



УДК 556.535.6(571.66)

<https://doi.org/10.26516/2073-3402.2023.45.127>

Воздействие отработанных месторождений россыпной платины на речную систему р. Вывенки (Камчатский край)

С. Р. Чалов*

*Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, г. Москва, Россия
Всероссийский научно-исследовательский институт рыбного хозяйства и океанографии
(ВНИРО), г. Москва, Россия*

К. Н. Прокопьева, Д. И. Школьный, А. С. Цыпленков

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

Аннотация. Рассматривается одна из основных причин воздействия открытых россыпных месторождений на речные экосистемы – поступление взвесей, наблюдающееся и после прекращения добычи полезных ископаемых. Дается оценка динамики нарушенных земель, а также определяются масштабы поступления наносов в русловую сеть с территории отработанных горнодобывающих участков россыпной платины водотоков, расположенных на притоках р. Вывенки – ручьев Ветвистый, Пенистый, Ледяной, Южный и р. Левтыринываям. На основе совмещения натуральных и спутниковых данных анализируется режим поступления взвесей и их основной источник – деформации берегов руслоотводов на территории горнодобывающих предприятий. Общая площадь нарушенных территорий в бассейне р. Вывенки в результате открытой разработки россыпной платины на 2021 г. оценена величиной 19,2 км², что соответствует 0,15 % площади водосбора реки. В пределах нарушенных площадей в среднем до 75 % свободно от растительного покрова, что увеличивает поступление взвесей. Наибольшие объемы поступления наносов с территории бассейнов рек, нарушенных горнодобывающей деятельностью, наблюдаются в 2018 г. при прохождении максимальных расходов воды весеннего половодья. Излагаются результаты исследования продолжительного техногенного воздействия на речные экосистемы, проявляющиеся в изменении характеристик речного стока (снижение водности рек вплоть до полного пересыхания водотоков), активизации русловых деформаций (в том числе с образованием водопадов, прорывами дамб и стенок руслоотводов, размывами техногенных поверхностей и илоотстойников) и поступлении значительных объемов взвеси в русла рек и их заилении.

Ключевые слова: русловые деформации, поверхностный смыв, шлейфы мутности, россыпные месторождения, открытые разработки, Камчатка.

Благодарности. Исследование выполнено по плану НИР (ГЗ) кафедры гидрологии суши географического факультета МГУ им. М. В. Ломоносова (№ 121051400038-1). Анализ дистанционных данных проводился в рамках программы развития Междисциплинарной научно-образовательной школы Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова «Будущее планеты и глобальные изменения окружающей среды».

Для цитирования: Воздействие отработанных месторождений россыпной платины на речную систему р. Вывенки (Камчатский край) / С. Р. Чалов, К. Н. Прокопьева, Д. И. Школьный, А. С. Цыпленков // Известия Иркутского государственного университета. Серия Науки о Земле. 2023. Т. 45. С. 127-149. <https://doi.org/10.26516/2073-3402.2023.45.127>

Original article

Assessment of the Impact of Open-Cast Mining on the Vyvenka River Basin (Kamchatka Krai)

S. R. Chalov*

*Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russian Federation**Russian Federal Research Institute of Fisheries and Oceanography, Moscow, Russian Federation*

K. N. Prokopeva, D. I. Shkolnyi, A. S. Tsyplenkov

Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russian Federation

Abstract. Geological exploration and mining operations have been conducted in the Vyvenka River basin on the Seinav-Galmoenan platinum deposit since 1994. The majority of the explored and prospective reserves are located in the valleys of spawning salmon tributaries, raising concerns about the environmental impact of mining activities. Despite the cessation of platinum mining in the 2010s, there has been a continuing impact on the river system in recent years, with extensive sediment plumes forming along the length of the rivers. This research aims to assess the dynamics of disturbed lands and determine the scale of sediment export into the river network from the territory of the ore mining sites of Vetvisty, Penisty, Ledyanoy, Yuzhny, and Levtyrinivayam. Field and satellite data were combined to analyze the suspended sediment discharge regime and the main sediment sources, i.e., the riverbank deformations along the mining sites. As of 2021, the total area of disturbed lands in the Vyvenka basin due to open-cast platinum mining is estimated to be 19.2 km² corresponding to 0.15 % of the area of the Vyvenka River basin. Up to 75 % of the disturbed area consists of bare lands, making them prone to surface erosion. The largest amounts of sediment influx from the mining-affected river basins were observed in 2018 during the unevenly high freshet. The increased sediment discharge was due to the overflow of sedimentation ponds in certain areas. The study results indicate a prolonged anthropogenic impact on river ecosystems, manifested in the change of hydrological regime, activation of channel deformations, and the increased sediment influx to the river network from ore mining sites.

Keywords: fluvial processes, soil erosion, plume, placer deposits, open-cast mining, Kamchatka.

For citation: Chalov S.R., Prokopeva K.N., Shkolnyi D.I., Tsyplenkov A.S. Assessment of the Impact of Open-Cast Mining on the Vyvenka River Basin (Kamchatka Krai). *The Bulletin of Irkutsk State University. Series Earth Sciences*, 2023, vol. 45, pp. 127-149. <https://doi.org/10.26516/2073-3402.2023.45.127> (in Russian)

Введение

Разработка месторождений полезных ископаемых на водосборах рек приводит к преобразованию окружающей среды и росту экологической напряженности в водотоках [Hydrochemical evaluation ... , 2017; Cao, Pender, 2004; Conceptual model ... , 2005; Environmental impact ... , 2011; Mossa, James, 2013; Impacts of gold ... , 2005; Zamana, Vakhnina, 2022; Виноградова, Хмелева, 2009]. На Камчатке это наиболее ярко проявляется в воздействии на популяцию лососей, связанном с растущими темпами загрязнения в условиях активного освоения минерально-сырьевой базы края, и в то же время прекращением отработки значительных по площади месторождений – например, в Сейнав-Гальмознанском горном массиве. Это второе в России по величине запасов месторождение россыпной платины расположено на северо-востоке Камчатки в бассейне р. Вывенки и эксплуатировалось с

1994 по 2015 г. [Зайцев, 2002; Формирование стока наносов ... , 2015] с короткими периодами очагового восстановления добычи в небольших объемах после 2015 г.

