
УДК 556.16:504.064(282.256.82)

ПРИРОДНО-АНТРОПОГЕННЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ СТОКА НАНОСОВ РЕК В БАСЕЙНЕ ИНДИГИРКИ

© 2025 г. Д.В. Магрицкий*, Д.И. Школьный, П.Г. Илюшина

Географический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия

**E-mail: magdima@yandex.ru*

Поступила в редакцию 17.04.2025 г.

После доработки 09.07.2025 г.

Принята к публикации 25.07.2025 г.

С 1990-х гг. в бассейне р. Индигирка существенно изменились климатические условия формирования стока и состояние многолетнемерзлых пород, установлено увеличение водности и температуры воды рек — на 20% (и менее) и на 0.5–1°C. Несмотря на это, сток взвешенных наносов в 1990–2000-е гг. уменьшился на 6–33%, и лишь с середины–конца 2000-х гг. наблюдается его резкое увеличение (вплоть до величин 50–220%). К отсутствию первоначальной положительной динамики могли привести в том числе негативные процессы в горнодобывающей отрасли и в системе гидрологического мониторинга. Поэтому задачами исследования стали анализ первичной гидрологической информации, многолетней динамики расходов воды и наносов, температуры воды рек в бассейне Индигирки, особенностей развития местной добычи полезных ископаемых, оценка вклада в многолетнюю изменчивость стока наносов антропогенных и естественных факторов. Исходными данными послужили материалы 22 постов, разновременные спутниковые снимки, разнообразные данные по горнодобывающей отрасли. Определены реки и районы бассейна, находящиеся под воздействием горнодобычи, обоснованы аналитические связи между годовым стоком наносов и его гидрологическими факторами. Установлено, что негативные процессы в горнодобывающей отрасли на рубеже XX и XXI вв. объясняют менее 20–40% уменьшения стока наносов, остальное обусловлено естественными гидрологическими изменениями. Последующий “взрывной” рост стока наносов обеспечили как гидрометеорологические, так и антропогенные факторы. Впервые проведен комплексный анализ достоверности данных стационарных наблюдений; создана геоинформационная база разрабатываемых месторождений и нарушенных пойменно-русловых комплексов.

Ключевые слова: река, пост, мониторинг, сток воды и наносов, добыча полезных ископаемых, многолетние изменения

DOI: 10.31857/S0869607125030091, EDN: LTYNVT

Введение

Извлечение полезных ископаемых из недр Земли (открытым или подземным способами), их первичная обработка и получение концентрата (далее — *горная добыча*, или *горнодобыча*, *недропользование*) наряду с эксплуатацией водохранилищ и распашкой водосборов служит мощным антропогенным фактором нарушения естественного режима стока наносов рек. В отличие от водохранилищ, горнодобыча увеличивает сток наносов за счет: 1) сброса в реки технологических (сточных) вод,

сильно насыщенных взвесями; 2) выбросов взвесей в атмосферу во время взрывных работ и работы самосвалов в карьерах, с последующим выпадением из воздуха в реки; 3) разрушения почвенно-растительного покрова, на восстановление которого в холодных условиях может потребоваться несколько десятилетий, изменения температурного режима многолетнемерзлых пород и активизации термоэрозийных процессов; 4) переработки русел, речной поймы и изменения характера русловых процессов; 5) создания отвалов пустых/отработанных пород, в последующем интенсивно размываемых дождями и склоновыми потоками; 6) техногенных аварий, например прорыва прудов-отстойников, хвостохранилищ [1, 8, 11, 12, 14, 16, 25, 32]. Причем третий и в какой-то мере четвертый, пятый и шестой факторы будут продолжать увеличивать сток наносов и после прекращения добычи. Влияние деятельности горнодобывающих предприятий может распространяться на значительные расстояния [1, 13, 21, 32, 39]. Если оно достигает гидрологического поста, где измеряют сток наносов, эти изменения будут обнаружены. Однако, если пост был открыт после начала добычи, этого не произойдет, и использование таких данных способно привести к ошибочным выводам и решениям. Как раз такая ситуация имеет место для азиатской части страны, где массовый мониторинг стока наносов начался в 1950–1960-е гг. (с максимальным количеством постов с середины 1970-х по 1980-е гг.), когда значительная часть месторождений уже разрабатывались. При этом вопрос учета влияния добычи полезных ископаемых на данные постов, использовавшиеся, например, при составлении карты “Средней мутности рек СССР”, при обосновании уравнений расчета модуля стока наносов для эрозионных районов [6, 17, 28, 30] практически обойден вниманием. В [9] этот аспект рассматривается через призму изменений естественных ландшафтов вследствие сведения лесов и распашки земель. В работе [4] вопрос возможного влияния добычи полезных ископаемых на сток наносов решен выделением таких районов на новой карте “Средней годовой мутности рек”, составленной по данным до середины 1990-х гг.

В 2019 г. авторами была подготовлена база данных по почти 200 постам (с наблюдениями за расходами наносов) на реках водосборов арктических морей России. Их анализ привел к неожиданным выводам [20]: несмотря на доминирование в регионе рек с общим увеличением водного стока [31], а также рост температуры воды и теплового стока [37, 38, 43, 44] как одного из факторов термоэрозии многолетнемерзлых пород [34], большинство постов демонстрировали статистически значимое уменьшение стока наносов, прежде всего за счет снижения мутности с 1990-х гг. Причин такой тенденции могло быть несколько — резкое сокращение хозяйственной деятельности, изменения в самой системе стационарного мониторинга, климатические изменения и их гидрологические последствия. Впоследствии доминирующую роль негативных процессов в горнодобывающей отрасли удалось доказать на примере рек бассейна р. Алдан [21], где уменьшение стока наносов было особенно значительным, хотя у фонового объекта — р. Ботома — оно не обнаружено.

К северу от р. Алдан расположен бассейн р. Индигирка, где с середины XX в. также осуществляется масштабная добыча полезных ископаемых, которая до сих пор практически не изучена. Здесь ее воздействие на сток наносов рек, вклад в многолетнюю изменчивость имеет существенные отличия. Чтобы их объяснить, задачами проведенного исследования стали, во-первых, анализ горнодобывающей деятельности в бассейне Индигирки — в прошлом и настоящем, во-вторых, изучение многолетних колебаний стока воды и наносов, характеристик водного и термического режима рек, обоснование эмпирических зависимостей между стоком наносов и его

гидрологическими факторами, в-третьих, по итогам решения первых двух задач, — оценка роли горнодобычи и естественных факторов в современных изменениях стока наносов Индиgirки и ее притоков.

Материалы и методы исследований

Информационной основой для исследований послужили несколько типов данных. Прежде всего это ряды среднемесячных, среднегодовых и максимальных расходов воды Q , температур воды T , мутности воды S и расходов взвешенных наносов R по 22 гидрологическим постам. Причем на 17 постах, на которых когда-либо измеряли мутность воды и расходы взвешенных наносов (рис. 1), 3 поста расположены на главной реке, 7 постов — на притоках с площадью водосбора (F) меньше 200 км^2 , 4 — на средних реках с $F > 2000 \text{ км}^2$. На всех постах, за исключением Воронцова, расходы наносов определяются основным методом: через среднюю мутность, рассчитываемую по единичной мутности и переходному коэффициенту, и расход воды. На посту Воронцово сток наносов вычисляется с декадным шагом по графикам связи $R = f(Q)$.

Начало массовых измерений s и R датируется в бассейне Индиgirки 1950–1970-ми гг., т.е. уже в условиях недропользования (табл. 1). К настоящему времени

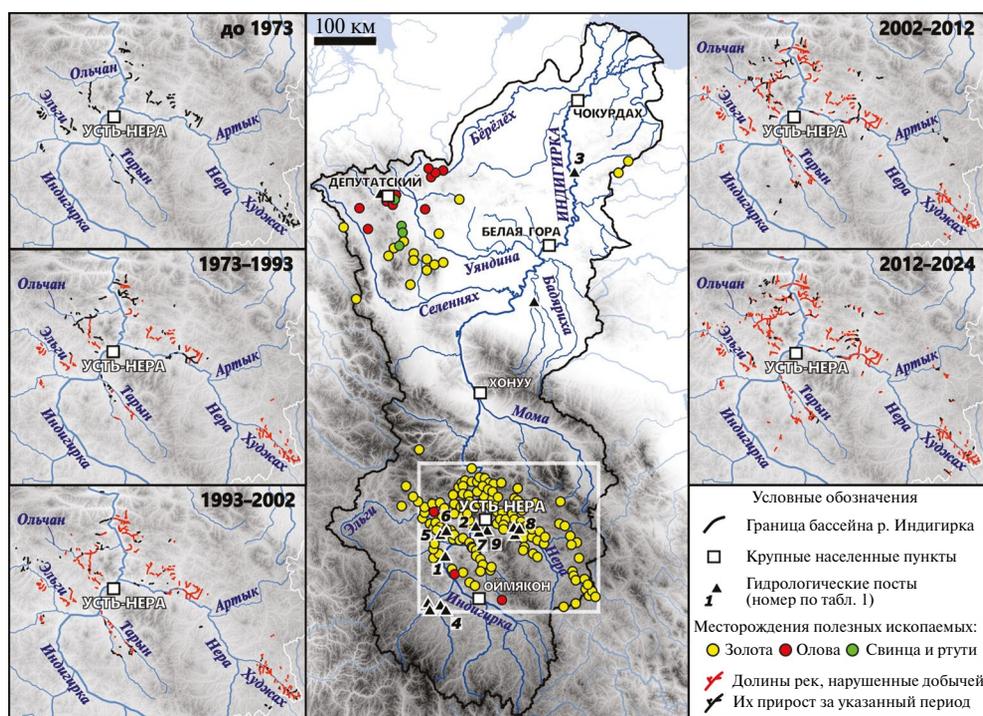


Рис. 1. Схема бассейна р. Индиgirка с указанием месторождений и гидрологических постов. На врезках (слева и справа от основной карты) показана динамика прироста нарушенных речных долин в средней и южной части бассейна. Номера постов, по которым использованы данные в исследовании, соответствуют нумерации в табл. 1.

Fig. 1. Scheme of the Indigirka River basin with mineral deposit fields and hydrological gauges. On insets — the dynamics of increase of disturbed river valleys. The numbering of the posts corresponds to the numbering in the table 1.

