (а, б), 2015 г. (в, г) и 2016 г. (д, е), в абсолютных шкалах (а, в, д) и относительных координатах (б, г, е); цифрами обозначены графики хода: 1 – расхода воды, 2 – мутности воды.

половодья. Типизация гистерезисных кривых, или петель, разработана Г.П. Вильямсом [31], и позже дополнена Н.И. Алексеевским [1]. Положительные петли имеют мутность на подъеме половодья больше, чем на спаде; отрицательные – наоборот. Форма гистерезисной петли позволяет судить об источниках поступления наносов [29] и о преобладающих процессах их доставки.

Гистерезисные кривые, построенные по данным 2014–2016 гг., имеют сложную форму, различающуюся от года к году, с несколькими пиками (рис. 3). Типизация кривых следует работам [29, 31]. Петля 2014 г. относится к типу Шс – отрицательная, с резким подъемом, продолжительным “плато” до пика половодья, пиком после максимума расхода и плавным ростом мутности на спаде половодья (см. рис. 3а, б). Для крупных рек Сибири такой тип петель не характерен [29]. Петли 2015 и 2016 гг. похожи и относятся к типу Па – положительные кривые, имеют сложную форму с несколькими пиками на ветви спада (см. рис. 3в–е).

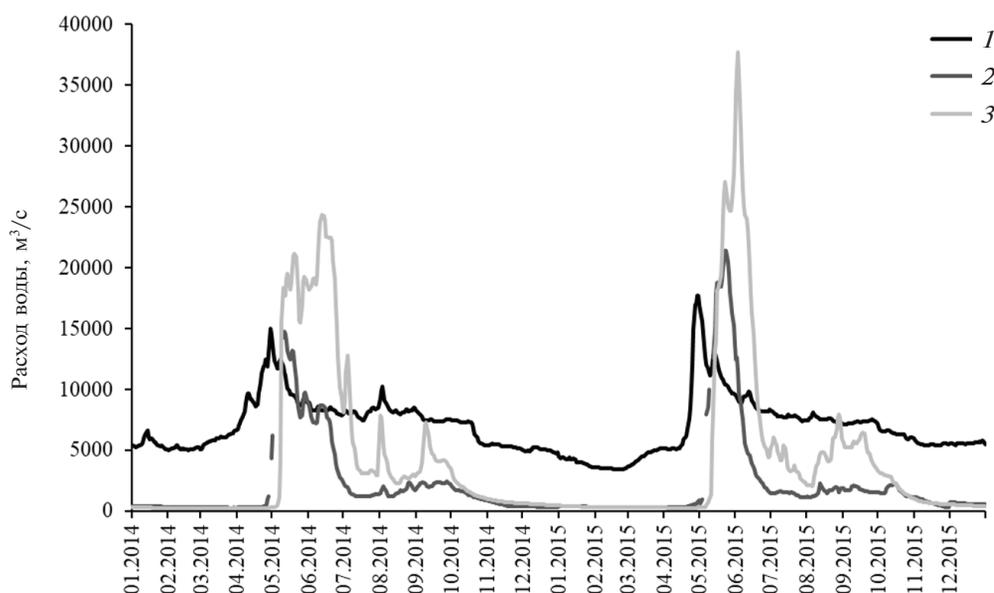
Взвешенные наносы в створе г. Игарка могут происходить: (а) из незарегулированной части бассейнов Енисея и Ангары, ниже водохранилищ Красноярской и Богучанской ГЭС соответственно; (б) из бассейнов притоков в незарегулированной части водосбора, в первую очередь – Подкаменной и Нижней Тунгуски; (в) из русла и берегов Енисея ниже устья Нижней Тунгуски, где появляются аллювиальные острова и русло становится песчано-галечным.

Первый резкий пик мутности наблюдается при увеличении расхода воды свыше

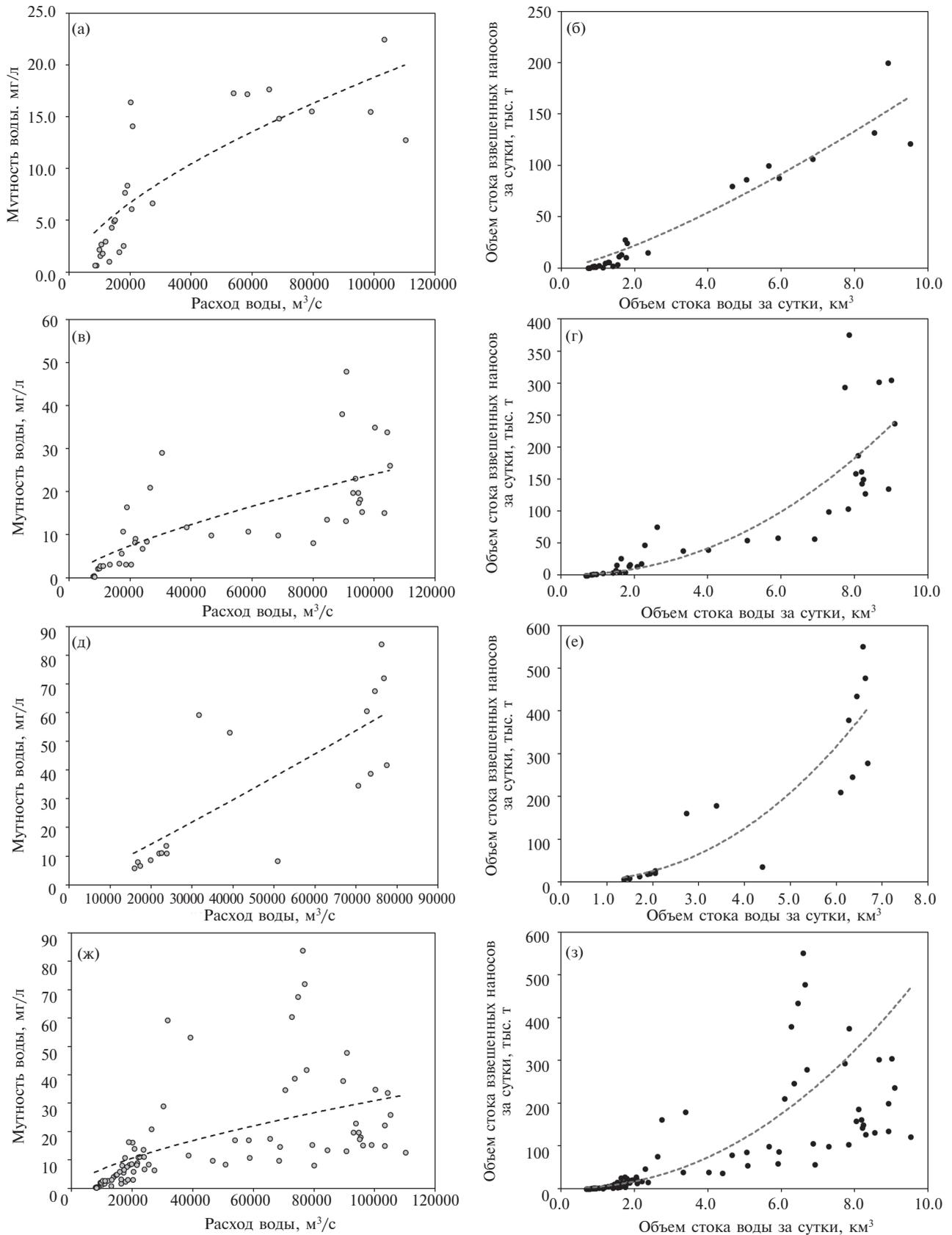
25–35 тыс. м<sup>3</sup>/с, что чаще всего свидетельствует о “пороговом поведении” наносов, начинающих массово взмучиваться лишь при достаточной для этого энергии потока. В это время в реку поступает материал из местных источников [11]; часть наносов поступает из верховий Енисея. Местные источники – в первую очередь, песчаные берега на участке реки от Туруханска до Игарки, отмели в устьях островов, а также “опечки” – крупные аллювиальные массивы в стречневой части русла, типичные для низовьев Енисея. Первыми в начале половодья взмучиваются частицы, отложенные на протяжении зимней межени, затем – значительно более крупный русловой материал. В целом местные источники имеют ограниченный объем и быстро истощаются, и дальнейшее увеличение расхода воды не приводит к росту мутности.