Ежегодный мониторинг за изменчивостью водного и твердого стока, водными биологическими ресурсами на притоках р. Вывенки и участках разработок проводился с момента начала добычи по 2014 г. В 1998–2002 гг. на реках Ветвей и Левтыринываям была заложена постоянная сеть наблюдательных полигонов. В последующие годы мониторинг проводился совместно специалистами МГУ им. М. В. Ломоносова и ВНИРО по расширенной программе и включал в себя гидроэкологический, гидробиологический и ихтиологический блоки. За этот период были собраны уникальные гидролого-геохимические данные о влиянии горнодобывающей деятельности на загрязнение рек бассейна р. Вывенки. Они показали, что основным фактором воздействия добычи россыпной платины на речные экосистемы при ведении открытых разработок в речных долинах является поступление минеральных частиц (в первую очередь – очень малой крупности, что характерно для участков открытой добычи [Reconstructing a sediment ... , 2015; Матвеев, Волкова, 1981]). Были установлены пороговые значения мутности воды в реках в диапазоне 25–35 мг/л, при которых наблюдается деградация сообществ лососевых [Чалов, Есин, Леман, 2019]. Систематическое превышение этих значений привело к негативным последствиям для экосистемы лососевых рыб [Чалов, Леман, 2014]. При этом генетический анализ формирования стока наносов показал, что до 80 % поступающих в речную сеть взвесей формируются на участках активных русловых деформаций в пределах спрямленных участков рек (руслоотводов), где за счет увеличения уклонов русла и переброски стока вдоль легко размываемых отвалов пород происходят разрушение берегов и направленное врезание [Формирование стока наносов ... , 2015].

Начиная с 2015 г. эксплуатация горнодобывающих участков (ГДУ) была почти полностью прекращена без проведения рекультивационных мероприятий. На сегодняшний день законсервированные участки добычи, через которые протекают водотоки, представляют собой лишенные растительности формы техногенного рельефа без восстановленных условий для нормализации поверхностного стока, что приводит к продолжающемуся негативному техногенному воздействию на окружающую среду. Одновременно в условиях сохранения антропогенно-преобразованных русел (руслоотводов) сохраняется основной фактор поступления взвесей – размывы дна и берегов рек. Масштабы эксплуатации месторождения и отсутствие рекультивации значительной части нарушенных земель привело к снижению рыбохозяйственного значения ряда водотоков на фоне обеднения состава ихтиофауны в бассейне Вывенки [Введенская, Улатов, 2015]. В экологических обзорах приводятся данные о продолжающемся загрязнении водных объектов в районе месторождения в 2020 и 2021 гг., основанные на отдельных спутниковых снимках¹.

Отсутствие объективных данных о состоянии водных объектов определяет актуальность проведения современной оценки уровня загрязнения реч-

¹ Маренин К. Экологи выявили загрязнение водоемов Камчатки. URL: <https://rybak-kamchatky.ru/news/3618-ekologi-vyjavili-zagraznenie-vodoyomov-kamchatki.html> (дата обращения: 04.06.2023).

ной сети бассейна р. Вывенки. В 2022 г. сотрудниками географического факультета МГУ проведено исследование с целью ретроспективной оценки состояния речных экосистем лососевых водотоков на месторождениях россыпной платины Сейнав-Гальмоэнанского горного узла с акцентом на интегральный параметр воздействия: поступление взвесей и его источники. В условиях нерегулярности мониторинговых и отсутствия сетевых гидрологических наблюдений на этих реках основой оценки стали не только натурные исследования в бассейне р. Вывенки в период 2001–2021 гг., но и данные дистанционного зондирования. Целью этой статьи является комплексная оценка масштаба влияния деятельности горнодобывающих предприятий по разработкам россыпей на трансформацию факторов изменения стока наносов. В работе поставлены следующие задачи:

1. Анализ динамики нарушенных поверхностей водосборов ручьев Ветвистый, Пенистый, Ледяной, Южный и р. Левтыринываям по спутниковым данным.
2. Количественная оценка выноса материала с территорий разработок в 2014–2020 гг. с разделением на его источники;
3. Исследование условий формирования шлейфов мутности от притоков р. Вывенки.

Характеристика района исследования

Исследуемые россыпные месторождения административно относятся к Олюторскому району Камчатского края. Вывенка, на водосборе которой находятся участки добычи, является одной из крупнейших рек Корякии. Площадь водосбора реки составляет 13 тыс. км², общая протяженность реки – 395 км. Разработки ведутся на территории Сейнав-Гальмоэнанского горного узла, относящегося к среднему правобережному течению р. Вывенки. ГДУ расположены в долинах малых рек бассейнов Вывенки и ее правобережного притока Ветвея (рис. 1) – Левтыринываям, Янытайлыгинываям и ручьев Ольховый, Ледяной, Сентябрь, Южный, Ветвистый, Пенистый. Река Ветвей впадает в Вывенку в 102 км, р. Левтыринываям – в 114 км, руч. Ольховый – в 122 км от устья с правого берега.