Таблица 1. Средние за пятилетия и десятилетия среднегодовые расходы взвешенных наносов (кг/с, числитель) и мутность воды (г/м³, знаменатель)

Table 1. Averaged (over pentads and decades) the annual discharges of suspended sediments (kg/s, numerator) and water turbidity (g/m³, denominator)

Река — пост, площадь водосбора, км ²	1951—1955	1956—1960	1961—1970	1971—1980	1986—1990	1991—1995	1996—2000	2001—2005	2006—2010	2011—2015	2016—2020
1. р. Индигирка — ГМС Юрты, 51100	н. д.	$\frac{39^{**}}{164}$	$\frac{20.6}{89.0}$	$\frac{23.0}{94.1}$	$\frac{10.9}{44.4}$	$\frac{3.3^{**}}{19.5}$	н. д.	$\frac{18.5^*}{72.5}$	н. д.	н. д.	н. д.
2. р. Индигирка — п. Индигирский, 83500	$\frac{25}{60.1}$	$\frac{42.2}{94.6}$	$\frac{48.5}{110}$	$\frac{39.2}{97.8}$	$\frac{40.4}{94}$	$\frac{24.2}{70.7}$	$\frac{37.1}{75.6}$	$\frac{38.2}{80.6}$	$\frac{22.2}{48.2}$	$\frac{53^{**}}{91.4}$	н. д.
3. р. Индигирка — ГМС Воронцово, 305000	н. д.	$\frac{339}{220}$	$\frac{469}{281}$	$\frac{307}{203}$	$\frac{300^{**}}{203}$	н. д.	н. д.	н. д.	н. д.	н. д.	н. д.
4. р. Ючутей-Юрях — ГМС Агайкан, 1160	н. д.	н. д.	н. д.	$\frac{0.076^*}{25.8}$	$\frac{0.054}{23.6}$	$\frac{0.074}{32.4}$	$\frac{0.063^{**}}{22.8}$	н. д.	н. д.	н. д.	н. д.
5. р. Эльги — “5 км выше устья р. Артык-Юрях”, 17600	н. д.	н. д.	$\frac{3.4^{**}}{34.6}$	$\frac{5.1}{52}$	$\frac{4.2}{40.1}$	$\frac{4.6}{51.2}$	$\frac{6.1}{49.6}$	$\frac{8.8}{65.5}$	$\frac{9.4}{64.6}$	$\frac{36.9}{211}$	$\frac{17.1}{164}$
6. р. Артык-Юрях — “3.5 км от устья”, 644	н. д.	н. д.	н. д.	$\frac{0.03^{**}}{33.2}$	н. д.	$\frac{0.22^*}{174}$	$\frac{0.13}{64.7}$	$\frac{0.17}{86.4}$	$\frac{0.15}{68.0}$	$\frac{0.15}{55.1}$	$\frac{0.44}{177}$
7. руч. Чаптахай — устье, 25.8***	н. д.	н. д.	н. д.	$\frac{0.96^{**}}{4.0}$	н. д.	$\frac{1.22^*}{5.1}$	$\frac{2.26}{8.1}$	$\frac{0.77}{4.2}$	$\frac{1.23}{5.2}$	$\frac{2.57}{10.1}$	$\frac{2.28}{8.4}$
8. р. Нера — п. Ала-Чубук, 22300	$\frac{24^{**}}{193}$	$\frac{11.3}{99.3}$	$\frac{16.7}{137}$	$\frac{14.0}{121}$	$\frac{27.0}{197}$	$\frac{15.1}{144}$	$\frac{29.5}{202}$	$\frac{12.6}{116}$	$\frac{12.2}{105}$	$\frac{31.0^{**}}{174}$	н. д.
9. руч. Амбар-Юрюегэ — г.п. Ремпункт, 16.6	н. д.	н. д.	н. д.	$\frac{0.73^*}{4.1}$	$\frac{0.95}{5.3}$	$\frac{1.64}{8.4}$	$\frac{0.83}{4.2}$	$\frac{0.53}{2.8}$	$\frac{0.47}{2.3}$	$\frac{1.76}{7.2}$	$\frac{2.17}{11.5}$

* по неполным данным, ** по 1—3 годам, *** расходы наносов в г/с, н. д. — нет данных.

на Индигирке и Нере мониторинг наносов прекращен; на р. Эльги и Артык-Юрях, ручьях Чаптахай и Дунай измерения продолжают [48]. Как следствие, ряды мутности воды и расходов наносов сравнительно короткие, не охватывают последних лет, имеют много пропусков, которые по возможности заполнялись авторами по связям вида $R = f(Q)$ (при $r > 0.7$).

При анализе исходных данных по мутности и расходам наносов выяснено, что чаще всего встречающиеся причины их пониженной точности — это перенос станции (например, ближе к берегу) и нерепрезентативность места отбора единичных проб воды на мутность (причина № 1), малые навески наносов на фильтрах (№ 2), недостаточное число фактических измерений расходов наносов (№ 3), слабая или неоднозначная связь между единичной и средней мутностью или между R и Q (№ 4), ошибки в измерениях Q (№ 5). Тем не менее в гидрологических ежегодниках размещают данные с предельными отклонениями менее ± 15 – 20 [26]. Мало того, в 1978–1980 гг. была проведена комплексная проверка публикуемых данных балансовым методом, показавшая их приемлемую точность. Также авторами статьи выяснено, что первые упоминания о серьезных ошибках датируются серединой 1970-х гг., и таких случаев становилось все больше со второй половины 1980-х гг. и особенно с 1990-х гг. Много ненадежных данных у Юрты: в существенной мере — это 1972, 1974, 1984, 1988–1990 и 2005 гг., в меньшей мере (за отдельные месяцы — обычно за май–июнь) — 1978, 1983, 1986, 1987, 1991, 1993 гг. На Индигирском снижение достоверности связано с нерепрезентативностью точки отбора проб воды: в течение всего сезона (1978, 1986, 1988, 1993) или в отдельные месяцы (1985, 1991, 1999, 2006, 2007 и 2011 гг.), а также по причине № 2 (1994). В Воронцово — это 1974, 1978, 1983–1985 гг. (причина № 1, 2); пост на р. Эльги (№ 1) — 1988, 1989, 2000 гг. (в течение всего сезона) и 1991, 2006–2008, 2011 гг. (в отдельные месяцы), пост на р. Нера — соответственно 1984, 1987, 2006, 2011 гг. и 1986, 1989–1991, 1993–1995, 1999, 2007–2010 гг.

Второй массив данных составили сведения по разрабатываемым (в настоящем и прошлом) месторождениям полезных ископаемых: об их местоположении, времени начала и этапах освоения, масштабах добычи и их многолетней динамике, изменениях в характере добычи. В работе использованы только открытые данные: векторно-растровые слои и атрибутивные к ним таблицы с сайта “ГИС — атлас “Недра России” [45], ежегодные “Государственные доклады о состоянии окружающей среды Республики Саха (Якутия)” [46], сведения из СМИ, научных и справочных публикаций, с сайтов компаний и др. Месторождения, эксплуатируемые с 1980–1990-х гг., определялись в том числе по спутниковым снимкам.

Третий массив данных сформировали спутниковые снимки (ДДЗЗ) — систем Landsat-5 и Landsat-8 за период с 2007 по 2024 г. Поиск и обработка снимков выполнялись при помощи облачного ресурса Google Earth Engine [47]. Были выбраны только безоблачные массивы снимков за июнь–сентябрь. Они использовались для определения мутности речных вод (по значениям яркости) и распространения техногенных взвесей вниз по течению от разработок, а также для альтернативной проверки достоверности современных стационарных наблюдений (рис. 2). Поскольку для расчетов количественных значений мутности воды используют красный спектральный канал [35, 36, 42], то извлекались значения яркости именно в нем. Они сравнивались со значениями измеренной на постах весовой мутности. Такое сравнение было выполнено для постов Индигирский, “5 км выше устья р. Артык-Юрях” и Ала-Чубук.

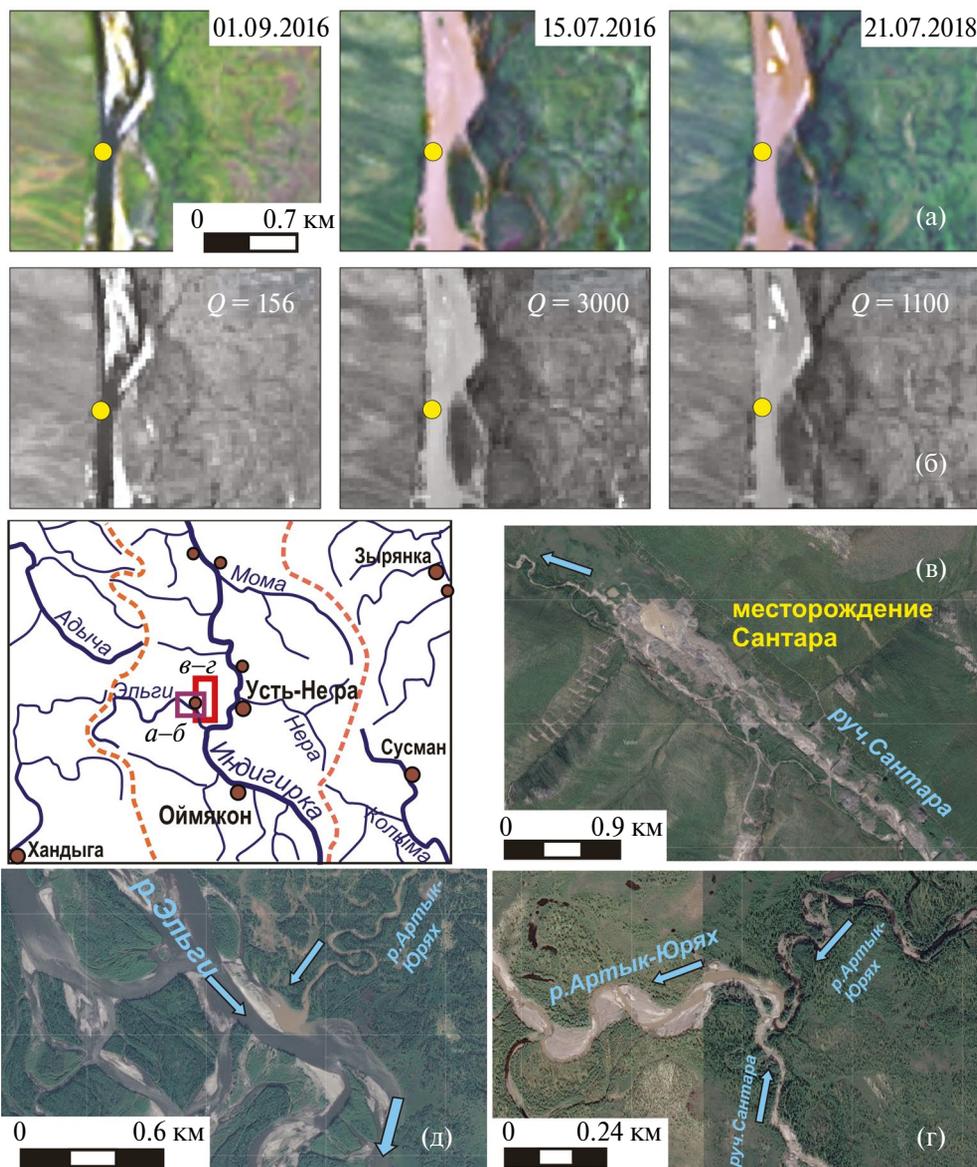


Рис. 2. Фрагменты космических снимков Landsat-8 на участок р. Эльги в районе гидрологического поста (а-б) и по длине руч. Сантара и р. Артык-Юрях — от разработок россыпного золота до впадения в р. Эльги (пример): а — снимки в натуральной цветопередаче, б — спектральные каналы красного диапазона; слева направо величины яркости увеличиваются; в — Сантарское месторождение и руч. Сантара, г — впадение р. Сантара в р. Артык-Юрях (в 2.5 км ниже дамбы хвостохранилища), д — впадение р. Артык-Юрях в р. Эльги (в 45 км ниже устья руч. Сантара).