Последующие изменения мутности в Игарке связаны с влиянием притоков и различиями в гидрологических условиях каждого отдельного года (рис. 4), а также характером прохождения волны половодья по притокам и основной реке.

В 2014 г. пик половодья наблюдался в даты, близкие к среднемноголетним, на Енисее в Енисейске (последняя декада апреля) и на Подкаменной Тунгуске (вторая декада мая). В то же время на Нижней Тунгуске половодье было недружным, растянутым; первый пик пришелся на вторую декаду мая, однако максимальный расход воды наблюдался лишь во второй декаде июня. В результате, после истощения местных источников нарастание расхода усиливало эффект разбавления, и далее мутность оставалась практически неизменной. Максимум



**Рис. 4.** Гидрограф р. Енисей в створе г. Енисейск (1), р. Подкаменная Тунгуска – факт. Суломой (2), р. Нижняя Тунгуска – с. Большой Порог (3) за 2014–2015 гг. (по данным АИС ГМВО).



**Рис. 5.** Кривые транспорта наносов, построенные по полевым материалам за 2014 г. (а, б), 2015 г. (в, г), 2016 г. (д, е) и весь период (ж, з), по данным о расходе и мутности воды (а, в, д, ж) и объеме стока воды и наносов за сутки (б, г, е, з).

мутности, по всей видимости, сформирован водами Нижней Тунгуски. Об этом свидетельствует продолжающийся рост мутности воды на спаде половодья в Игарке, когда в низовьях Нижней Тунгуски, в створе Большой Порог, период высокой водности продолжается (см. рис. 3б, 4).

В 2015–2016 гг. последовательные пики мутности на спаде половодья сформированы наложением волн мутности, добегающих по основным притокам или по русловой сети в их бассейнах. Колебания мутности видны в данных суточного разрешения, что говорит либо о кратковременности размывающего воздействия на источники наносов, либо о быстром истощении последних.

### ***Кривые транспорта наносов***

В расчете годового стока взвешенных наносов за период 2014–2016 гг. применялись различные подходы, в той или иной степени опирающиеся на использование кривых транспорта наносов (КТН) [8, 10] – регрессионных связей между величинами ежедневного расхода  $Q$  и измеренной мутности воды  $s$  (рис. 5а, в, д, ж) или объемами стока воды  $W_Q$  и наносов  $W_R$  за сутки (рис. 5б, г, е, з).

Коэффициенты полученных уравнений КТН приведены в табл. 2. Показатель степени в уравнениях, полученных по данным о ежедневном расходе и измеренной мутности воды, в основном меньше единицы, т. е. нарастанию энергии потока не соответствует увеличение количества переносимой им взвеси. Причинами могут быть значительный эффект разбавления, отражающийся в бассейне р. Енисей перехват большей части наносов водохранилищами или малую эрозионную активность на незарегулированной части водосбора, а также горный характер бассейна и небольшое количество аллювия в скальном русле реки.

### ***Сток взвешенных наносов в 2014–2016 гг., рассчитанный по методу КТН***

Годовой объем стока взвешенных наносов методом КТН определялся с помощью различных подходов, рассмотренных детально в разделе “Материалы и методы”; результаты расчета приведены в табл. 3. Разброс полученных оценок велик, и дать характеристику точности каждого из использованных подходов трудно, поскольку каждый из них имеет свои недостатки.

Недостатки метода интерполяции связаны с тем, что его использование опирается на предположение, что наблюденный максимум мутности не был превышен в даты, когда измерения отсутствовали, а мутность между датами измерений изменялась линейно и независимо от расхода воды. Можно считать, что оценка, полученная с применением такого подхода – оценка нижней

границы наиболее вероятного значения годового стока взвешенных наносов.

При использовании только КТН для каждого отдельного года, без интерполяции, в зависимости от изменения расходов между измерениями мутности оценки могут быть занижены (2015 г.) либо завышены (2014 и 2016 гг.). Очевидно также, что оценки, полученные с использованием КТН для всего периода, уравнение (8) в табл. 2, завышены для лет с малой мутностью, 2014 и 2015, и занижены для года с большой мутностью (2016).

Точность расчетов не повышается, если вместо измеренных величин расхода и мутности воды ( $Q$  и  $s$ ) использовать данные об объеме стока воды и наносов ( $W_Q$  и  $W_R$ ). Напротив, расчеты по КТН для периода в целом приводят к еще более существенному, в два раза, завышению оценок в годы с малой мутностью (см. табл. 2). Когда используются уравнения для каждого года по отдельности, годовые оценки и среднее за период схожи с полученными по КТН для ежедневных (измеренных) величин.

Среднегодовой сток взвешенных наносов за период 2014–2016 гг., рассчитанный методом КТН, принят как среднее из значений, полученных методами интерполяции и КТН для каждого года, как наиболее точными (соответствующие строки в табл. 3), и составляет  $7.64 \pm 0.03$  млн т.