Первой добыча началась на участке Ледяной в 1994 г., он расположен в бассейнах двух левобережных притоков Ветвея – ручьев Сентября и Ледяного. Изначально оба ручья текли по противоположным бортам одной горной долины, но в 2007 г. сток из руч. Ледяного перенаправили в руч. Сентябрь. Ручей Сентябрь в верховьях принимает приток – руч. Осень, в долине которого также находятся отработанные площади. К 2017 г. площадь разработок в долинах этих ручьев составила 4,6 км².

Участок Левтыринываям расположен в верхней и средней частях долины р. Левтыринываям и нижнем участке ее притока – руч. Левый Левтыринываям и разрабатывается с 1995 г. Практически на всем своем протяжении в пределах разработок (около 16 км) река протекает в руслоотводе, правый борт которого является коренным берегом, а левый сложен отвалами отработанной породы. В отдельные периоды времени сток рек на участке перехватывался полностью (в том числе за счет естественной трансформации релье-

фа) и поступал в р. Левтыринываям только за счет просачивания через стенки отвалов. Отведенная в карьеры и илоотстойники вода поступала в ручей Ольховый, протекавший до начала разработок под левым бортом той же долины и протекающий ниже параллельно р. Левтыринываям. К 2013 г. площадь разработок в бассейне р. Левтыринываям составила 10,2 км².

В 1999 г. началась разработка в системе руч. Пенистый, а в 2004 – в системе руч. Ветвистый, где располагаются одноименные ГДУ. Ручьи Пенистый и Ветвистый впадают в р. Янытайлыгинываям, которая, в свою очередь, является левым притоком р. Ветвей. Участки добычи представляют собой разработки, вытянутые вдоль одноименных, отведенных в руслоотводы ручьев. В нижней части участки нарушений выходят в долину приемного водотока. К 2011 г. затронутые разработками площади составили 2,59 и 1,19 км² соответственно.

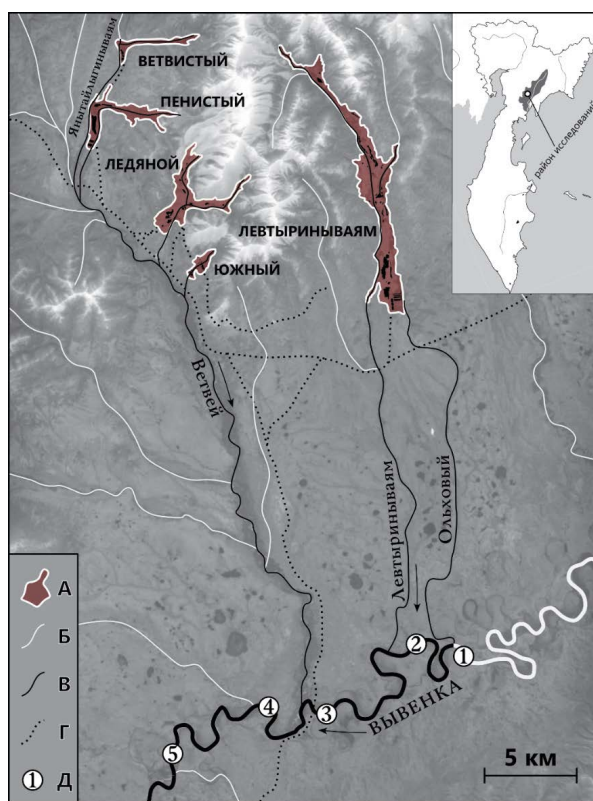


Рис. 1. План-схема территории разработок Сейнав-Гальмознанского горного узла:

А – максимальные площади территорий разработок; русла рек и ручьев: в естественном состоянии (Б) и находящиеся под воздействием от разработок (В); Г – вездеходные дороги и насыпи; Д – участки р. Вывенки, использованные для оценки мутности

Ниже по течению р. Ветвей расположен участок Южный, добыча на котором производилась только в 2007 г. На участке Южный в настоящий мо-

мент ручей проходит через серию карьеров и отстойников, а далее через заболоченную местность течет до р. Ветвей. Площадь нарушенных земель на 2007 г. составляла 0,62 км², этот участок – единственный, на котором была частично выполнена рекультивация.

После 2015 г. горные работы проводились только на ГДУ Ледяной (2017 и 2019 гг.) и Левтыриновьям (2019 г.).

До начала ведения горнодобывающей деятельности в бассейнах изучаемых рек фоновый модуль стока наносов р. Ветвей – левобережного притока, собирающего воды с четырех ГДУ (Ветвистый, Пенистый, Ледяной и Южный), составлял 18 т/(км²·год), по оценке [Формирование стока наносов ... , 2015] и на основании литературных данных [Дедков, Мозжерин, 1984]. Согласно расчетам [Формирование стока наносов ... , 2015], проведенным на основании полевых исследований в период активной добычи (2002–2014), за счет увеличения роли русловой эрозии (51,8–92,9 % – вклад в общий техногенный сток) и сбросов сточных вод (в среднем 14,6 %) в формировании техногенного стока взвесей, модуль стока наносов увеличивается до 26 280 т/(км²·год). Таким образом, установлено, что относительно ненарушенных условий произошло увеличение на 80 % стока взвешенных наносов рек Сейнав-Гальмознанского горного узла, испытывающих воздействие разработки.

Материалы и методы исследований

Для оценки состояния поверхности водосборов в условиях прекращения добычи россыпной платины и влияния деятельности по добыче россыпной платины вдоль русел рек на сток взвешенных наносов привлечены дистанционные методы исследований.