Fig. 2. Fragments of Landsat-8 satellite images on the El'ga River reaches near the gauge (a-b) and along the Santara and the Artyk-Yuryakh rivers — from gold deposit to the flow into the El'ga River (as example): a — images in natural color, b — spectral channels of the red range; brightness values increase from left to right; c — Santarskoye gold deposit and Santara stream, g — flow of the Santara into the Artyk-Yuryakh River (2.5 km below the dam of the tailings dump), d — flow of the Artyk-Yuryakh River into the El'gi River (45 km below the mouth of the Santara).

При обработке и анализе данных применялось несколько подходов. Многолетние колебания Q , R , S и T исследовались (с помощью статистических и графических методов) на предмет содержания в них тенденций, нарушения временной однородности рядов — на основе критериев Фишера (F-test, при $\alpha = 5\%$), Стьюдента (t-test), Манна-Уитни (MU-test), установления “переломного” года (с помощью Pettit’s test, суммарных (СИК) и разностных (РИК) интегральных кривых). Проведено сопоставление многолетних колебаний мутности воды, расходов наносов, расходов и температуры воды между собой, а также с показателями горнодобычи. Одним из таких показателей стала протяженность нарушенных (открытыми разработками) речных долин и ее многолетние изменения, определявшаяся по спутниковым снимкам. При этом использовалась подготовленная авторами база данных по россыпным разработкам на реках Дальнего Востока [40]. Для определения временной изменчивости этого показателя дополнительно для территории бассейна были подобраны снимки за 1973 г. (Landsat-1), 1994 г. (Spot-3), 2002 г. (Landsat-7) и 2013 г. (Landsat-8), визуальное дешифрирование которых позволило определить период первичной вскрыши для каждого отдельного участка добычи.

Для оценки степени влияния на сток наносов природных и антропогенных факторов для каждого из постов с длинной серией наблюдений были изучены связи между среднегодовыми расходами наносов (R_r), с одной стороны, и расходами воды, температурой воды, тепловым стоком, с другой. Корреляционный анализ позволил определиться с основными предикторами, а регрессионный — с видом и адекватностью эмпирических моделей, согласно [5]. Зависимости были получены за так называемый индустриальный период, длившийся до начала 1990-х гг.:

$$R_r \text{ (Индибирский)} = 0.149Q_r + 0.0076Q_{\text{mx}} - 53.2 \text{ (adjR}^2 = 0.79), \quad (1)$$

$$R_r \text{ (Воронцово)} = 0.042Q_{\text{mx}} + 0.049Q_{\text{VII}} + 25.4T_{\text{VI}} - 458 \text{ (adjR}^2 = 0.73), \quad (2)$$

$$R_r \text{ (Агаякан)} = 0.001Q_{\text{mx}} + 0.023Q_r - 0.04 \text{ (adjR}^2 = 0.92), \quad (3)$$

$$R_r \text{ (5 км)} = 0.141Q_r - 0.031Q_{\text{IX}} + 0.15Q_x - 8.65 \text{ (adjR}^2 = 0.63), \quad (4)$$

$$R_r \text{ (Ала-Чубук)} = 0.242Q_r + 0,0065Q_{\text{mx}} - 22.7 \text{ (adjR}^2 = 0.75), \quad (5)$$

где Q_r и Q_{mx} — среднегодовые и максимальные расходы воды, Q_{VII} , Q_{IX} , Q_x , T_{VI} — среднемесячные расходы и температуры воды с обозначением соответствующего месяца, adjR^2 — скорректированный коэффициент достоверности. Уравнения помогли рассчитать R_r в современный период, которые были сравнены с фактическими данными. Результатом стало определение момента и степени изменения антропогенной нагрузки на сток наносов с 1990-х гг.

Результаты и обсуждение

Многолетняя динамика гидрологических факторов стока наносов. В бассейне р. Индибирка современный период отличает заметное увеличение водности рек [27, 31]. Начало этих нестационарных — для годового стока (по t-test и MU-test) — изменений датируется серединой 1990-х г. (рис. 3). По новым данным, увеличение годового стока составило в 1996–2022 гг. около 20% (в сравнении с 1950–1995 гг.), снижаясь в бассейне р. Нера до 5% и меньше. Его обеспечивают такие же положительные изменения месячного стока, прежде всего в мае (увеличение — в среднем на 40–60%), июне (10–25%), июле (< 10–20%) и октябре (30–50%). В августе,

и опять же в бассейне Неры, ситуация не такая однозначная, что довольно важно, поскольку в этот месяц проходит 1/3–1/4 годового стока наносов местных рек. Максимальные расходы тоже выросли: от 6% на посту Индигирский до 11% у р. Нера и 33% у р. Эльги. Увеличение Q_{max} началось с запаздыванием в 5–15 лет (в сравнении с годовым стоком), оно не было статистически значимым и слабо затронуло южные районы бассейна Индигирки.

Температура воды — второй важный фактор формирования стока наносов рек в криолитозоне, влияющий на интенсивность термозерозии. Температура во все месяцы теплого сезона года повысилась: в летние месяцы — на 0.5–1°C, в сентябре — менее чем на 0.5°C [37]. Рост температуры в реках фиксируется с конца 1980-х и с 1990-х гг. (рис. 3), что согласуется с началом выраженного регионального

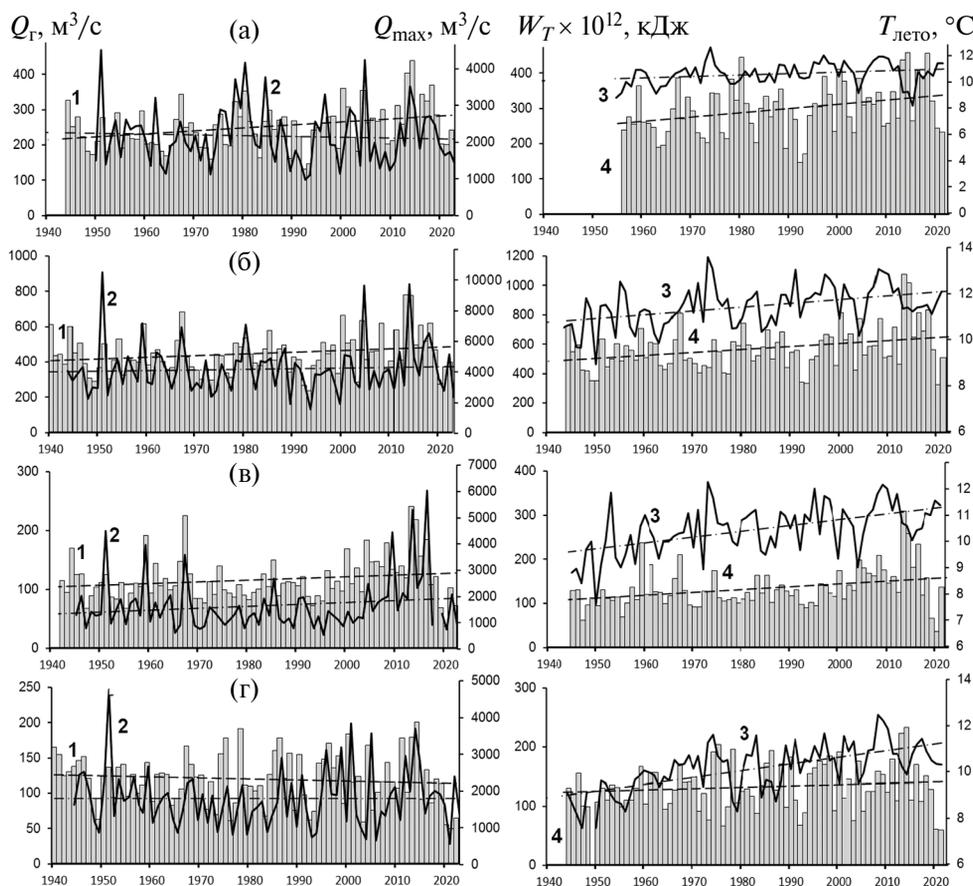


Рис. 3. Многолетние изменения среднегодовых (1) и максимальных (2) расходов воды, средней за лето температуры воды (3) и годовой величины теплового стока (4) с линейными трендами. Посты: а — Юрты (р. Индигирка), б — Индигирский (р. Индигирка), в — “5 км выше устья р. Артык-Юрях” (р. Эльги), г — Ала-Чубук (р. Нера).

Fig. 3. Long-term changes of average annual (1) and maximum (2) water discharges, and average summer water temperature (3), and annual heat runoff (4) with linear trends. Gauging stations: а — Yurty (Indigirka River), б — Indigirsky (Indigirka River), в — “5 km above the mouth of the Artyk-Yuryakh” (El’gi River), г — Ala-Chubuk (Nera River).

климатического потепления с 1988 г., которое усилилось в 2000-х гг. [7, 19]. Причем бассейн Индигирки относится к районам с существенными положительными аномалиями: весной они составили в 2000–2019 гг. в среднем 2.5°C (в сравнении с 1961–1990 гг.), летом — 1.2°C , осенью — $2.5\text{--}3^{\circ}\text{C}$. Интегральным результатом увеличения водности рек и нагрева речных вод стало статистически значимое увеличение теплового стока — на 10–20% [38].

Третий фактор — наледи (тарыны) речных и подземных вод, широко распространенные в бассейне Индигирки, достигающие самых больших в стране и мире размеров [15, 23]. Многолетняя их динамика влияет не только на водный сток, но и на сток наносов, поскольку в случае снижения наледности освобождаются обширные пространства днищ речных долин — *“наледные поляны”*, лишенные или слабо заросшие растительностью, заполненные аллювием и становящиеся мощным источником дополнительных наносов. По сведениям из [15], общее число и площадь наледей в 1950-х гг. достигали 897 и 2064 км^2 , а по данным за 2013–2017 гг. [22] — 1213 и 1287 км^2 ; наледность выше поста Индигирский была 0.82% [15], а стала 0.56% [22], в бассейне р. Эльги тоже снижение — с 0.49 до 0.23%. Однако новые результаты из [23] по 71 крупнейшим наледям Северо-Востока России, изученным по спутниковым снимкам за 1973–2021 гг., по сути, опровергают вывод о сильном уменьшении числа и площади наледей ввиду, вероятно, завышенных (почти в 2 раза) значений в [15]. Последние были получены вследствие каталогизации в основном не реальных наледей, а наледных полей, причем дешифрованных по летним аэрофотоснимкам. Мало того, межгодовая изменчивость числа и размеров наледей невероятно высокая (порой с полным их исчезновением в одни годы и новым образованием в последующие), в среднем составляя 20%. Да и реакция наледей на климатическое потепление не такая уж однозначная. Таким образом, влияние этого фактора пока неочевидно, и оно требует отдельного изучения.