### ***Сток взвешенных наносов в 2014–2016 гг., рассчитанный по регрессионным моделям программы LOADEST***

Программа LOADEST разработана для расчета суточного объема стока примесей, включая взвешенные наносы, с использованием девяти встроенных регрессионных моделей (см. табл. 1). На первом этапе оценивалась их эффективность по калибровочному набору данных, т. е. рядом измеренных величин расхода и мутности воды ( $Q$  и  $s$ ), для выбора оптимальной расчетной модели (табл. 4). Выбор затруднен тем, что критерий Акаике  $AIC_c$  чувствителен как к длине ряда, так и к количеству параметров модели. В результате он отдает предпочтение самым простым моделям, которые не всегда отличаются высоким качеством, и “штрафует” более сложные модели. Преимущество последних – использование времени в качестве независимой переменной, и, следовательно, возможный учет эффекта гистерезиса. Очевидно, что для корректного расчета по более сложным моделям необходима и достаточная продолжительность рядов наблюдений.

Выбор модели для каждого года основывался на нескольких соображениях: а) небольшое значение  $AIC_c$ , б) максимальная величина критерия Нэша–Сатклиффа  $NS$ , в) наименьшая возможная сложность (табл. 5). При небольшом различии в значении  $AIC_c$  предпочтение отдавалось

**Таблица 2.** Уравнения кривых транспорта наносов для р. Енисей в створе г. Игарка

Период, год	$n$	Уравнение КТН		№ рисунка
2014	27	$s = 0.01159 Q^{0.642}$	(2)	5а
		$W_R = 8.86 W_Q^{1.3032}$	(3)	5б
2015	40	$s = 0.005451 Q^{0.729}$	(4)	5в
		$W_R = 2.20 W_Q^{2.1242}$	(5)	5г
2016	18	$s = 0.0003786 Q^{1.0634}$	(6)	5д
		$W_R = 5.31 W_Q^{2.282}$	(7)	5е
2014–2016	85	$s = 0.01436 Q^{0.6665}$	(8)	5ж
		$W_R = 19.14 W_Q^{1.1596}$	(9)	5з

**Таблица 3.** Сток взвешенных наносов р. Енисей – г. Игарка, оцененный с использованием кривых транспорта наносов

Расчетный метод	Период, год			
	2014	2015	2016	2014–2016
<i>Годовой сток наносов: уравнения (2), (4), (6), (8) в табл. 2</i>				
Интерполяция + КТН	6.40	7.58	8.12	7.37
КТН для каждого года	6.58	6.26	10.7	7.85
КТН для всего периода	10.6	10.1	6.11	8.94
<b>Среднее</b>	<b>7.86</b>	<b>7.98</b>	<b>8.31</b>	<b>8.05</b>
<i>Годовой сток наносов: уравнения (3), (5), (7), (9) в табл. 2</i>				
Интерполяция + КТН	6.96	7.14	8.12	7.41
КТН для каждого года	7.84	6.29	9.67	7.93
КТН для всего периода	14.3	13.9	10.2	12.8
<b>Среднее</b>	<b>9.70</b>	<b>9.11</b>	<b>9.33</b>	<b>9.38</b>

**Таблица 4.** Критерии эффективности регрессионных моделей LOADEST

№ модели	Критерий Акаике $AICc$				Критерий Нэша–Сатклиффа $NS$			
	2014 г.	2015 г.	2016 г.	2014–2016 гг.	2014 г.	2015 г.	2016 г.	2014–2016 гг.
1	2.05	2.20	1.97	2.25	0.32	0.60	0.80	0.20
2	1.93	2.00	2.63	1.90	0.92	0.69	0.79	0.56
3	2.40	2.36	2.36	2.18	0.27	0.65	0.75	0.58
4	2.97	2.51	3.09	2.35	0.61	0.68	0.78	0.39
5	2.39	2.33	2.95	1.96	0.93	0.70	0.69	0.68
6	3.18	2.64	4.56	2.07	0.91	0.72	0.71	0.59
7	3.86	3.05	4.63	2.41	0.59	0.67	0.85	0.64
8	4.36	3.28	6.23	2.25	0.91	0.75	0.87	0.69
9	5.78	4.08	9.08	2.57	0.89	0.75	0.87	0.73

модели с наибольшим  $NS$ , а при незначительной разнице в  $NS$  – более сложной модели.

Значения критерия Нэша–Сатклиффа  $NS$ , большие 0.75 для всех моделей, говорят об удовлетворительной точности расчета. Модельные ошибки распределены по нормальному закону (см. рис. 5а, в, д, ж), кроме 2016 г. с тяжелым “хвостом” в левой части графика, где расчетная величина сильно завышена, равномерно (см. рис. 5б, г, е, з). Здесь нужно отметить,

что модельные ошибки распределены равномерно лишь относительно логарифма расчетной величины; при обратном пересчете в абсолютные значения ошибка будет возрастать с увеличением мутности/объема стока.

Среднегодовой сток взвешенных наносов за 2014–2016 гг., определенный с использованием LOADEST, составляет  $8.6 \pm 0.16$  млн т и равен среднему из значений для каждого года и для периода в целом.

**Таблица 5.** Сток взвешенных наносов р. Енисей – г. Игарка, расчет в LOADEST

Период, год	Модель	$AICc$	$NS$	$W_R$ , млн т
2014	5	2.39	0.92	7.69
2015	6	2.64	0.72	7.89
2016	2	2.63	0.79	10.7
<b>Среднее</b>				<b>8.76</b>
2014–2016	9	2.57	0.73	25.3
<b>Среднее</b>				<b>8.44</b>

### **Сравнение результатов методов КТН и LOADEST**

По результатам проведенных исследований, оценки, полученные с использованием двух различных методов – кривых транспорта наносов и LOADEST, в итоге оказались относительно близки между собой. На нижней границе возможных значений стока взвешенных наносов, от 7.4 до 7.9 млн т, оказываются величины, полученные методом кривых транспорта наносов по данным отдельных лет (см. табл. 3). На верхней границе, от 8.9 до 12.8 млн т, находятся оценки, полученные по КТН для всего периода 2014–2016 гг., построенным по данным о суточном объеме стока воды и наносов. Результаты расчета – от 8.4 до 8.9 млн т – занимают в этом диапазоне среднее положение.