Динамика площади нарушенных земель с начала ведения разработок по настоящее время изучалась с помощью сопоставления разновременных спутниковых снимков. В работе использовались как снимки со средним пространственным разрешением до 30 м (*Landsat 5, 7, 8; Sentinel-2*), так и высокодетаальные снимки с разрешением до 0,8 м (*KH-7 Corona, IKONOS, Formosat, SPOT, IRS P5, Worldview*). База данных из 22 спутниковых снимков охватывает 1973 г. (до начала проведения работ), период интенсивной добычи с 2003 по 2007 гг. (когда были открыты и активно осваивались еще три участка – Пенистый, Ветвистый и Южный), а также содержит снимки за 2013–2021 гг., когда работы на участках были практически прекращены. Также были использованы ортофотопланы участков, построенные по материалам проведенной в 2020 г. съемки с беспилотного летательного аппарата (БПЛА).

На основании дешифрирования ортофотопланов для каждого из участков была определена площадь нарушенной территории, которая включает в себя (рис. 2):

- поверхности отвалов и выровненные поверхности вскрыши;
- старые отвалы в различных стадиях естественной рекультивации (рис. 2, В, Г);

- технические водоемы, пульпоотстойники, русла рек и руслоотводные каналы (рис. 2, Д, Е);
- площадки размещения техники и хозяйственных построек;
- территории, покрытые отложениями в результате сброса пульпы на рельеф (рис. 2, А, Б).

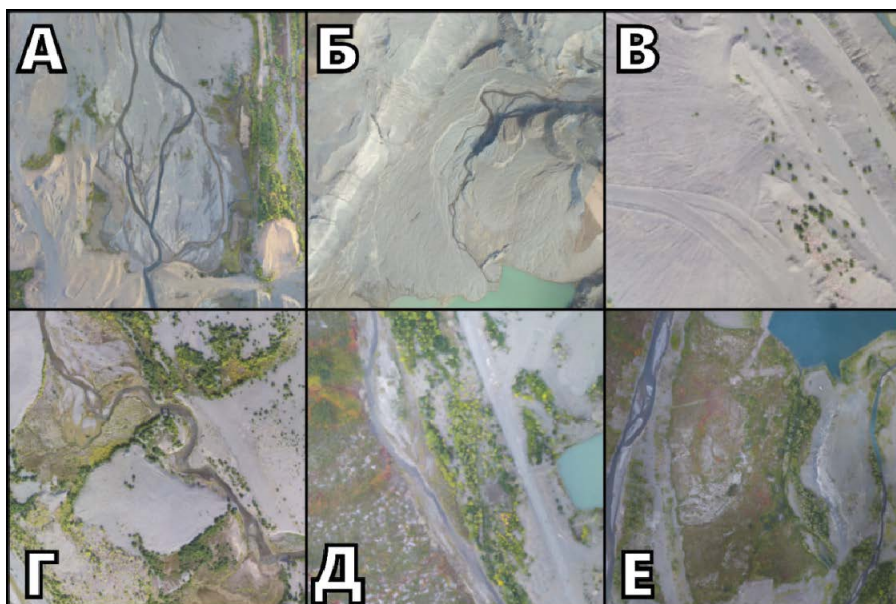


Рис. 2. Примеры типов нарушенных поверхностей (на съемке с БПЛА 2020 г.): техногенные аллювиальные поверхности – полоса блуждания русла р. Левтыринываям в пределах дна одного из эксплуатационных полигонов (карьеров) ниже прорыва руслоотвода на ГДУ Левтыринываям (А) и шлейф выноса на ГДУ Лебяной (Б); отвалы – незаросшие (В) и различных категорий зарастаемости (Г), заросший отвал из материала, вскрытого при создании руслоотвода р. Левтыринываям (Д), частично заросшая поверхность слаборазрушенного участка тундры между отвалами ГДУ Пенистый и отвалами грунта, вскрытого при создании руслоотвода реки Янытайлыгинваям (Е)

Размывы берегов и темпы заиления водоемов оценивались по 8 высокодетальным снимкам за 2004–2021 гг. из собранной базы данных, планово привязанным по опорным точкам на ортофотопланах. Также по данным съемки с БПЛА для участков были построены цифровые модели местности (ЦММ), по которым оценивалась геометрия берегов в створах размыва.

Изменение рельефа оценивалось путем сопоставления опорной ЦММ 2020 г. и ЦММ из архива ArcticDEM² 2012–2017 гг., полученных по стереопарам высокодетальных снимков и имеющих пространственное разрешение не менее 2 м. Привязка ЦММ между собой осуществлялась методом корегистрации [Nuth, Kääb, 2011] при помощи библиотеки `rubov` языка Python.

² ArcticDEM – Polar Geospatial Center. URL: <https://www.pgc.umn.edu/data/arcticdem/> (date of access: 04.05.2023).

Для оценки потенциального поверхностного смыва в пределах нарушенных территорий использовалось универсальное уравнение эрозии почв (RUSLE) [Predicting soil ... , 1997], входными данными для которого стали: для фактора длины и крутизны склонов LS – вышеописанные ЦММ, обработанные по методике [Schmidt, Tresch, Meusburger, 2019]; для фактора эродруемости почв K – расчет по системе уравнений [Williams, 1995] на основании глобальной базы данных SoilGrids [SoilGrids250m: Global ... , 2017]; для фактора эрозионного потенциала осадков R – регрессионная зависимость между измеренными величинами эрозионного потенциала [Ларионов, 1993] и модифицированным индексом Фурньера [Arnoldus, 1980], вычисленным на основании данных 13 метеостанций Камчатки за период с 1958 по 2021 г. Для пересчета потенциальных почвенных потерь ($t/(\text{га}\cdot\text{год})$) в модуль стока наносов, характеризующий поверхностный смыв, использовался коэффициент доставки наносов, оцененный при помощи индекса связности наносов [Geomorphometric assessment ... , 2013].