Еще одним важным следствием (для стока наносов) потепления в регионе, изменения величины и режима атмосферных осадков стало увеличение продолжительности и глубины сезонного протаивания верхнего слоя почвогрунтов, снижение его льдистости, рост температуры ММП [7, 41], тем самым способствуя их эрозии.

В целом современные гидрометеорологические условия, как и изменения в криолитозоне, были благоприятными, начиная с 1990-х гг. и особенно в XXI в., для формирования стока наносов рек в бассейне Индигирки и его увеличения.

Недропользование в бассейне Индигирки. Основу недропользования в бассейне Индигирки в XX в. составляли добыча золота и олова. Добыча россыпного золота началась в 1942 г. — в пределах обширной Яно-Колымской золотоносной провинции. Через два года в бассейне р. Нера запустили прииск “Победа”, а затем — прииски Маршалский (в бассейне р. Эльги), им. Покрышкина (р. Тарын), “Ольчан” (р. Ольчан) и др. Они объединяли разные месторождения и участки, порой далеко расположенные друг от друга; добыча на них велась открытым, смешанным и реже подземным способами. Новые россыпи сравнительно быстро вырабатывались и забрасывались. В результате на рубеже 1950–1960-х гг. сложилась сложная ситуация с объемами золотодобычи, но уже в 1960-х гг. в бассейне Индигирки золота добывалось больше, чем на Алдане [33]. В 1965–1967 гг. золотоносные месторождения в якутской части бассейна были переданы в “Индигирзолото”. В 1975 г., на базе уникального Сарылахского золотосурьмяного месторождения, в основном с подземной добычей, была построена Сарылахская обогатительная фабрика (ГОК). С 1977 г. в бассейне р. Эльги подземным способом разрабатывается крупное Бадранское рудное месторождение золота.

Первые тонны россыпного олова были добыты в 1951 г. на богатом месторождении Депутатское и одноименном прииске [24], расположенном в бассейне р. Уяндина. С 1958 г. Усть-Янский улус в Якутии, с месторождениями в низовьях Яны и Индигирки, бассейне р. Хрома, стал одним из главных поставщиков олова в России: в 1960-х гг. на республику приходилось ~30% общесоюзного объема добычи, из которых больше половины добывалось на россыпных месторождениях, т.е. с наибольшим вредом пойменно-речным ландшафтам и стоку наносов рек. В 1989 г. были выведены на полную мощность рудник Западный и Депутатский ГОК. В 1991–1992 гг. на территории общей площадью 21 тыс. км² работало 6 оловодобывающих предприятий, которые разрабатывали 13 россыпных месторождений [14]. Объем перерабатываемой горной массы составлял свыше 20 млн м³; объем водопотребления — 12 млн м³, а объем сточных вод — 8–10 млн. м³. В этой части бассейна добывалось также золото (рис. 1).

Таким образом, к 1980-м — началу 1990-х гг. в бассейне Индигирки сформировалось два основных горнодобывающих района (рис. 1). Первый район, с центром в пос. Усть-Нера, занимает верхнюю и среднюю часть бассейна, охватывая районы Черского хребта, Эльгинского и Оймяконского плоскогорий, бассейны левых притоков Индигирки — рр. Эльги (впадает выше поста Индигирский), Сарыллах (то же), Нарын-Юрях (то же), Ольчан, Бергеннях, Арга-Хатынгнах и Иньяли, правых притоков — рр. Тарын (выше поста Индигирский), Нера, Учюгей-Юрях, Тирехтях, Бол. Куобах-Баса, Хатынгнах и Еченка. Район специализировался главным образом на добыче россыпного и рудного золота. Здесь немногим более 300 известных месторождений [29, 45], из которых ~5% рудных. К 1973 г. в районе насчитывалось около 423 км нарушенных (добычей) естественных пойменно-русловых комплексов (ПРК), в основном в бассейнах рр. Эльги, Тарын и Нера, а к началу 1990-х гг. добавилось еще 214 км, в том числе за счет месторождений в бассейнах правобережных притоков, впадающих в Индигирку ниже по течению от устья Неры. Еще 77 км измененных ПРК точно датировать не удалось. Второй горнодобывающий район, с центром в пгт Депутатский, приурочен главным образом к верховьям р. Уяндина. Северный его отсек занимают месторождения оловянных, оловянно-вольфрамовых, свинцовых руд и ртути, южный — участки добычи россыпного золота. Протяженность нарушенных ПРК составила примерно 150 км, что почти в 4.5 раза меньше, чем в первом районе. Пост Воронцово, закрытый почти 30 лет назад, замыкал оба горнодобывающих района.

В первой половине 1990-х гг. добыча золота в первом горнопромышленном районе стала снижаться, достигнув минимума во второй половине 1990-х гг. Об этом косвенно свидетельствуют общие (по Якутии) данные (рис. 4), а также сведения по золотодобыче АО «Индигирзолото»: в 1991 г. — 10.2 т, 1993 г. — 9.65 т, 1995 г. — 6.86 т, 1996 — 3.93 т [10]. Прирост новых измененных ПРК за 1993–2002 гг. составил не менее 65 км (еще 77–96 км точно датировать не удалось). В 2014 г. было ликвидировано АО «Индигирзолото», но входившие в него предприятия продолжили работу (самостоятельно или в составе других золотодобывающих компаний), осваивая новые золотоносные участки.

С 2011 г. объемы добычи золота в Саха (Якутии) постепенно нарастали, реагируя на его значительное подорожание, и резко — с 2018 г. (рис. 4). Осенью 2023 г. стоимость тройской унции золота превысила 2000 долл. США, а в марте 2025 г. — 3000 долларов. В 2020 г. были превышены рекорды советского периода (36.5 т/год в 1975 г.), а в 2024 г. Республика Саха (Якутия) вышла на первое место в РФ по объемам

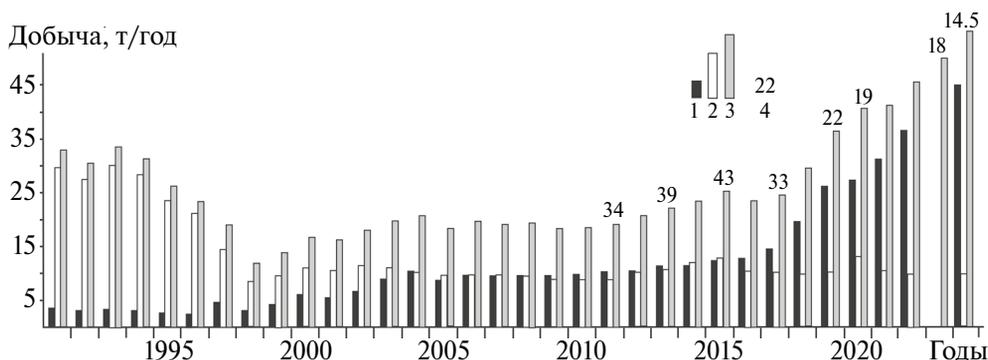


Рис. 4. Динамика добычи золота в Республике Саха (Якутия) за 1991–2024 гг. по данным из [3, 10, 48]: 1 — добыча рудного золота, 2 — добыча россыпного золота, 3 — суммарная добыча, 4 — доля Оймяконского улуса в общереспубликанской добыче (%).

Fig. 4. Dynamics of gold production in the Republic of Sakha (Yakutia) for 1991–2024 according to data from [3, 10, 48]: 1 — mining of ore gold, 2 — mining of placer gold, 3 — total production, 4 — share of Oymyakonsky ulus in national production (%).

золотодобычи — 55 т/год. Это стало возможным благодаря увеличению производства рудного золота, добываемого карьерным и шахтным способами. Пик добычи в Оймяконском улусе (основном золотодобывающем районе в бассейне Индигирки) был достигнут в 2015 г. — около 43% общереспубликанской добычи [3]. В 2015 г. здесь добывались примерно столько же, сколько и на рубеже 1980–1990-х гг. [10], причем более 80% добычи приходилось на россыпные месторождения. В 2017 г. в бассейне р. Тарын на базе крупного рудного месторождения “Дражное” был запущен Тарынский ГОК, а в 2020–2021 гг. начаты горные работы на карьере “Тарын”, и заработала золотоизвлекающая фабрика (ЗИФ). В бассейне р. Эльги в 2013–2016 гг. проведена реконструкция рудника Бадран и его ЗИФ. Тем не менее после 2015 г. добыча в Оймяконском улусе сократилась: в среднем добывалось от 7.5 до 9 т/год; доля улуса сократилась до 18–19% в 2020–2023 гг. (рис. 4). Но это не уменьшило антропогенную нагрузку на сток наносов, поскольку из-за увеличения доли россыпных месторождений с низкой концентрацией металла требовалось перерабатывать больше породы. Еще одной особенностью современной золотодобычи стала повторная вскрыша отвалов на отработанных участках. Если за 1973–1993 и 1993–2002 гг. протяженность таких ПРК была всего 4.4 и 15.6 км, то в 2002–2013 и 2013–2024 гг. она составила уже 82.6 и 122 км. В целом с 2002 по 2013 гг. суммарная протяженность нарушенных ПРК увеличилась на 203 км, а с 2013 по 2024 гг. — на 163 км (под вопросом — еще 19 км), в значительной мере за счет месторождений между бассейном р. Нерой и с. Чумпу-Кытыл (рис. 1). Всего до 2024 гг. 1165 км речных русел с поймами были охвачены (когда-либо или сейчас) добычей золота. В будущем добыча золота, вероятнее всего, вырастет, прежде всего, благодаря освоению крупного Малтанского золотосурьмяного месторождения в бассейне р. Тарын.

Намного хуже оказалась ситуация с добычей олова. В 1990-х гг. ее объемы сокращаются, участки забрасываются, населенные пункты пустеют. Во второй половине 1990-х гг. добыча фактически не велась, за исключением месторождения “Тирехтях” в бассейне р. Селеннях, где с 1995 г. она проводилась открытым и подземным способами. В 1999 г. был закрыт рудник “Западный”, в 2007 г. законсервировано

месторождение “Тирехтях”, в 2009 г. закрыт Депутатский ГОК, но из его хвостохранилища, которое перестали эксплуатировать с 1997 г., сточные воды продолжали поступать в речную сеть [46]. Добыча золота во втором горнопромышленном районе прекратилась в конце 1990-х гг. [29]. Ее возобновило ООО “Янзолото”: с 2013 г. на р. Аччыгый-Кумах-Юрюе (бассейн р. Селеннях), с 2015 г. по р. Тарын-Юрях (бассейн р. Уяндина), с 2024 г. в совершенно новом месте — в бассейне р. Большая Эрча. С 2021 г. вновь началась добыча (на месторождении “Тирехтях”) и обогащение оловосодержащих руд, пока в небольших объемах.