Исходя из полученных результатов, использованные методы можно считать взаимозаменяемыми при среднемноголетних расчетах. Следует в то же время учитывать различия между ними, вследствие которых в разных ситуациях тот или иной метод оказывается предпочтительнее. При наличии достаточного количества данных для каждого конкретного года, особенно для периода половодья, целесообразно использовать интерполяционный метод [6] в сочетании с кривой транспорта наносов для этого года. Только таким способом можно получить достоверную оценку стока взвешенных наносов для отдельного года; прочие методы можно использовать только для определения средней за период величины  $W_R$ .

В случае если невозможно для каждого года построить кривую транспорта наносов, например при малом количестве измерений мутности в каждом из лет наблюдений, предпочтительно использовать весь имеющийся ряд данных как калибровочный для построения регрессионной модели в LOADEST. Межгодовую изменчивость при этом, скорее всего, оценить не удастся, и достаточно точная оценка будет получена лишь для среднемноголетней величины годового стока взвешенных наносов.

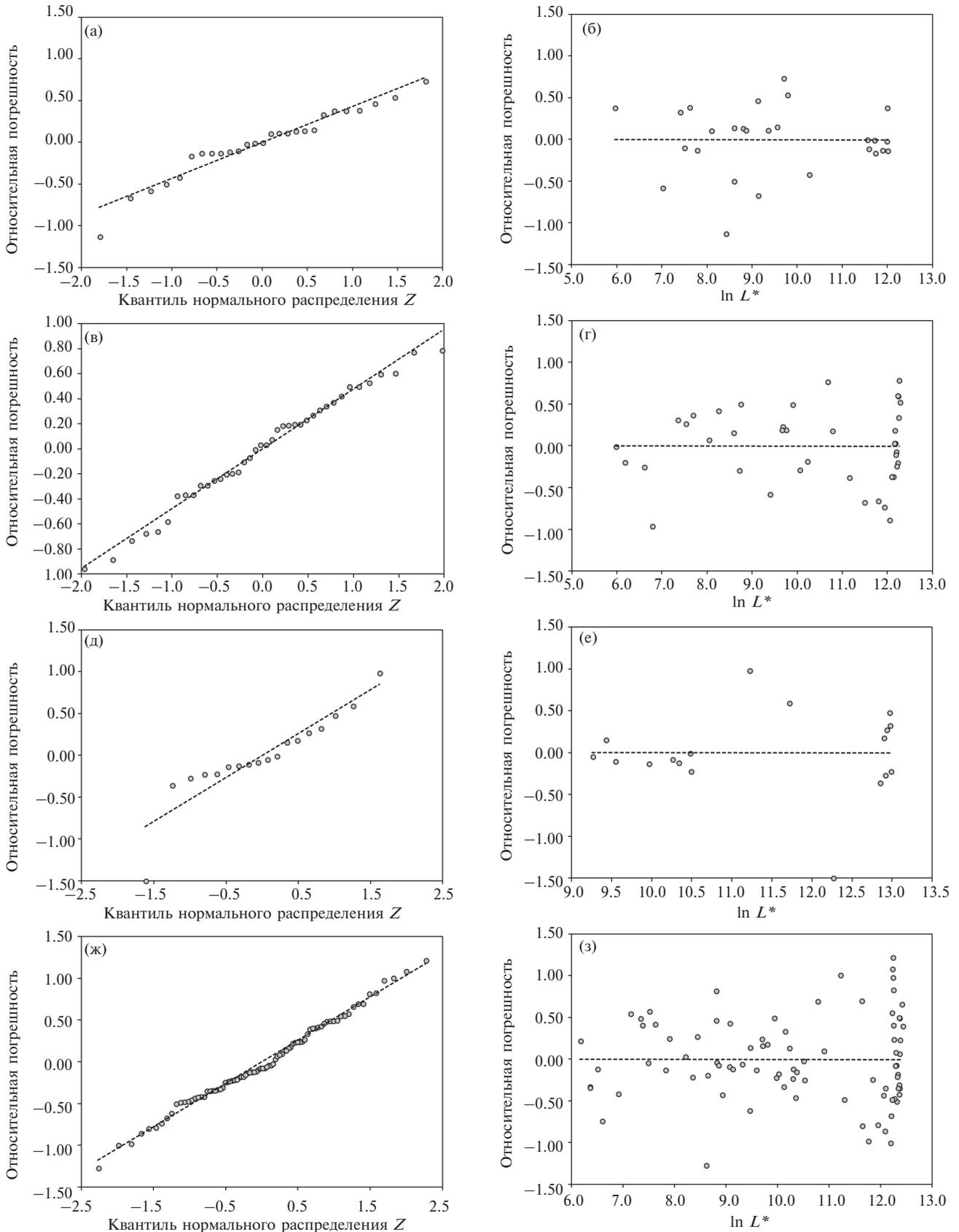
Объективно оба метода опираются на схожие принципы регрессионного анализа, однако LOADEST позволяет использовать больший набор предикторов, в том числе время, что необходимо для учета гистерезисных эффектов. Кроме того, большое его преимущество – автоматический расчет сопутствующих статистических показателей, характеристик качества модели. Однако надо учитывать, что качество модели с большим количеством параметров зависит от детальности исходных данных.

Среднегодовой сток взвешенных наносов р. Енисей в створе г. Игарка в 2014–2016 гг. по результатам данного исследования равен **8.1 ± 0.5 млн т**, как среднее из величин, определенных двумя методами: кривых транспорта наносов (7.6 млн т) и регрессионных моделей из программы LOADEST (8.6 млн т). Суммарный вынос взвешенного материала за этот период находится в интервале **24.2 ± 2.1 млн т**.