Для определения гидрологических условий поступления взвешенных веществ в речную сеть р. Вывенки проводилась оценка расходов воды с использованием глобальной гидрологической модели GloFAS-ERA5, основанной на реанализе метеорологических характеристик и представляющей собой ряды среднесуточных расходов за каждый день, начиная с 1979 г., осредненные для ячеек рельефа $0,1^\circ \times 0,1^\circ$ [GloFAS-ERA5 operational ... , 2020]. С помощью этой базы данных, имеющей мелкий масштаб, достоверно оценен сток в створе ниже впадения рек Ветвей и Левтыриновьям. По данным [A global streamflow ... , 2020], в среднем по планете корреляция с наблюдаемыми данными достигает $r = 0,80$ при коэффициенте воспроизведения модели $NSE = 0,67$.

Расчет загрязнения проводился для участка р. Вывенки в районе впадения рек, дренирующих месторождения россыпной платины по спутниковым снимкам Sentinel-2. Была собрана база из 55 снимков с 2016 по 2021 г. на участок р. Вывенки от фонового створа выше впадения рек, дренирующих районы разработок, до створа, расположенного ниже впадения р. Ветвей. Снимки охватывают период открытой воды (май – октябрь) и различные фазы водности. Анализ проводился на основе расчетов мутности воды в пределах репрезентативных участков: 1) р. Вывенка выше впадения руч. Ольховый (осредненное значение мутности по потоку принималось в качестве фонового значения); 2) р. Вывенка в 5,5 км ниже впадения руч. Ольховый; 3) р. Вывенка в 8,5 км ниже впадения р. Левтыриновьям; 4) р. Вывенка в 5 км ниже впадения р. Ветвей; 5) замыкающий створ в 10 км ниже впадения р. Ветвей (см. рис. 1). Общая длина анализируемого участка составила около 36 км.

Расчет осредненных значений мутности осуществлялся с привлечением облачной платформы для геопространственного анализа данных Google Earth Engine. Весовая мутность оценивалась путем преобразования данных красного оптического канала. На первом этапе производился пересчет значений яркости пикселя на снимке в значения отражения на верхней границе атмосферы ρ_{TOA} . Дальнейший переход от значений отражения ρ_{TOA} к значениям

мутности S (мг/л) осуществлялся с применением модели с высокой точностью определения концентрации взвеси, полученной для дельты р. Селенги в 2016 г. с применением спутниковых снимков Sentinel-2 [Тарасов, 2019]. Коэффициент детерминации (R^2) составил 0,95, что говорит об очень высокой связи параметров. Среднее отклонение смоделированных значений от реальных составило 3 мг/л (15 %). Зависимость имеет следующий вид:

$$S = 1082 \cdot \rho_{ТОА} - 15,3. \quad (1)$$

В работе анализировались средние (среднее $S_{расч}$, мг/л), максимальные (максимум $S_{расч}$, мг/л) и минимальные (минимум $S_{расч}$, мг/л) значения мутности, полученные с помощью применения формулы (1). Расчет степени загрязнения ($S_{отн,i}$) р. Вывенки взвесьями, поступающими с Сейнава-Гальмоэнанского горного узла, характеризовался кратностью превышения мутности на участках 2–5 над фоновой мутностью на участке 1 (выше впадения загрязненных рек со стороны разработок), осуществлялся по формуле:

$$S_{отн,i} = \frac{S_i}{S_{фон}}, \quad (2)$$

где S_i – это осредненная мутность по потоку на участках 2, 3, 4, 5, а $S_{фон}$ – осредненная мутность на участке 1 (фоновая мутность). Так, при значениях $S_{отн,i}$ больше 1 – увеличение мутности относительно фоновой, менее 1 – уменьшение мутности относительно фоновой мутности на участке 1.

Результаты и обсуждение

Динамика площади нарушенных земель и их состояния. По результатам дешифрирования снимков общая площадь нарушенных территорий на 2021 г. составляет 19,2 км² (в том числе ГДУ Левтыринываям – 10,2 км², ГДУ Ледяной – 4,6 км², ГДУ Пенистый – 2,6 км², ГДУ Ветвистый – 1,2 км², ГДУ Южный – 0,6 км²), т. е. 0,15 % площади водосбора р. Вывенки. В пределах бассейна р. Ветвей участки занимают около 0,8 %, для р. Янытайлыгинываям – 2 %, для р. Левтыринываям вместе с руч. Ольховый – около 4 %, для более мелких водотоков – до 17 %. Помимо непосредственно нарушенных при добыче территорий, к затронутым участкам (ГДУ) можно отнести также области выноса мелкодисперсного (супеси, суглинки) материала в долинах водотоков или на поверхность тундры (ниже ГДУ Левтыринываям, Ледяной и Пенистый общей площадью до 1 км², оценка ограничена точностью дешифрирования), подъездные грунтовые дороги между ГДУ (суммарной длиной около 58 км и площадью полотна около 0,9 км²).

Изменение затронутой территории соответствует типичному циклу отработки россыпного месторождения [Виноградова, Хмелева, 2009]. Первый этап, для которого характерно постоянное увеличение затронутых площадей в связи с увеличением площади первичной вскрыши, наблюдался с момента начала разработки россыпей до 2007 г. Ежегодный прирост нарушенной территории в этот период составлял 0,6–1,6 км²/год.

Пиковое значение прироста, выбивающееся из ряда, наблюдалось в 2007 г. – за этот сезон были вскрыты породы на 3,3 км² территории. Прирост

составил треть от общей площади нарушений к началу промывочного сезона 2007 г. (рис. 3) и наблюдался на всех участках. Был вскрыт ГДУ Южный, почти вдвое увеличилась площадь ГДУ Пенистый и Ветвистый. Объемы выноса материала, наблюдавшиеся на контрольных створах в пределах разработок и ниже по течению, в эти годы были максимальными за весь период мониторинга.