Причины и тенденции изменения стока наносов. На р. Индигирка мутность воды и расходы взвешенных наносов ранее измеряли на трех постах. Два поста — Юрты и Индигирский — расположены в верхнем течении реки, а пост Воронцово — в низовьях (рис. 1). За единый период наблюдений (1956–1986) средний расход наносов и мутность воды на них составили 21.3 кг/с и 90 г/м³ (Индигирский), 44 кг/с и 100 г/м³ (Индигирский), 372 кг/с и 230 г/м³ (Воронцово). То есть наибольшее увеличение стока наносов происходит между постами Индигирский и Воронцово, главным образом за счет размыва русла и берегов, особенно при выходе Индигирки на равнину. К вершине дельты сток увеличивается примерно на 100 тыс. т/год; еще ~17 тыс. т/год поступает в пограничные рукава дельты [18]. В сравнении с другими большими реками российской Арктики годовой сток взвешенных наносов в низовьях Индигирки можно считать большим. Причина кроется в режиме реки и условиях его формирования [2, 8, 28].

Современный период в колебаниях годового стока наносов Индигирки и ее притоков характеризуется его заметным уменьшением в 1990-х и 2000-х гг., а после — существенным увеличением (рис. 5). Эти изменения содержат как антропогенную, так и естественную составляющие. Тогда как инструментально-методические нарушения в рядах не доказаны, даже с помощью спутниковых снимков.

Во-первых, приемлемого качества спутниковые снимки на рассматриваемый район были лишь с 2005/2007 гг. Во-вторых, публикуемые в гидрологических ежегодниках осредненные по декадам мутности воды плохо увязываются с мгновенной съемкой поверхности рек из космоса. Однако несколько съемок совпали (по датам) с максимальными за летне-осенний сезон значениями мутности воды. Построенная по ним связь позволила прийти к некоторым качественным выводам. Возможно, отдельные декадные значения измеренной на постах мутности занижены: на р. Эльги — в 2007, 2009, 2011, 2013, 2017, 2018 гг. (примерно в 1.5–3 раза), т.е. в большее число лет, чем указано в гидрологических ежегодниках; на посту Индигирский — в 2011 г. Дополнительно для постов Индигирский ($Q_{И}$) и Ала-Чубук были получены тесные связи ($r \sim 0.6–0.84$) между значениями яркости (B) и среднесуточными расходами воды, поскольку изменения расходов воды на этой территории сопровождается изменениями концентрации взвесей в речном потоке (рис. 2а, б). Пример их дан ниже:

$$Q_{И} (2007–2016) = 391 \times \text{EXP}(23.5 \times B), (R^2 = 0.58), \quad (6)$$

$$Q_{И} (2017–2022) = 255 \times \text{EXP}(25.5 \times B), (R^2 = 0.71). \quad (7)$$

На посту Индигирский, находящемся ниже впадения в Индигирку рр. Эльги и Тарын (с развитой горнодобычей на водосборах (рис. 1)) и в 10 км выше устья р. Нера, первый подпериод длился с 1992 по 2010 г. и выделяется уменьшением стока наносов на 31% по сравнению с 1970–1980-ми гг. На р. Эльги, р. Нера

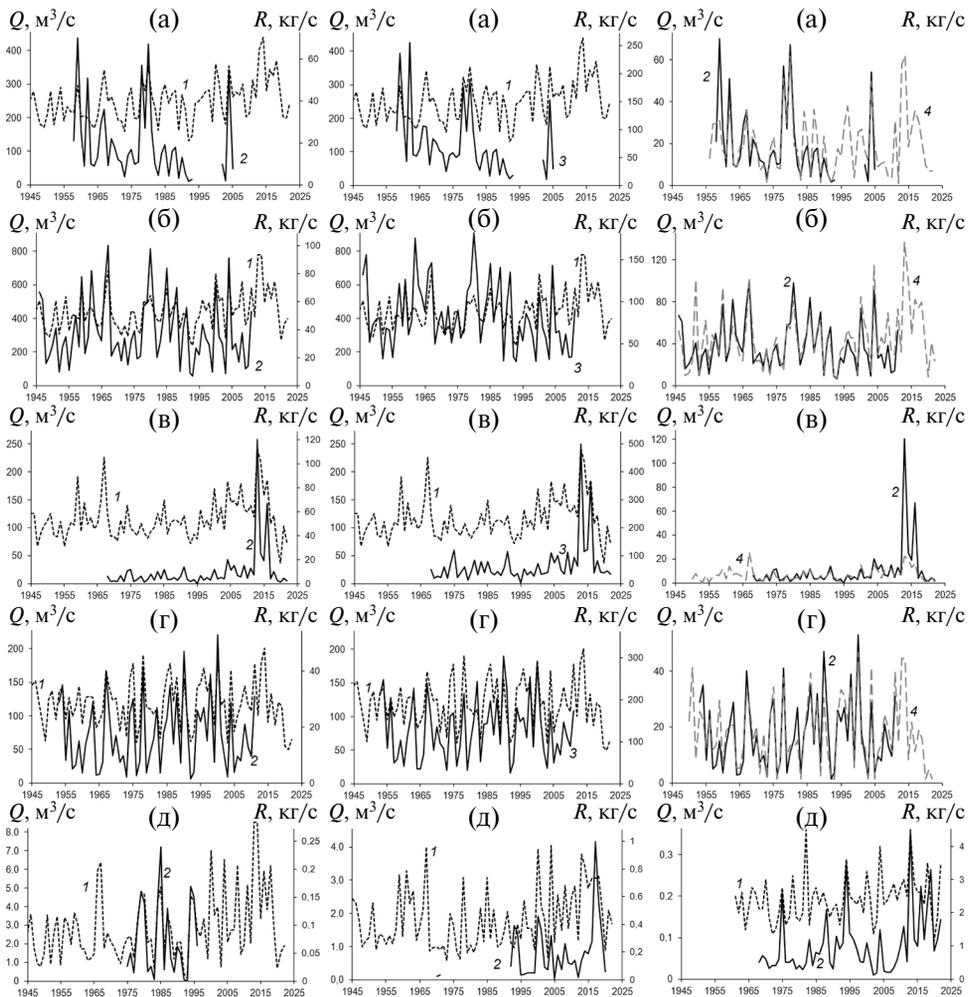


Рис. 5. Многолетние колебания среднегодовых расходов воды (1), расходов взвешенных наносов (2) и мутности воды (3), рассчитанных расходов наносов (4). Посты: *a* — Юрты (р. Индигирка), *б* — Индигирский (р. Индигирка), *в* — “5 км выше устья р. Артык-Юрях” (р. Эльги), *г* — Ала-Чубук (р. Нера), *д* — Ага-якан (р. Ючугей-Юрях), *е* — “3.5 км выше устья” (р. Артык-Юрях), *ж* — Ремпункт (руч. Амбар-Юрюетэ).

Fig. 5. Long-term fluctuations in the annual discharge of water (1), suspended sediments (2) and turbidity of water (3), calculated sediment discharges (4). Gauging stations: *a* — Yurty (Indigirka R.), *b* — Indigirsky (Indigirka R.), *c* — “5 km above the mouth of the Artyk-Yuryakh” (El’gi R.), *d* — Ala-Chubuk (Nera R.), *e* — Agayakan (Yuchugey-Yuryakh R.), *f* — “3.5 km above the mouth” (Artyk-Yuryakh R.), *g* — Rempunkt (Ambar-Yuryute).

и руч. Амбар-Юрюетэ пониженный сток наносов наблюдался в 1992–2003 гг. (–26%), 1992–2010 гг. (–6%) и 1998–2009 гг. (–33%).

Второй подпериод, по сути, “перекрывает” предыдущее снижение (табл.1, рис. 5): на Эльги сток наносов превысил свои величины в 1992–2003 и 1971–1991 гг. на 335 и 220%, руч. Амбар-Юрюетэ (Дунай) — на 250 и 135% по сравнению с 1998–2009 и 1971–1991 гг., р. Артык-Юрях — на 78% по отношению к 1992–2010 гг. Одной из причин могло быть увеличение числа новых участков добычи, расконсервация

старых и в целом рост объемов до середины 2010-х гг. Кроме того, несмотря на контроль со стороны надзорных органов и экологических служб, сбросы неочищенных стоков имели место. Вот несколько примеров [46]. В сентябре 2015 г. содержание взвесей в руч. Удум (правый приток р. Ольчан) возросло в 38 раз, в 2017 г. — в 469 раз, в 2019 г. — в 25 раз. В 2017 г. сбросы в р. Бол. Тарын на участке “Мал. Тарын–Тенистый” увеличивали мутность речных вод в 1627 раз — с 3 до 4880 г/м³; за сутки предприятие сбрасывало 427 т взвешенных веществ. В августе 2019 г. на р. Бытыктах (левый приток Индигирки) превышение мутности над фоновыми значениями составило 75 раз. И это лишь те события, о которых стало известно. На рис. 2 (в–г) приведен пример такого “мутяевого загрязнения” со стороны месторождения на руч. Сантара, несмотря на наличие хвостохранилища. Здесь золотоносные россыпи разрабатывались в 1962, 1992–1994 гг. и по-новому, т.е. на базе отвалов, с 2013 г. Видно, что, несмотря на небольшие размеры руч. Сантара и самого месторождения, большую его удаленность от р. Эльги (~48 км), незначимую долю в стоке Эльги (для р. Артык-Юрях ~1.5%, для руч. Сантара — доли процента), добыча привела к интенсивному выносу и отложению наносов вдоль р. Артык-Юрях, формированию обширного шлейфа мутности в месте впадения реки в Эльги, который ниже по течению хотя и “разбавляется”, но все же на некотором протяжении хорошо виден вдоль левого берега. И таких “точек техногенного воздействия” на сток наносов Индигирки и ее притоков несколько десятков.

Многолетние колебания среднегодовых расходов наносов и воды хорошо согласуются: коэффициент корреляции r варьирует от 0.70 до 0.86. Исключением служит пост на р. Артык-Юрях, ввиду небольших размеров водотока и сильного влияния золотодобычи. Еще более синхронизированы колебания расходов наносов и мутности воды ($r \sim 0.80–0.98$), причем теснота этой связи одна из самых высоких среди северных рек России [8, 30]. Довольно высокая скоррелированность также между R и s , с одной стороны, и Q_{\max} , с другой, — $r \sim 0.64–0.82$ и $r \sim 0.40–0.86$. Мощным дополнительным фактором, влияющим на размер годового стока наносов, является характер внутригодового распределения расходов. Речь идет прежде всего о количестве и величине паводков в июле и августе, когда эрозийная и термоэрозийная активность дождей и склоновых потоков максимальна [2, 28]. В годы, когда летне-осенних паводков много и/или они сопоставимы по величинам с весенним половодьем, общий сток наносов Индигирки выше, и порой намного. Местные жители называют особенно мутные паводковые воды “черной водой”. Связь между месячными расходами наносов и воды в июле заметная и высокая — $r \sim 0.51–0.82$; далее следуют июнь и август с $r \sim 0.30–0.65$. Между среднегодовыми R , s , с одной стороны, и T , с другой, связь обратная, с достижением статистически значимых значений r в июле (–0.28...–0.41) и, реже, в июне. Между тепловым стоком W_t и R связи (на уровне месячных значений) менее тесные, чем у R и Q . Коэффициенты корреляции связей $R = f(T)$ и $R = f(W_t)$, построенных для современного и предыдущего (индустриального) периода, статистически значимо не различаются. Это свидетельствует об отсутствии значимого влияния теплового фактора на сток наносов рек бассейна верхней и средней Индигирки даже в условиях климатического потепления.