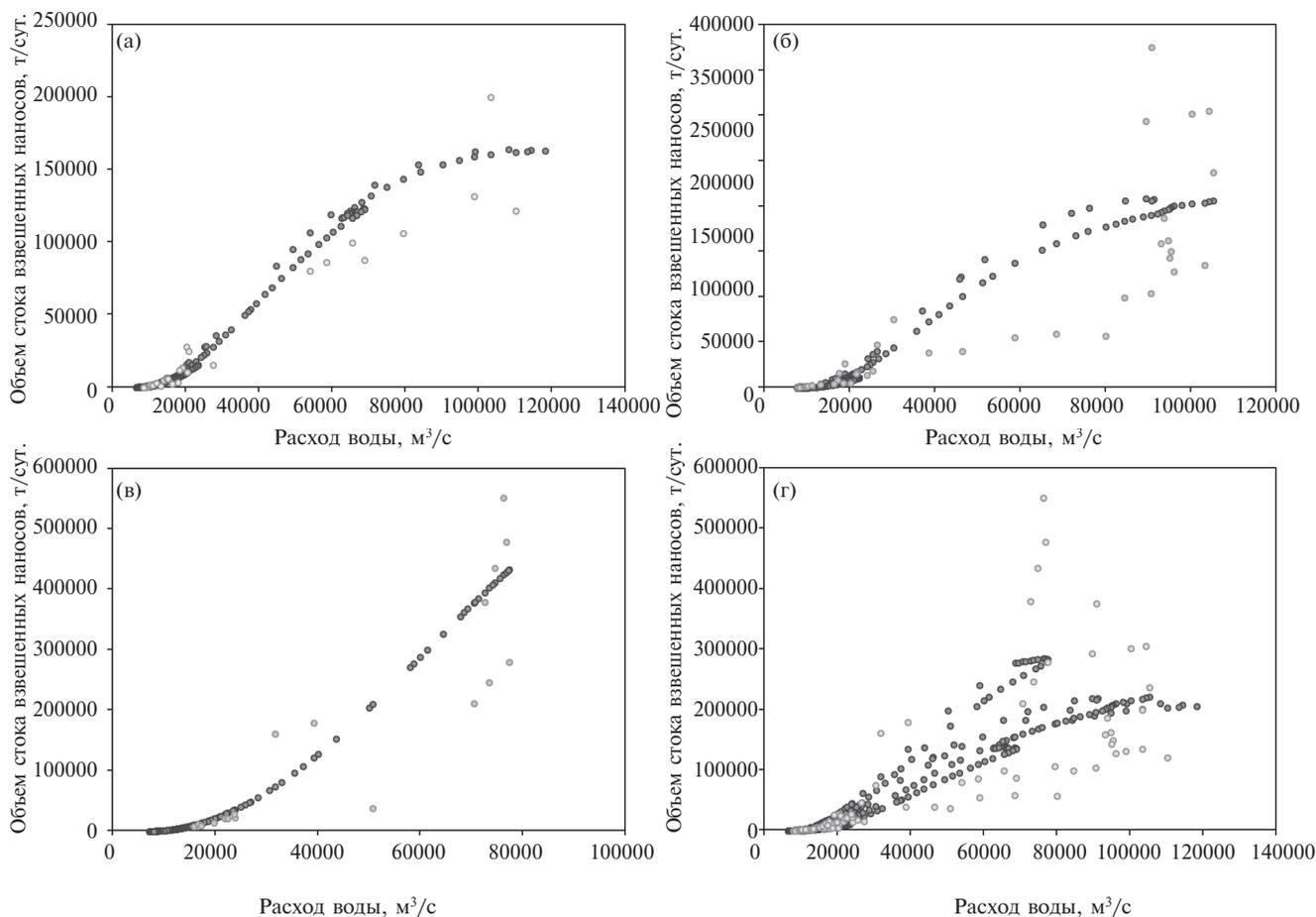
### **Сравнение результатов с материалами сетевых наблюдений**

Сведения об измеренных величинах мутности воды и расходах взвешенных наносов публиковались в Гидрологических ежегодниках до середины 1970-х годов. Современные официальные публикации Росгидромета содержат лишь сведения о среднедекадной мутности воды. Эти опубликованные величины также можно использовать для расчета годового стока взвешенных наносов.

Среднедекадная мутность воды р. Енисей в створе г.п. Игарка опубликована на сайте АИС ГМВО за 2015 и 2016 гг. Для расчета годового стока взвешенных наносов с использованием этих данных средняя мутность за декаду умножалась на среднедекадный расход воды и соответствующее количество дней. Годовой сток наносов в 2015 г. составил 2.59 млн т, в 2016 г. – 1.22 млн т, что значительно меньше приведенных выше оценок. При этом, рассчитанный годовой сток в 2016 г. почти в два раза



**Рис. 6.** Графики отклонения модельных ошибок от нормального распределения (а, в, д, ж), зависимость модельной погрешности от логарифма рассчитанного суточного стока взвешенных наносов  $L^*$  (б, г, е, з), для каждого года и всего периода.



**Рис. 7.** Суточный объем стока взвешенных наносов, рассчитанный в программе LOADEST, и соответствующие наблюдаемые значения для 2014 (а), 2015 (б), 2016 (в) годов, и для периода 2014–2016 гг. в целом (г).

меньше, чем в 2015 г., хотя большинство методов дают для этих лет противоположный результат. Единственное исключение – кривая транспорта наносов для всего периода 2014–2016 гг. (см. табл. 3). На основании этого можно предполагать, что опубликованная среднедекадная мутность определена не по данным прямых наблюдений, а косвенно, с привлечением интерполяционных методов и данных прошлых лет.

#### *Сравнение результатов с литературными данными*

Полученная оценка среднегодового стока взвешенных наносов Енисея в Игарке за период 2014–2016 гг., от 7.6 до 8.6 млн т, превышает ранее опубликованные оценки для многолетнего периода (с 1970 по 2001 г.), от 4.6 до 5.9 млн т [4, 13], более чем в полтора раза. Маловероятно, что такие различия в стоке наносов связаны с изменением водности реки, поскольку период 2014–2016 гг. не относится к многоводным. Среднегодовой объем стока равен  $578 \text{ км}^3$ , что меньше, чем норма стока за 1970–2001 гг. –  $596 \text{ км}^3$ . Максимальные расхо-

ды в период с 2014 по 2016 г. также были меньше средних за предыдущий период.

Прямое сопоставление полученных оценок с литературными затруднительно из-за малой продолжительности современного ряда, а также различной степени воздействия антропогенного фактора на речной поток и водосбор. Возможных причин расхождения вновь полученных оценок стока взвешенного вещества с литературными данными несколько.

Во-первых, полученная нами оценка основана на материалах детального пробоотбора. Пробы воды для определения мутности в половодье отбирались почти ежедневно, в том числе близко к пику половодья, когда этому не мешали ледовые условия на реке. Сток взвешенных наносов в створе г. Игарка в период высокой водности составляет от 60 до 70% от годового. Учащенный отбор проб воды позволяет точнее оценивать изменение мутности в эту фазу водного режима и значительно уточнить имеющиеся оценки стока наносов.

Во-вторых, нельзя исключать, что увеличение стока взвешенных наносов связано с акти-

визацией добычи золота в Северо-Енисейском районе Красноярского края (месторождения Олимпиада, Благодатное, Новое Калами и др.), в нижней части бассейна Подкаменной Тунгуски. Красноярский край занимает первое место в России по объемам золотодобычи, а рудник Олимпиада входит в десятку крупнейших золотых рудников в мире. При нарушении горными работами криолитозоны мутность воды водотоков резко возрастает по сравнению с фоновыми значениями и может достигать  $15\text{--}20 \text{ кг/м}^3$  в период паводков [3].