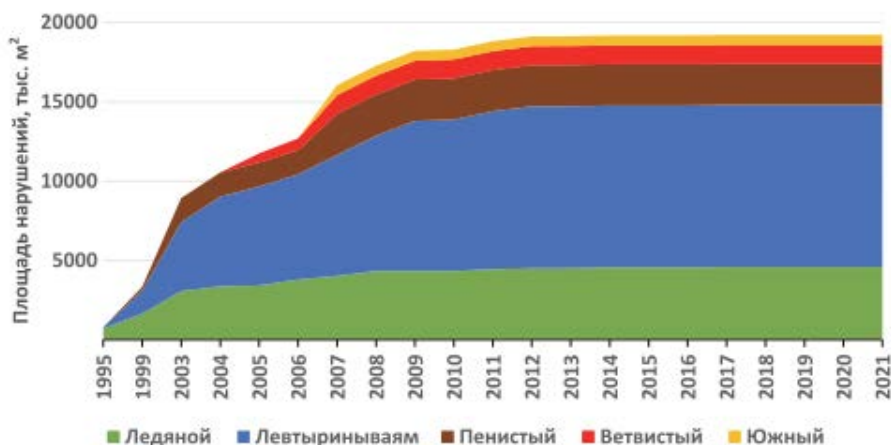


Рис. 3. Кумулятивная площадь нарушенных территорий ГДУ с 1995 по 2021 г.

Для ГДУ Ледяной и Левтыриновьям характерно постепенное развертывание добычи в центре современных границ затронутых территорий, затем в первые годы – быстрый рост в узкой полосе вверх и вниз по течению долин крупнейших водотоков и затем – расширение затронутой площади, в том числе – за счет вскрыши склонов (бортов) основной долины и днищ долин небольших притоков. ГДУ Ветвистый и Южный были полностью вскрыты за 2–3 года – на участке Пенистый сначала была вскрыта долина руч. Пенистый, а впоследствии – оработан нижележащий участок поймы р. Янытайлыгиньям. На ГДУ Ветвистый, наоборот, в первую очередь был вскрыт участок поймы р. Янытайлыгиньям и нижняя часть долины притока, затем продолжилась отработка вверх по течению ручья. После 2009 г. площадь вскрыши была минимальной, добыча в основном происходила за счет повторной промывки уже имеющихся отвалов.

В среднем в пределах участков ведения добычи в настоящее время до 75 % территории занято незаросшими поверхностями старых отвалов (табл. 1). Значительная доля поверхности под отвалами обуславливает интенсивность поверхностного смыва материала за счет ручейковой и склоновой эрозии, возникающей при выпадении дождей и таянии снега. Оценка, выполненная для участков разработок и их бассейнов с помощью уравнения RUSLE, показала, что средний модуль поверхностного смыва с нарушенных территорий составлял от 405 т/(км²·год) на законсервированном участке Пе-

нистый до 816 т/(км²·год) на участке Ледяной в период активной добычи при естественных средних значениях в 413 т/км² (табл. 2). Фоновые значения смыва в бассейне руч. Ледяной за счет большой доли крутых и оголенных склонов с высокими коэффициентами доставки превышают аналогичные значения как для других водосборов, так и для всех территорий ГДУ.

Темпы смыва показали связь с изменчивостью крутизны отвалов, оцененной по ЦММ, из-чего следуют значительные скорости преобразования отвалов естественными эрозийными процессами. При этом на отдельных участках медленное уменьшение средней крутизны склонов отвалов сменяется скачкообразным ростом, что свидетельствует о нивелировании выполаживания, вызванного поверхностным смывом за счет оползней, прорывов и разрушений отвалов технологических водоемов и других естественных эрозийных процессов, происходящих с более высокими темпами. Наблюдается связь и между интенсивностью смыва и долей заросших отвалов. Минимальные темпы закрепления (самозарастания и самовосстановления) наблюдаются на плоских полигонах и межотвальных участках в пределах затронутых долин – в первую очередь, за счет активной деятельности водных потоков и постоянного преобразования территории при аккумуляции мелкодисперсных продуктов смыва, или, наоборот, за счет вымывания мелких частиц из отвалов и преобладания в них гравийно-галечного материала (что характерно для недействующих в течение долгого времени участков). Наиболее быстрые темпы закрепления наблюдаются на отвалах, вскрыша и формирование которых производилось однократно. Первичные признаки естественного самозарастания есть практически на всех отвалах, которые в течение 5–7 лет не изменяли свое положение.

Таблица 1

Доля различных типов техногенной поверхности в процентах от площади участков на 2021 г.

ГДУ \ Доля, %	Аллювиальные поверхности	Отвалы					Водоемы	
		всего, в том числе:	незаросшие	начавшие зарастание	заросшие	под постройками	каскады отстойников	прочие технические
Левтыринываям	10,7	81,5	60,3	10,7	9,8	0,5	0,2	7,6
Ледяной	9,0	79,7	75,4	3,0	1,2	4,3	0,6	6,4
Южный	–	91,8	63,8	11,5	16,5	–	–	8,2
Пенистый	7,1	82,4	64,5	14,7	3,2	–	1,4	9,0
Ветвистый	20,3	78,7	46,4	14,2	18,2	–	0,4	0,6

Таблица 2

Изменение стока взвешенных наносов на территории ГДУ
и их водосборов за отдельные года и в среднем за современный период

ГДУ	Год	Модуль стока взвешенных наносов, т/(км ² -год)			
		Водосбор		Участок	
Ледяной	2016	1291	1159	816	737
	2017	1115		750	
	2020	1071		646	
Пенистый	2013	221	200	638	597
	2015	126		405	
	2020	253		750	
Ветвистый	2015	131	110	614	544
	2020	90		474	
Левтыринываям	2014	167	184	473	496
	2017	197		518	
	2020	188		498	