По уравнениям регрессии (1–5) были рассчитаны среднегодовые расходы наносов (R_t) для “индустриального” (до начала 1990-х гг.) и современного периодов (рис. 5). Первые хорошо согласуются с измеренными на постах расходами наносов и свидетельствуют о том, что изменившиеся (начиная с 1990-х гг.) гидрометеорологические условия должны были (при сохранении прежних масштабов

недропользования) как минимум вызвать незначительные изменения стока наносов рек, как максимум — привести к его существенному увеличению. Причем это верно в отношении рек, как затронутых хозяйственной деятельностью, так и нет (пример — пост Юрты). Согласно расчетам, изменения расходов наносов в 1992–2010 и 2011–2022 гг. в сравнении с фактическими R за период 1971–1991 гг. составили бы -3.2 и $+47.5\%$ (Юрты), 0 и $+45.6\%$ (Индиgirский), $+21$ и $+45.3\%$ (“5 км выше...”), $+2$ и $+3.3\%$ (Ала-Чубук). Основной рост пришелся бы на 2010-е г., как и в случае с наблюдаемыми расходами наносов. Однако причина уменьшения стока наносов в 1990-х и частично в 2000-х гг. не только в негативных процессах в горнодобывающей отрасли. На посту Индиgirский разность наблюдаемых среднесуточных расходов наносов в 1992–2010 гг. и 1971–1991 гг. равна минус 930 тыс. т в год. Из этой величины на неблагоприятные изменения в месячном стоке, выражающиеся в снижении водности в июле и августе, приходится $\sim 61\%$. Те же факторы были, вероятнее всего, ответственны за сокращение стока наносов с конца 1960-х по конец 1970-х гг.

На р. Эльги увеличение стока наносов с 2004 г. подтверждают как фактические, так и расчетные данные (рис. 5); явное расхождение с расчетными значениями было лишь в аномальные 2013 и 2016 гг. Как и в случае с постом Индиgirский, роль гидрологических и антропогенных факторов здесь примерно сопоставима. Выше поста “5 км выше...” золото добывалось и добывается на ручьях Кокарин, Талалах, Бол. и Мал. Делююеннях, в бассейне р. Тобычан. Причем именно в середине 2010-х гг. здесь отмечено возобновление хозяйственной деятельности и расширение площадей с нарушенными ПРК. В то же время 2004–2017 гг. отличаются очень высокой водностью летних месяцев и самыми большими Q_{mx} (именно в 2013 и 2016 гг.) за всю историю наблюдений на р. Эльги. Установлено, что роль естественных гидрологических факторов в повышенном стоке наносов достигает в 2004–2022 гг. около 84%, и она сопоставима с их вкладом в сокращение стока наносов в 1992–2003 гг. ($\sim 81\%$). Другими факторами появления аномальных 2013 и 2016 гг. могли быть спрямление излучины в 1 км выше поста, негативная динамика речных наледей с середины 2000-х гг. (пример — наледь на р. Тобычан). Основное антропогенное воздействие на сток наносов р. Эльги (выше поста), вероятнее всего, было с середины 1940-х по 1960-е гг., т.е. до начала стационарных наблюдений. После оно было умеренным, хотя между 1993 и 2003 гг. выше поста были обнаружены (по ДД33) новые участки измененных ПРК. Еще один результат, полученный благодаря ДД33 и сравнению их с суточными расходами воды, свидетельствует о том, что с 2017 г. в бассейне Эльги большие мутности воды стали наблюдаться при меньших (чем ранее) расходах воды. То же было обнаружено для постов Индиgirский (уравнения 1.6, 1.7) и Ала-Чубук. Ниже поста “5 км выше...” взвеси техногенного происхождения могут поступать в Эльги из р. Артык-Юрях (рис. 2), руч. Диринг-Юрях (интенсивная добыча в 1945–1987 гг. и с 1992 г.) и руч. Быйытта. На р. Артык-Юрях новое расширение добычи произошло с 2013 по 2017 г. Причем в 2017 г. зафиксирован пик в расходах наносов и мутности воды, который не согласуется с Q_{mx} . На большом месторождении Бадран, разрабатываемом с 1977 г. в бассейне правого притока Эльги — р. Большой Селирикан, действует обратная схема водопользования.

Для р. Нера, впадающей в Индиgirку ниже поста Индиgirский, влияние горнодобывающих предприятий на сток наносов длится с середины 1940-х гг. Оно было существенным, согласно фактическим и расчетным данным, и примерно

одинаковым в течение всего исторического периода. В начале современного периода масштабы природопользования в бассейне Неры, как и сам ее сток наносов, в некоторой мере уменьшились. С 1993 по 2012 г. протяженность новых нарушенных ПРК была относительно небольшой. Поэтому неслучайно результаты расчетов показали, что это снижение практически полностью (~100%) может быть объяснено гидрологическими факторами. В 2010-х гг. антропогенные и гидрологические факторы, наоборот, были благоприятными для формирования повышенного стока наносов, но из-за прекращения с 2012 г. наблюдений за наносами на посту Ала-Чубук об этом можно судить лишь на основе расчетных данных или измерений на соседних водотоках.

Сравнение многолетнего хода характеристик стока наносов рассматриваемых рек с другими реками азиатской части страны [20] и, в частности, в бассейне соседнего Алдана [21], показывает существенно меньшее его снижение у рек верхней части бассейна Индигирки. Причин несколько. Во-первых, здесь не было повсеместного сокращения горнодобывающей деятельности, и в XXI в. она начала быстро восстанавливаться. Кроме того, доля открытых разработок с большими объемами переработки пород с низким содержанием металла была и остается высокой (см. выше). Во-вторых, прекращение добычи россыпного золота устраняет лишь прямое ее воздействие на сток наносов. Оставшиеся после разработок отвалы пустой породы, хвостохранилища, разрушенный почвенно-растительный покров и ослабленные многолетнемерзлые породы, переработанные русла и др. длительное время (от 5–10 лет) продолжают увеличивать сток наносов [25, 32]. В-третьих, при таких высоких величинах мутности воды и темпах плановой деформации русел, как в бассейне Индигирки, естественные факторы, а именно сток воды и его изменчивость, кратно превышают воздействие разработок.

Заключение

Сток наносов рек в средней части бассейна р. Индигирки с начала 1990-х гг. претерпел значимые изменения: вначале снижение — до середины — второй половины 2000-х гг., после — очень существенное увеличение. В среднем течении реки — на посту Индигирский — первый подпериод длился с 1992 по 2010 г., и сокращение стока наносов составило 31% по сравнению с 1970–1980-ми гг. На р. Эльги, р. Нера и руч. Амбар-Юрюетэ пониженный сток наносов наблюдался соответственно в 1992–2003 гг. (–26%), 1992–2010 гг. (–6%) и 1998–2009 гг. (–33%). Второй подпериод, по сути, “перекрыл” предыдущее снижение: на р. Эльги сток наносов превысил свои величины в 1992–2003 и 1971–1991 гг. на 335 и 220%, руч. Амбар-Юрюетэ (Дунай) — на 250 и 135% по сравнению с 1998–2009 и 1971–1991 гг., р. Артык-Юрях — на 78% по отношению к 1992–2010 гг. Для поста Индигирский, согласно расчетам, в 2011–2022 гг. сток наносов больше на 46%, чем в 1971–1991 гг. Эти изменения содержат как естественную, так и антропогенную составляющие, тогда как серьезных инструментально-методических нарушений в рядах исходных данных не выявлено. Антропогенное воздействие в бассейне Индигирки обусловлено прежде всего добычей золота (в основном верхняя и средняя часть бассейна) и олова (нижняя часть). Ее начало приходится на середину XX в., и она существенно увеличивает сток наносов рек. В 1990-х и 2000-х гг. в горнодобывающей отрасли доминировали негативные процессы (закрытие предприятий, консервация месторождений, снижение объемов добычи и др.), но они объясняют не более 20–40% уменьшения стока наносов в первый подпериод. Остальное обусловлено прежде всего уменьшением

водности рек в августе, когда проходит от 1/4 до 1/3 годового стока наносов местных рек. Тогда как остальные гидроклиматические факторы — увеличение годового стока воды рек, рост температур воздуха и воды, теплового стока и др., наоборот, были благоприятными для интенсификации бассейновой и русловой эрозии и поступления взвесей в речную сеть. Во второй подпериод все факторы были максимально благоприятны для формирования повышенного стока наносов, что и обеспечило его “взрывной” рост.

Дополнительным важным результатом стало успешное сочетание разных методов и источников данных при изучении и оценке антропогенного воздействия на сток наносов, анализе качества стационарных данных наблюдений.

Благодарности

Исследования выполнены в рамках гранта РФФИ № 24-17-00084.

Список литературы

1. Алексеевский Н.И., Сидорчук А.Ю. Ускоренная эрозия в нарушенных горными работами ландшафтах (на примере бассейнов рек Омолая и Яны) // Экологические проблемы эрозии почв и русловых процессов. М., 1992. С. 187–198.
2. Бабич Д.Б., Коротаев В.Н., Магрицкий Д.В., Михайлов В.Н. Нижняя Индигирка: устьевые и русловые процессы. М.: ГЕОС, 2001. 202 с.
3. Батугина Н.С., Ноговицын Р.Р. Добыча золота в Республике Саха (Якутия). Тенденции и перспективы // Минеральные ресурсы России. Экономика и управление. 2021. № 1-6 (175). С. 75–80.
4. Бобровицкая Н.Н. Водноэрозионные процессы на склонах и сток наносов рек в современных условиях // Труды VI Всероссийского гидрологического съезда. М., 2008. С. 228–233.
5. Боровиков В.П. STATISTICA. Искусство анализа данных на компьютере. СПб.: ПИТЕР, 2003. 688 с.
6. ВСН 01-73. Указания по расчету стока наносов. Л., 1973. 28 с.
7. Второй оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. М, 2014. 1018 с.
8. Геоэкологическое состояние арктического побережья России и безопасность природопользования / под ред. Н.И. Алексеевского. М.: ГЕОС, 2007. 585 с.
9. Дедков А.П., Мозжерин В.И. Эрозия и сток наносов на Земле. Казань: Изд-во Казан. ун-та, 1984. 261 с.
10. Ефремов Э.И., Никифорова В.В. Отраслевые особенности и территориальные аспекты развития сырьевой экономики Республики Саха (Якутия). СПб.: “Реноме”, 2014. 224 с.
11. Замана Л.В., Вахнина И.Л. Влияние россыпной золотодобычи на природные комплексы речных долин бассейна р. Амур (Восточное Забайкалье, Россия) // Геосферные исследования. 2020. № 2. С. 83–89.
12. Захарова Т.Г. Изменение качества речных вод в результате развития горнодобывающих предприятий // Антропогенное воздействие на водные ресурсы Якутии. Якутск, 1984. С. 36–39.
13. Золотые реки: Выпуск 1. Амурский бассейн / под ред. Е.А. Симонова. Владивосток: WWF, 2012 г. 120 с.
14. Иванов В.В. Трансформация природных комплексов при недропользовании в условиях Якутии. Новосибирск: Наука, 2015. 248 с.
15. Кадастр к карте наледей Северо-Востока СССР масштаба 1:2000000. Магадан: ЦКТЭ СВ ГУ, 1958. 398 с.