В-третьих, к увеличению мутности может приводить активизация флювиальных и криогенных процессов, следующая за деградацией многолетнемерзлых пород [16, 28]. В наибольшей степени этот фактор влияет на левобережные притоки Енисея, находящиеся на границе между зонами сплошного и массивно-островного распространения многолетнемерзлых пород.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе выполнен анализ базы данных учащенных измерений мутности воды в период открытой воды 2014–2016 гг. на р. Енисей в створе г. Игарка. Форма гистерезисных кривых связи расхода и мутности говорит о преобладании вклада локальных источников наносов на подъеме половодья в низовьях Енисея и о наложении нескольких волн мутности, соответствующих пикам половодья на основных притоках, Нижней и Подкаменной Тунгуске, в период его спада.

Совместное использование метода кривых транспорта наносов и программы LOADEST позволяет заключить, что среднегодовой сток взвешенных наносов р. Енисей в створе г.п. Игарка в период 2014–2016 гг. составил  $8.1 \pm 0.5$  млн т, что превышает ранее опубликованные оценки более чем в половину. Суммарный вынос взвеси за этот период принимаем равным  $24.2 \pm 2.1$  млн т. Детальный пробоотбор во время прохождения пика половодья делает полученные нами результаты уникальными по временному разрешению и точности.

### ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, проект № 18-05-60240. Полевые исследования проводились в рамках международного проекта TOMCAR-Permafrost (проект № 277059 7-й Рамочной программы ЕС).

### FUNDING

The study was financially supported by the grant received from the RFBR, no. 18-05-60240. Field campaigns were funded within the EU

7th Framework Programme Project TOMCAR-Permafrost, no. 277059.

### БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарят водителя А.И. Пимова, техника Н.Л. Коневши и коллектив Игарской геокриологической лаборатории (ИГЛ) ИМЗ СО РАН. В полевых выездах также принимали участие П.В. Карась, а также сотрудник EcoLab Лор Гандуа. Лабораторные работы частично выполнялись канд. геогр. наук, с.н.с. Л.А. Духовой в Лаборатории гидрохимии ВНИРО. Гидрологические данные предоставлены отделом гидрологии Среднесибирского УГМС, сотрудникам которого авторы приносят свои благодарности.

### ACKNOWLEDGEMENTS

The authors are grateful to Anatoly Pimov, Nikolay Konevshi, and all team of Igarka Geocryology Laboratory. Sergey Dudarek and Petr Karas', as well as our ECOLAB colleague Dr. Laure Gandois, also assisted in the field researches. Laboratory analyses were partly performed by Lyudmila Dukhova at All-Russian Fisheries and Oceanography Institute (Moscow, Russia).

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Алексеевский Н.И.* Формирование и движение речных наносов. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1998. 202 с.
2. *Алексеевский Н.И.* Концепция геостока и состояние малых рек // Эрозионные и русловые процессы. Вып. 13 / ред. Р.С. Чалов. М.: Изд-во Моск. ун-та, 2000. С. 68–77.
3. *Алексеевский Н.И., Власов Б.Н., Доронин Ю.П., Сидорчук А.Ю., Царев В.А.* Влияние горных работ на сток наносов в бассейнах рек Омоля и Яны и на шельфе моря Лаптевых // Рациональное природопользование в криолитозоне / отв. ред. В.Т. Балобаев. М.: Наука, 1992. С. 68–77.
4. *Магрицкий Д.В.* Годовой сток взвешенных наносов российских рек водосбора Северного Ледовитого океана и его антропогенные изменения // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. География. 2010. № 6. С. 17–24.
5. *Михайлов В.Н.* Гидрология устьев рек. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1998. 176 с.
6. Наставление гидрометеорологическим станциям и постам. Вып. 6. Ч. I. Гидрологические наблюдения на больших и средних реках. Л.: Гидрометеоиздат, 1978. 78 с.
7. *Тананаев Н.И.* Эффект гистерезиса в сезонной изменчивости соотношения расхода и мутности воды рек криолитозоны Сибири и Дальнего Востока // Водные ресурсы. 2012. Т. 39. № 6. С. 648–656.