Перемещающийся в пределах нарушенных территорий материал зачастую не попадает сразу в дренирующий разработку водоток за счет измененной русловой сети и ее замкнутости на искусственные водоемы и карьеры. Для территории разработок характерна значительная изменчивость положения технологических водоемов, как в многолетней перспективе, так и в течение года в связи с постоянной перепланировкой отвалов. Так, согласно глобальной базе данных о динамике водных объектов GSWE (Global Surface Water Explorer)³, технологические водоемы – затопленные нерекультивированные карьеры, полигоны, пруды оборотного водоснабжения, пруды-отстойники и илоотстойники – на различных этапах отработки занимали 23 % от всей затронутой на 2021 г. территории. Наибольшая доля площадей, занятых такими искусственными водоемами, наблюдается на ГДУ Левтыринываям. Их доля площади на каждый момент времени в среднем одинакова и составляла 7–10 % в течение всего периода существования разработок. Стоит отметить, что даже на наиболее долго обрабатывавшихся ГДУ Ледяной и Левтыринываям значительна доля «брошенных» водоемов, не используемых в технологическом цикле и существующих в течение долгого времени с минимальными изменениями конфигурации. Зачастую такие водоемы изолированы от нижерасположенных участков гидрографической сети, в связи с этим на них отражаются (и хорошо дешифрируются на спутниковых снимках) естественные изменения: бесконтрольный приток воды, заиление, переполнение, сброс при прорывах руслоотводов и стенок. Например, на действующем участке Ледяной последние 10 лет часть водоемов была неизменна, а другая постоянно меняла свою конфигурацию. Вероятнее всего, это связано не с технологическим использованием, а с уровнем наполнения атмосферными осадками, или с прорывами руслоотводов в каждый конкретный год или с фазами гидрологического режима, в течение которых был сделан тот или иной спутниковый снимок.

³ Global Surface Water Explorer. URL: <https://global-surface-water.appspot.com/> (date of access: 01.05.2023).

Такие водоемы в нормальных (безаварийных) условиях собирают основную часть твердого стока с территории. Например, сравнение ЦММ за 2017–2020 гг. на нижнюю часть действовавшего в этот период ГДУ Ледяной показало аккумуляцию в замкнутых карьерах материала общим объемом около 5 млн т, что соответствует модулю стока наносов в 26,1 тыс. т/км², что сильно превышает приведенные оценки для темпов поверхностного смыва и, скорее, связано с поступлением материала (пульпы) с участков промывки. Аналогичные темпы накопления могут наблюдаться и в результате естественных процессов на отработанных участках – например, скорость заполнения водоемов на ГДУ Пенистый, вызванная прорывом руслоотвода выше по течению, определенная по сопоставленным снимкам, соответствует накоплению от 4 до 18,5 тыс. т/год материала (в зависимости от глубины водоемов под фронтом аккумуляции, оценить которую дистанционными методами невозможно).

Характер рельефа территории разработок определяет современные темпы загрязнения. Так, минимальная доля заросших отвалов горных пород косвенно определяет высокие темпы смыва. Сопоставление ЦММ на территорию участков разработок показало значительные изменения поверхности в период после 2012 г., связанные с перераспределением материала по их территории и выколаживанием склонов отвалов. При этом на действовавшем в данный период ГДУ Ледяной изменения наиболее значительны и связаны с аккумуляцией поступающего с участков промывки материала на пойме ручьев и в чашах спущенных технологических водоемов. Общее количество аккумуляровавшегося в нижней части участка материала за 2012–2017 г. составило около 5 млн т, что соответствует техногенно-измененному среднегодовому модулю стока наносов 26 100 тыс. т/км² – при этом доля склоновой эрозии от этого объема не превышает 5 %. В 2017–2020 гг. столь значимых изменений ни на одном из участков не наблюдалось.

В условиях естественной трансформации поверхности разработок зафиксировано медленное уменьшение средней крутизны склонов отвалов (при отсутствии резких изменений в пределах), сменяющееся скачкообразным ростом, что свидетельствует о выколаживании склонов за счет поверхностного смыва, объемы которого нивелируются за счет оползневых явлений, прорывов и разрушений стенок технологических водоемов, а также формированию новых русел временных водотоков в пределах замкнутых бессточных участков на нарушенных территориях.

Сеть оставшихся на территории разработок технологических водоемов в настоящее время снижает загрязнение за счет накопления ила и более крупных наносов. Например, скорость заполнения водоемов на ГДУ Пенистый, вызванная прорывом руслоотвода выше по течению в 2016 г., определенная по сопоставленным снимкам, соответствует накоплению от 4 до 18,5 тыс. т/год материала (в зависимости от глубины водоемов под фронтом аккумуляции, оценить которую дистанционными методами невозможно). Полное заполнение технологических водоемов может произойти в ближайшие годы, в результате чего загрязнители будут в полном объеме транзитом поступать ниже по течению.

Оценка режима русловых деформаций в пределах руслоотводов. Создание антропогенно-преобразованных русел, связанных с переброской стока за пределы участков вскрышных работ, оценивалось как основной фактор загрязнения русловой сети взвесями. В настоящее время на территории ГДУ сложилась сложная структура русловой сети с высоким темпом деформаций, сохраняющимися и после прекращения добычи. В процессе увеличения площадей разработок происходило смещение руслоотвода на склон долины, вследствие чего изменились локальные базисы эрозии. Бровки бортов руслоотводов, являющиеся бортами долины, закреплены растительностью всего лишь на 70 % протяженности (по съемке БПЛА 2020 г.), в то же время подошвы внутренних бортов руслоотводов подвержены перманентным размывам почти целиком не закреплены растительностью.