16. Костромин М.В., Юргенсон Г.А., Позлутко С.Г. Проблемы дражной разработки континентальных россыпей. Новосибирск: Наука, 2007. 180 с.
17. Лисицына К.Н. Сток взвешенных наносов Сибири // Тр. ГГИ. 1974. Вып. 210. С. 48–72.
18. Магрицкий Д.В. Факторы и закономерности пространственной и многолетней изменчивости поступления речных наносов в моря Российской Арктики // Вопросы географии. Сер. География полярных регионов. 2016. Вып. 142. С.444–466.
19. Магрицкий Д.В. Климатические изменения на северо-востоке азиатской части России // Материалы V Всероссийской научно-практической конференции “Современные тенденции и перспективы развития гидрометеорологии в России”. Иркутск, 2023. С. 345–353.
20. Магрицкий Д.В. Климатически обусловленные и антропогенные изменения стока взвешенных наносов главных арктических рек Сибири и Дальнего Востока РФ // Труды IV Всероссийской конференции “Гидрометеорология и экология: достижения и перспективы развития”. СПб., 2020. С. 248–253.
21. Магрицкий Д.В. Сток наносов рек бассейна Алдана и горнодобывающая деятельность // Известия РГО. 2023. № 2. С. 73–87.
22. Макарьева О.М., Шихов А.Н., Осташов А.А., Нестерова Н.В. Наледи бассейна р. Индигирка по современным снимкам Landsat и историческим данным // Лед и снег. 2019. Т. 59. № 2. С. 201–212.
23. Макарьева О.М., Шихов А.Н., Землянскова А.А., Алексеев В.Р., Нестерова Н.В., Осташов А.А. Гигантские наледи-тарыны Северо-Востока России по данным Кадастра (1958 г.) и космическим снимкам 1973–2021 гг. // Криосфера Земли, 2023, т. XXVII, № 6, с. 27–39.
24. Матвеев А.И., Еремеева Н.Г. Технологическая оценка месторождений олова Якутии. Новосибирск: акад. Изд. “Гео”, 2011. 119 с.
25. Миронова С.И. Результаты научно-практических исследований нарушенных земель Якутии // 2021. № 5. С. 128–132.
26. Наставления гидрометеорологическим станциям и постам. Выпуск 6. Часть III. Составление и подготовка к печати гидрологического ежегодника. Л., 1958. 290 с.
27. Научно-прикладной справочник: Многолетние колебания и изменчивость водных ресурсов и основных характеристик стока рек РФ. СПб., 2021. 190 с.
28. Ресурсы поверхностных вод СССР. Том 17. Лено-Индигирский район. Л.: Гидрометеоздат, 1972. 652 с.
29. СКИОВО. Схема комплексного использования и охраны водных объектов бассейна р. Индигирка. Книга 1. М.: ООО “ВЕД”, 2011. 196 с.
30. Сток наносов, его изучение и географическое распределение / под общ. ред. А.В. Караушева. Л.: Гидрометеоздат, 1977. 240 с.
31. 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. Том 4. № 3. С. 251–269.
32. Чалов С.Р., Прокопьева К.Н., Школьный Д.И., Цыпленков А.С. Воздействие отработанных месторождений россыпной платины на речную систему р. Вывенки (Камчатский край) // Известия ИГУ. 2023. Том 45. С. 127–149.
33. Якутия. М.: Наука, 1965. 467 с.
34. Costard F., Dupeyrat L., Gautier E., Carey-Gailhardis E. Fluvial thermal erosion investigations along a rapidly eroding river bank: Application to the Lena River (Central Siberia) // Earth Surf. Process. Landforms. 2003. No 28. Pp. 1349–1359.

35. Dogliotti A.I., Ruddick K.G., Nechad B., Doxaran D., Knaeps E. A single algorithm to retrieve turbidity from remotely-sensed data in all coastal and estuarine waters // *Remote Sensing of Environment*. 2015. Vol. 156. Pp. 157–168. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2014.09.020>
36. Klein K.P., Lantuit H., Heim B., Doxaran D., Juhs B., Nitze I., Walch D., Poste A., Søreide Janne E. The Arctic Nearshore Turbidity Algorithm (ANTA) — A multi sensor turbidity algorithm for Arctic nearshore environments // *Science of Remote Sensing*. 2021. Vol. 4. <https://doi.org/10.1016/j.srs.2021.100036>
37. Magritsky D.V., Vasilenko A.N., Frolova N.L. and Shevchenko A.I. Temporal and spatial patterns of changes in thermal regime of the rivers in the Northeast of the Asian part of Russia. 1. Assessment of Changes in the Water Temperature // *Water Resources*. 2023 (a). Vol. 50, No. 2. Pp. 190–201.
38. Magritsky D.V., Vasilenko A.N., Frolova N.L. Temporal and spatial patterns of changes in thermal regime of the rivers in the Northeast of the Asian part of Russia. 2. Changes in the Heat Flux // *Water Resources*. 2023(б). Vol. 50. No. 2. Pp. 202–214.
39. Shikhov A., Iyushina P., Makarieva O., Zemlianskova A., Mozgina M. Satellite-based mapping of gold-mining-related land-cover changes in the Magadan Region, Northeast Russia // *Remote Sensing*. 2023. Vol. 15. No 14: 3564.
40. 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. Pp. 702–713.
41. Streletskiy D.A., Maslakov A., Grosse G., Shiklomanov N.I., Farquharson L., Zwieback S., Iwahana G., Bartsch A., Liu Liu, Strozzi T., Lee H., Debolskiy M.V. Thawing permafrost is subsid-ing in the Northern Hemisphere- review and perspectives // *Environmental Research Letters*. 2025. Vol. 20. No 1. Pp. 1–16.
42. Tao H., Song K., Wen Z., Liu G., Shang Y., Fang C., Wang Q. Remote sensing of total suspended matter of inland waters: Past, current status, and future directions // *Ecological Informatics*. 2025. Vol. 86. <https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2025.103062>
43. Vasilenko A., Frolova N., Grigoriev V.Y., Magritsky D., Shevchenko A., Winde F. Spatio-temporal variability of water temperature of arctic rivers in Russia over the past 60 years // *Appl. Sci*. 2024. No 14:10942. Pp. 1–27.
44. Vasilenko A.N., Magritsky D.V., Frolova N.L., Shevchenko A.I. Features of a long-term heat flux formation of the large Russian Arctic rivers and its transformations in estuaries under the influence of climate-induced and dam-induced effects // *Geography, Environment, Sustainability*. 2022. No 4(15). Pp. 158–170.
45. <http://atlaspacket.vsegei.ru/#ab5af961d7b653251> — открытая Геоинформационная система: Атлас “Недра России” (дата обращения: 02.11.2023).
46. <https://minpriroda.sakha.gov.ru/> — официальный сайт Министерства экологии, природопользования и лесного хозяйства Республики Саха (Якутия) (дата обращения: 21.03.2025).
47. <https://earthengine.google.com/> — интернет-платформа Google Earth Engine (дата обращения: 27.03.2025).
48. <http://hydroweb.meteo.ru> — Информационный портал «Гидрологическая сеть Росгидромета и Белгидромета. Реки, каналы, озера и водохранилища» (дата обращения: 27.03.2025).
49. <https://gold.lprime.ru> — ПРАЙМ ЗОЛОТО — Вестник золотопромышленника, отраслевой портал агентства “Прайм” (дата обращения: 07.07.2025).

Natural and Anthropogenic Changes in River Suspended Sediment Runoff in the Indigirka River Basin

D.V. Magritsky*, D.I. Shkolnyi, P.G. Ilyushina

Faculty of Geography, Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

**E-mail: magdima@yandex.ru*

Received 17.04.2025

Revised 09.07.2025

Accepted 25.07.2025

The hydrometeorological conditions of river flow formation and the state of permafrost in the Indigirka River basin have changed since the 1990s. An increase of water runoff in the basin (by 20% or less) and water temperature (by 0.5–1°C) was a reaction to these changes. Therefore, an increase in sediment yield was to be expected. But that didn't happen. It decreased by 6–33% in the 1990s and 2000s. But, subsequently, sediment yield increased by 50–220%. The reasons for the lack of positive dynamics could be negative processes in the mining industry since the 1990s, as well as changes in the monitoring system. Therefore, the objectives of the study were to analyze the gauge hydrological data, the long-term dynamics of water and sediment runoff, the stream temperature of rivers in the Indigirka River basin, the features of local mining, and the assessment of the contribution of anthropogenic and natural factors to the long-term variability of sediment runoff. Materials from 22 hydrological gauges in the Indigirka basin, satellite images, and various mining industry data were the information basis of this research. The rivers and areas in the Indigirka River basin affected by mining have been identified. The analytical links between the annual sediment runoff and its hydrological factors were substantiated. It was found that the negative processes in the mining industry at the turn of the 20th and 21st centuries explain less than 20–40% of the decrease of sediment runoff, the rest of the decrease in runoff is due to natural hydrological changes. After, a significant increase in sediment runoff was provided by both hydrometeorological and anthropogenic factors. For the first time, a comprehensive analysis of the reliability of stationary observation data has been carried out; a GIS of developed deposits and disturbed floodplain-channel complexes has been created.