8. Тананаев Н.И. Использование регрессионного анализа в расчетах стока взвешенных наносов: особенности метода // Водные ресурсы. Т. 40. № 6. С. 585–592.
9. Тананаев Н.И., Лебедева Л.С. Органическая составляющая взвешенного вещества малых рек тундрово-таежной зоны Енисейского Севера в летне-осенний период // География и природные ресурсы. 2018. № 2. С. 140–147.
10. Asselman N.E.M. Fitting and interpretation of sediment rating curves // J. Hydrol. 2000. V. 234. P. 228–248.
11. Bogen J. The hysteresis effect of sediment transport system // Norwegian J. of Geography. 1980. V. 34. № 1. P. 45–54.
12. Cohn T.A., DeLong L.L., Gilroy E.J., Hirsch R.M., Wells D.K. Estimating constituent loads // Water Res. Research. 1989. V. 25. P. 937–942.
13. Gordeev V.V. Fluvial sediment flux to the Arctic Ocean // Geomorphology. 2006. V. 80. P. 94–104. DOI: 10.1016/j.geomorph.2005.09.008
14. Horowitz A.J., Elrick K.A., Smith J.J. Estimating suspended sediment and trace element fluxes in large river basins: methodological considerations as applied to the NASQAN programme // Hydrol. Process. 2001. V. 17. P. 1107–1132. DOI: 10.1002/hyp.206
15. Horowitz A.J., Stephens V.C., Elrick K.A., Smith J.J. Concentrations and annual fluxes of sediment-associated chemical constituents from conterminous US coastal rivers using bed sediment data // Hydrol. Process. 2012. V. 26. P. 1090–1114. DOI: 10.1002/hyp.8437
16. Kokelj S.V., Lacelle D., Lantz T.C., Tunnicliffe J., Malone L., Clark I.D., Chin K.S. Thawing of massive ground ice in mega slumps drives increases in stream sediment and solute flux across a range of watershed scales // J. Geophys. Res.: Earth Surface. 2013. V. 118. P. 681–692. DOI: 10.1002/jgrf.20063
17. LOADEST: Load Estimator. USGS. 2013. <http://water.usgs.gov/software/loadest>
18. Lloyd C.E.M., Freer J.E., Johnes P.J., Collins A.L. Technical note: Testing an improved index for analysing storm discharge–concentration hysteresis // Hydrol. Earth System Sci. 2016. V. 20. P. 625–632. DOI: 10.5194/hess-20-625-2016
19. Lobbes J., Fitznar H., Kattner G. Biogeochemical characteristics of dissolved and particulate organic matter in Russian rivers entering the Arctic ocean // Geochimica et Cosmochimica Acta. 2000. V. 64. P. 2973–2983.
20. McClelland J.W., Holmes R.M., Peterson B.J., Raymond P.A., Striegl R.G., Zhulidov A.V., Zimov S.A., Zimov N., Tank S.E., Spencer R.G.M., Staples R., Gurtovaya T.Y., Griffin C.G. Particulate organic carbon and nitrogen export from major Arctic rivers // Global Biogeochem. Cycles. 2016. V. 30. P. 629–643. DOI: 10.1002/2015GB005351
21. Nash J.E., Sutcliffe J.V. River flow forecasting through conceptual models. Part I. A discussion of principles // J. Hydrol. 1970. V. 10. P. 282–290.
22. Nummelin A., Ilicak M., Li C., Smedsrud L.H. Consequences of future increased Arctic runoff on Arctic ocean stratification. Circulation. And sea ice cover // J. Geophys. Res.: Oceans. 2016. V. 121. P. 617–637. DOI: 10.1029/2015JC011156
23. Opsahl S., Benner R., Amon R.M.W. Major flux of terrigenous organic matter through the Arctic Ocean // Limnology and Oceanography. 1999. V. 44. P. 2017–2023. DOI: 10.4319/lo.1999.44.8.2017
24. Peterson B.J., Holmes R.M., McClelland J.W., Vorosmarty C.J., Lammers R.B., Shiklomanov A.I., Shiklomanov I.A., Rahmstorf S. Increasing river discharge to the Arctic Ocean // Sci. 2002. V. 298. P. 2171–2173.
25. Rstudio (2015). Integrated Development Environment for R (Ver. 0.99.489). USA, Boston. 2015.
26. Runkel R.L., Crawford C.G., Cohn T.A. Load Estimator (LOADEST): A FORTRAN program for estimating constituent loads in streams and rivers // USGS Techniques and Methods Book 4. Chapter A5. Reston: USGS Publ., 2004. 75 p.
27. St. Jacques J.-M., Sauchyn D.J. Increasing winter baseflow and mean annual streamflow from possible permafrost thawing in the Northwest Territories, Canada // Geophys. Res. Lett. V. 36. L01401. DOI: 10.1029/2008GL035822
28. Syvitski J.P.M. Sediment discharge variability in Arctic rivers: implications for a warmer future // Polar Res. 2006. V. 21. P. 323–330. DOI: 10.1111/j.1751-8369.2002.tb00087.x
29. Tananaev N.I. Hysteresis effects of suspended sediment transport in relation to geomorphic conditions and dominant sediment sources in medium and large rivers of the Russian Arctic // Hydrol. Res. 2015. V. 46.2. P. 232–243. DOI: 10.2166/nh.2013.199
30. Tananaev N.I., Makarieva O.M., Lebedeva L.S. Trends in annual and extreme flows in the Lena River basin, Northern Eurasia // Geophys. Res. Lett. 2016. V. 43. № 20. P. 10 764–10 772. DOI: 10.1002/2016GL070796
31. Williams G.P. Sediment concentration versus water discharge during single hydrologic events in rivers // J. of Hydrol. 1989. № 111. P. 89–106. DOI: 10.1016/0022-1694(89)90254-0

## REFERENCES

1. Alekseevsky N.I. *Formirovanie i dvizhenie rechnykh nanosov* [Origin and Transfer of Riverine Sediments]. Moscow: Mosk. Gos. Univ., 1998. 202 p.
2. Alekseevsky N.I. The concept of geoflux and the state of small rivers. *Eroziionnye i Ruslovyye Protsestry*, 2000, no. 13, pp. 68–77. (In Russ.).
3. Alekseevsky N.I., Vlasov B.N., Doronin Yu.P., Sidorchuk A.Yu., Tsarev V.A. The influence of mining on the sediment flux of rivers in the Omoloy and the Yana River basins and on the Laptev sea shelf. In *Ratsional'noe prirodopol'zovanie v kriolitozone* [Environmental Management in Permafrost]. Moscow: Nauka Publ., 1992, pp. 68–77. (In Russ.).
4. Magritsky D.V. Annual suspended matter flow of the Russian rivers belonging to the Arctic ocean basin and its anthropogenic transformation. *Vestn. Mosk. Univ., Ser. 5: Geogr.*, 2010, no. 6, pp. 17–24. (In Russ.).