Keywords: river, gauging station, monitoring, water and sediment runoff, mining, long-term changes

References

1. Alekseevskij N.I., Sidorchuk A.Ju. Uskorennaja jerozija v narushennyh gornymi robotami landshaftah (na primere bassejnov rek Omoloja i Jany) // Jekologicheskie problemy jerozii pochv i ruslovyh processov. M., 1992. S.187–198.
2. Babich D.B., Korotaev V.N., Magriczkij D.V., Mikhajlov V.N. Nizhnaya Indigirka: ust'evy'e i ruslovy'e processy'. M.: GEOS, 2001. 202 s.
3. Batugina N.S., Nogovicyn R.R. Doby'cha zolota v Respublike Saxa (Yakutiya). Tendencii i perspektivy' // Mineral'ny'e resursy' Rossii. E'konomika i upravlenie. 2021. № 1–6 (175). S. 75–80.
4. Bobroviczskaya N.N. Vodnoe'rozionny'e processy' na sklonax i stok nanosov rek v sovremenny'x usloviyax // Trudy' VI Vserossijskogo gidrologicheskogo s'ezda. M., 2008. S. 228–233.
5. Borovikov V.P. STATISTICA. Iskusstvo analiza danny'x na komp'yutere. SPb.: PITER, 2003. 688 s.
6. VSN 01-73. Ukazaniya po raschetu stoka nanosov. L., 1973. 28 s.
7. Vtoroj ocenochny'j doklad Rosgidrometa ob izmeneniyax klimata i ix posledstviyax na territorii Rossijskoj Federacii. M, 2014. 1018 s.

8. Geojekologicheskoe sostojanie arkticheskogo poberezh'ja Rossii i bezopasnost' prirodopol'zovaniya / pod red. N. I. Alekseevskogo. M.: GEOS, 2007. 585 s.
9. Dedkov A.P., Mozzherin V.I. E'roziya i stok nanosov na Zemle. Kazan': Izd-vo Kazan. un-ta, 1984. 261 s.
10. Efremov E.I., Nikiforova V.V. Otrasleye osobennosti i territorial'ny'e aspekty' razvitiya sy'r'evoy e'konomiki Respubliki Saxa (Yakutiya). SPb.: "Renome", 2014. 224 s.
11. Zamana L.V., Vaxnina I.L. Vliyanie rossy'pnoj zolotodoby'chi na prirodny'e kompleksty' rechny'x dolin bassejna r. Amur (Vostochnoe Zabajkal'e, Rossiya) // Geosferny'e issledovaniya. 2020. № 2. S. 83–89.
12. Zaharova T.G. Izmenenie kachestva rechny'x vod v rezul'tate razvitiya gornodobyvajushhih predpriyatij // Antropogennoe vozdejstvie na vodnye resursy Jakutii. Jakutsk, 1984. S. 36–39.
13. Zoloty'e reki: Vy'pusk 1. Amurskij bassejn / pod red. E. A. Simonova. Vladivostok: WWF, 2012 g. 120 s.
14. Ivanov V.V. Transformacija prirodny'x kompleksov pri nedropol'zovanii v uslovijah Jakutii. Novosibirsk: Nauka, 2015. 248 s.
15. Kadastr k karte naledej Severo-Vostoka SSSR masshtaba 1:2000000. Magadan: CzKTE' SV GU, 1958. 398 s.
16. Kostromin M.V., Yurgenson G.A., Pozlutko S.G. Problemy' drazhnoj razrabotki kontinental'ny'x rossy'pej. Novosibirsk: Nauka, 2007. 180 s.
17. Lisicya K.N. Stok vzveshenny'x nanosov Sibiri // Tr. GGI. 1974. Vy'p. 210. S. 48–72.
18. Magriczkij D.V. Faktory' i zakonomernosti prostranstvennoj i mnogoletnej izmenchivosti postupleniya rechny'x nanosov v morya Rossijskoj Arktiki // Voprosy' geografii. Ser. Geografija pol'yarny'x regionov. 2016. Vy'p. 142. S. 444–466.
19. Magriczkij D.V. Klimaticheskie izmeneniya na severo-vostoke aziatskoj chasti Rossii // Materialy' Vserossijskoj nauchno-prakticheskoy konferencii "Sovremennye tendencii i perspektivy' razvitiya gidrometeorologii v Rossii". Irkutsk, 2023. S. 345–353.
20. Magriczkij D.V. Klimaticheski obuslovlennye i antropogennye izmeneniya stoka vzveshenny'x nanosov glavny'x arkticheskix rek Sibiri i Dal'nego Vostoka RF // Trudy IV Vserossijskoj konferencii "Gidrometeorologija i jekologija: dostizhenija i perspektivy razvitiya". SPb., 2020. S. 248–253.
21. Magriczkij D.V. Stok nanosov rek bassejna Aldana i gornodoby'vayushhaya deyatel'nost' // Izvestiya RGO. 2023. № 2. S. 73–87.
22. Makar'eva O.M., Shixov A.N., Ostashov A.A., Nesterova N.V. Naledi bassejna r. Indigirka po sovremennym snimkam Landsat i istoricheskim dannym // Led i sneg. 2019. T. 59. № 2. S. 201–212.
23. Makar'eva O.M., Shixov A.N., Zemlyanskova A.A., Alekseev V.R., Nesterova N.V., Ostashov A.A. Gigantskie naledi-tary'ny' Severo-Vostoka Rossii po dannym Kadastra (1958 g.) i kosmicheskim snimkam 1973–2021 gg. // Kriosfera Zemli, 2023, t. XXVII, № 6, s. 27–39.
24. Matveev A.I., Eremeeva N.G. Texnologicheskaya ocenka mestorozhdenij olova Yakutii. Novosibirsk: akad. Izd. "Geo", 2011. 119 s.
25. Mironova S.I. Rezul'taty' nauchno-prakticheskix issledovanij narushenny'x zemel' Yakutii // 2021. № 5. S. 128–132.
26. Nastavleniya gidrometeorologicheskimi stanciyami i postami. Vy'pusk 6. Chast' III Sostavlenie i podgotovka k pečati gidrologicheskogo ezhegodnika. L., 1958 g. 290 s.
27. Nauchno-prikladnoj spravochnik: Mnogoletnie kolebanija i izmenchivost' vodny'x resursov i osnovny'x harakteristik stoka rek RF. SPb., 2021. 190 s.
28. Resursy' poverxnostny'x vod SSSR. Tom 17. Leno-Indigirskij rajon. L.: Gidrometeoizdat, 1972. 652 s.
29. SKIOVO. Sxema kompleksnogo ispol'zovaniya i ohrany' vodny'x ob'ektov bassejna r. Indigirka. Kniga 1. M.: OOO "VED", 2011. 196 s.
30. Stok nanosov, ego izuchenie i geograficheskoe raspredelenie / pod obshh. red. A.V. Karasheva. L.: Gidrometeoizdat, 1977. 240 s.
31. Frolova N.L., Magriczkij D.V., Kireeva M.B., Grigor'ev V.Yu., Gel'fan A.N., Sazonov A.A., Shevchenko A.I. Stok rek Rossii pri proisxodyashhix i prognoziруemy'x izmeneniyax klimata: obzor

publikacij. 1. Ocenka izmenenij vodnogo rezhima rek rossii po danny'm nablyudenij // Vodny'e resursy. 2022. Tom 4. № 3. S. 251–269.

32. Chalov S.R., Prokop'eva K.N., Shkol'nyj D.I., Cyplenkov A.S. Vozdejstvie otrabotanny'x mestorozhdenij rossy'pnoj platiny' na rechnuyu sistemu r.Vy'venki (Kamchatskij kraj) // Izvestiya IGU. 2023. Tom 45. S. 127–149.

33. Yakutiya. M.: Nauka, 1965. 467 s.

34. Costard F., Dupeyrat L., Gautier E., Carey-Gailhardis E. Fluvial thermal erosion investigations along a rapidly eroding river bank: Application to the Lena River (Central Siberia) // Earth Surf. Process. Landforms. 2003. No. 28. Pp. 1349–1359.

35. Dogliotti A.I., Ruddick K.G., Nechad B., Doxaran D., Knaeps E. A single algorithm to retrieve turbidity from remotely-sensed data in all coastal and estuarine waters // Remote Sensing of Environment. 2015. Vol. 156. Pp. 157–168. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2014.09.020>

36. Klein K.P., Lantuit H., Heim B., Doxaran D., Juhls B., Nitze I., Walch D., Poste A., Søreide Janne E. The Arctic Nearshore Turbidity Algorithm (ANTA) — A multi sensor turbidity algorithm for Arctic nearshore environments // Science of Remote Sensing. 2021. Vol. 4. <https://doi.org/10.1016/j.srs.2021.100036>

37. Magritsky D.V., Vasilenko A.N., Frolova N.L. and Shevchenko A.I. Temporal and spatial patterns of changes in thermal regime of the rivers in the Northeast of the Asian part of Russia. 1. Assessment of Changes in the Water Temperature // Water Resources. 2023 (a). Vol. 50, No. 2. Pp. 190–201.

38. Magritsky D.V., Vasilenko A.N., Frolova N.L. Temporal and spatial patterns of changes in thermal regime of the rivers in the Northeast of the Asian part of Russia. 2. Changes in the Heat Flux // Water Resources. 2023(6). Vol. 50. No. 2. Pp. 202–214.

39. Shikhov A., Ilyushina P., Makarieva O., Zemlianskova A., Mozgina M. Satellite-based mapping of gold-mining-related land-cover changes in the Magadan Region, Northeast Russia // Remote Sensing. 2023. Vol. 15. No. 14: 3564.

40. 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. Pp. 702–713.

41. Streletskiy D.A., Maslakov A., Grosse G., Shiklomanov N.I., Farquharson L., Zwieback S., Iwahana G., Bartsch A., Liu Liu, Strozzii T., Lee H., Debolskiy M.V. Thawing permafrost is subsiding in the Northern Hemisphere—review and perspectives // Environmental Research Letters. 2025. Vol. 20. No. 1. Pp. 1–16.

42. Tao H., Song K., Wen Z., Liu G., Shang Y., Fang C., Wang Q. Remote sensing of total suspended matter of inland waters: Past, current status, and future directions // Ecological Informatics. 2025. Vol. 86. <https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2025.103062>

43. Vasilenko A., Frolova N., Grigoriev V.Y., Magritsky D., Shevchenko A., Winde F. Spatio-temporal variability of water temperature of arctic rivers in Russia over the past 60 years // Appl. Sci. 2024. No 14:10942. Pp. 1–27.

44. Vasilenko A.N., Magritsky D.V., Frolova N.L., Shevchenko A.I. Features of a long-term heat flux formation of the large Russian Arctic rivers and its transformations in estuaries under the influence of climate-induced and dam-induced effects // Geography, Environment, Sustainability. 2022. No 4(15). Pp. 158–170.

45. <http://atlaspacket.vsegei.ru/#ab5af961d7b653251> — open Geoinformation system: Atlas “The Bowels of Russia”.

46. <https://minpriroda.sakha.gov.ru/> — official website of the Ministry of Ecology, Nature Management and Forestry of the Republic of Sakha (Yakutia).

47. <https://earthengine.google.com/> — Google Earth Engine Internet platform (accessed: 27.03.2025).

48. <http://hydroweb.meteo.ru> — The information portal “The hydrological network of Roshydromet and Belhydromet. Rivers, canals, lakes and reservoirs” (accessed:27.03.2025).

49. <https://gold.lprime.ru> — PRIME GOLD — Bulletin of the Gold industrialist, the industry portal of the Prime agency (accessed 07.07.2025).