5. Mikhailov V.N. *Gidrologiya ust'ev rek* [River Mouths' Hydrology]. Moscow: Mosk. Gos. Univ., 1998. 176 p.
6. *Gidrologicheskie nablyudeniya na bol'shikh i srednikh rekakh* [Hydrological Monitoring on Large and Medium-sized Rivers], no. 6 of *Nastavlenie gidrologicheskim stantsiyam i postam* [Instruction to Hydrological Stations and Gauges]. Leningrad: Gidrometeoizdat Publ., 1978, part 1. 78 p.
7. Tananaev N.I. Hysteresis effect in the seasonal variations in the relationship between water discharge and suspended load in rivers of permafrost zone in Siberia and Far East. *Water Resour.*, 2012, vol. 39, no. 6, pp. 648–656.
8. Tananaev N.I. Applying regression analysis to calculating suspended sediment runoff: Specific features of the method. *Water Resour.*, 2013, vol. 40, no. 6, pp. 585–592.
9. Tananaev N.I., Lebedeva L.S. The organic component of particulate matter in small streams of the Northern Yenisey region during the summer-autumn period. *Geogr. Nat. Resour.*, 2018, vol. 39, no. 2, pp. 140–147.
10. Asselman N.E.M. Fitting and interpretation of sediment rating curves. *J. Hydrol.*, 2000, vol. 234, no. 3–4, pp. 228–248.
11. Bogen J. The hysteresis effect of sediment transport system. *Nor. J. Geogr.*, 1980, vol. 34, no. 1, pp. 45–54.
12. Cohn T.A., DeLong L.L., Gilroy E.J., Hirsch R.M., Wells D.K. Estimating constituent loads. *Water Resour. Res.*, 1989, vol. 25, no. 5, pp. 937–942.
13. Gordeev V.V. Fluvial sediment flux to the Arctic Ocean. *Geomorphology*, 2006, vol. 80, no. 1–2, pp. 94–104. doi: 10.1016/j.geomorph.2005.09.008
14. Horowitz A.J., Elrick K.A., Smith J.J. Estimating suspended sediment and trace element fluxes in large river basins: methodological considerations as applied to the NASQAN programme. *Hydrol. Process.*, 2001, vol. 5, no. 17, pp. 1107–1132. doi: 10.1002/hyp.206
15. Horowitz A.J., Stephens V.C., Elrick K.A., Smith J.J. Concentrations and annual fluxes of sediment-associated chemical constituents from conterminous US coastal rivers using bed sediment data. *Hydrol. Process.*, 2012, vol. 26, no. 7, pp. 1090–1114. doi:10.1002/hyp.8437
16. Kokelj S.V., Lacelle D., Lantz T.C., Tunnicliffe J., Malone L., Clark I.D., Chin K.S. Thawing of massive ground ice in mega slumps drives increases in stream sediment and solute flux across a range of watershed scales. *J. Geophys. Res. Earth Surf.*, 2013, vol. 118, no. 2, pp. 681–692. doi: 10.1002/jgrf.20063
17. LOADEST: Load Estimator. USGS. 2013. Available at: <https://water.usgs.gov/software/loadest/> (accessed: 29.05.2019).
18. Lloyd C.E.M., Freer J.E., Johnes P.J., Collins A.L. Technical note: Testing an improved index for analysing storm discharge–concentration hysteresis. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 2016, vol. 20, no. 2, pp. 625–632. doi: 10.5194/hess-20-625-2016
19. Lobbes J., Fitznar H., Kattner G. Biogeochemical characteristics of dissolved and particulate organic matter in Russian rivers entering the Arctic ocean. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 2000, vol. 64, no. 17, pp. 2973–2983.
20. McClelland J.W., Holmes R.M., Peterson B.J., Raymond P.A., Striegl R.G., Zhulidov A.V., Zimov S.A., Zimov N., Tank S.E., Spencer R.G.M., Staples R., Gurtovaya T.Y., Griffin C.G. Particulate organic carbon and nitrogen export from major Arctic rivers. *Global Biogeochem. Cycles*, 2016, vol. 30, no. 5, pp. 629–643. doi: 10.1002/2015GB005351
21. Nash J.E., Sutcliffe J.V. River flow forecasting through conceptual models. Part I — A discussion of principles. *J. Hydrol.*, 1970, vol. 10, no. 3, pp. 282–290.
22. Nummelin A., Ilicak M., Li C., Smedsrud L.H. Consequences of future increased Arctic runoff on Arctic ocean stratification, circulation, and sea ice cover. *J. Geophys. Res. Oceans*, 2016, vol. 121, pp. 617–637. doi: 10.1029/2015JC011156
23. Opsahl S., Benner R., Amon R.M.W. Major flux of terrigenous organic matter through the Arctic Ocean. *Limnol. Oceanogr.*, 1999, vol. 44, no. 8, pp. 2017–2023. doi: 10.4319/lo.1999.44.8.2017
24. Peterson B.J., Holmes R.M., McClelland J.W., Vorosmarty C.J., Lammers R.B., Shiklomanov A.I., Shiklomanov I.A., Rahmstorf S. Increasing river discharge to the Arctic Ocean. *Science*, 2002, vol. 298, no. 5601, pp. 2171–2173.
25. RStudio Team. RStudio: Integrated Development Environment for R. Version 0.99.489. Boston, MA: RStudio, Inc., 2015. Available at: <http://www.rstudio.com/> (accessed: 29.05.2019).
26. Runkel R.L., Crawford C.G., Cohn T.A. *Load Estimator (LOADEST): A FORTRAN program for estimating constituent loads in streams and rivers*. Reston, VA, USA: USGS, 2004. 75 p. doi: 10.3133/tm4A5
27. St. Jacques J.-M., Sauchyn D.J. Increasing winter baseflow and mean annual streamflow from possible permafrost thawing in the Northwest Territories, Canada. *Geophys. Res. Lett.*, vol. 36, no. 1, L01401. doi: 10.1029/2008GL035822
28. Syvitski J.P.M. Sediment discharge variability in Arctic rivers: implications for a warmer future. *Polar Res.*, 2006, vol. 21, no. 2, pp. 323–330. doi: 10.1111/j.1751-8369.2002.tb00087.x
29. Tananaev N.I. Hysteresis effects of suspended sediment transport in relation to geomorphic conditions and dominant sediment sources in medium and large rivers of the Russian Arctic. *Hydrol. Res.*, 2015, vol. 46, no. 2, pp. 232–243. doi: 10.2166/nh.2013.199
30. Tananaev N.I., Makarieva O.M., Lebedeva L.S. Trends in annual and extreme flows in the Lena River basin, Northern Eurasia. *Geophys. Res. Lett.*, vol. 43, no. 20, pp. 10 764–10 772. doi: 10.1002/2016GL070796
31. Williams G.P. Sediment concentration versus water discharge during single hydrologic events in rivers. *J. Hydrol.*, 1989, vol. 111, no. 1–4, pp. 89–106. doi: 10.1016/0022-1694(89)90254-0

## Annual Suspended Sediment Load of the Yenisei River

N. I. Tananaev<sup>1, 2, \*</sup>, R. Teisserenc<sup>2</sup>, and T. Le Dantec<sup>2</sup>

<sup>1</sup> *Melnikov Permafrost Institute, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, Yakutsk, Russia*

<sup>2</sup> *EcoLab, Universite de Toulouse, CNRS, Toulouse, France*

*\*e-mail: TananaevNI@mpi.ysn.ru*

Received June 9, 2018; revised December 3, 2018; accepted July 19, 2019

Field studies, including high-frequency sampling for suspended sediment flux estimation, were conducted in 2014–2016 in the city of Igarka, at the outlet of the Yenisei River. During spring freshet of each year, multiple suspended sediment concentration (SSC) peaks were observed, unrelated to water discharge fluctuations. The form of hysteresis loops evidences the importance of input from local in-channel sediment sources, i.e. banks and bedforms, and scouring of bed material, deposited during winter, in observed sharp SSC peaks. On the falling stage of the freshet, longer peaks are related to sediment waves from major tributaries, notably the Nizhnyaya Tunguska River. Annual sediment load was calculated based on the daily water discharge and observed SSC data, using sediment rating curves and LOADEST models as two reference methods. Mean annual suspended sediment load of the Yenisei River in Igarka is estimated at  $8.1 \pm 0.5$  mln t., which significantly exceeds previously published values for the 1970–2001 period, from 4.6 to 5.9 mln t. Cumulative sediment load for 2014–2016 totals  $24.2 \pm 2.1$  mln t.

**Keywords:** suspended sediment flux, hysteresis effect, Yenisey River, Igarka, Russian Arctic, sediment rating curve, regression analysis.

**DOI:** <https://doi.org/10.31857/S2587-55662019668-82>