Сопоставление спутниковых снимков позволило выделить участки наиболее активных размывов на всех ГДУ. На участке Ледяной одноименный ручей, перенесенный из руслоотвода к отвалам, сформировал развивающуюся излучину на выположенном участке. Ее развитие было спровоцировано спуском технологического водоема, находящегося выше по течению. Участок интенсивного размыва на русле р. Янытайлыгинываям в пределах участка Пенистый (рис. 4, А) расположен в месте отведения стока в крайнюю правую протоку и прижима отвалами к коренному правому берегу долины. Река здесь начала формировать побочные массивы, активно смещающиеся вниз по течению и провоцирующие размывы берегов. Сужение естественного русла на данном участке привело к повышению уклонов, в результате чего большая часть поступающего в результате размыва материала выносятся вниз по течению.

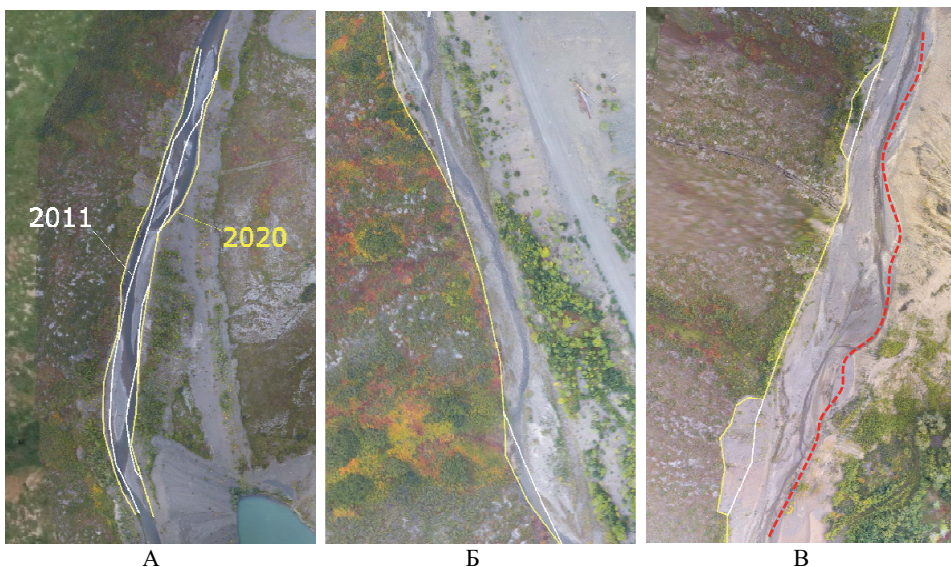


Рис. 4. Размывы бортов руслоотводов с 2011 по 2020 г. на участке Пенистый (А), в верхней (Б) и нижней части участка Левтыринываям (В)

По длине руслоотвода р. Левтыринываям выявлены четыре участка размыва правого берега (рис. 4, Б, В). Верхние участки сформировались в результате развития излучин русла, на нижних участках отступление берега происходит в результате подтачивания днища оползневого склона потоком. В отличие от вышеописанного участка на р. Янытайлыгинываям, руслоотвод р. Левтыринываям имеет ступенчатый продольный профиль, а ширина в бровках значительно меняется по его длине, в результате по длине руслоотвода возникло несколько участков направленной аккумуляции поступающего материала. Значительная часть размываемого материала (особенно на обвальных участках) аккумулируется непосредственно под стенкой размыва, оставшаяся часть накапливается на участках перегиба продольного профиля. Левый берег руслоотвода, к которому подходят отвалы грунта, также размывается на большом количестве небольших участков по всей своей длине. При этом участки такого размыва затрагивают левобережные дамбы, а не сами отвалы. Объем поступления грунтов в русла рек от таких размывов невелик.

Проведенный анализ дает возможность провести оценку фактических объемов поступления материала за счет размывов русла. Только с описанных выше участков размыва в среднем за период с 2011 по 2022 г. в русло поступало от 3 до 5 тыс. т/год материала. Эта величина соответствует модулю стока наносов с территорий ГДУ $260 \text{ т/км}^2/\text{год}$, что почти в 15 превосходит приведенный выше фоновый сток наносов бассейна р. Ветвей и Левтыринываям ($18 \text{ т/км}^2 \cdot \text{год}$). При этом указанные участки составляют лишь 7 % от общей длины руслоотводов в пределах разработок, в связи с чем оценка не учитывает ни горизонтальных деформаций, происходящих со значительно меньшими темпами на всей остальной длине русел, ни вертикальные деформации – так, по оценке [Формирование стока наносов ... , 2015] только по длине руслоотвода р. Левтыринываям объем вынесенного материала за счет вертикальных деформаций с 2011 по 2015 г. составил 5,9 тыс. т/год. Намного превышают эти значения объемы материала, выносимого с территории разработок при прорывах руслоотводов и ускоренном формировании ими новых русел. Так, с техногенных поверхностей ГДУ Левтыринываям ниже многократных прорывов руслоотводов за период с 2017 по 2022 г. в среднем в русло руч. Ольхового могло ежегодно поступать от 63 до 126 тыс. т/год материала.

В период 2006–2012 гг. в районе соединения долин руч. Пенистый и р. Янытайлыгинываям в результате прорыва руслоотвода последней формировалась широкая аллювиальная поверхность, в пределах которой происходило блуждание русла на площади около 72 тыс. м^2 (сопровождавшееся выносом материала объемом до 15 тыс. т/год), прекратившееся только за счет врезания русла и зарастания пойменной поверхности.

Это свидетельствует о значительном вкладе русловых деформаций в сток наносов. При общем модуле стока наносов в пределах нарушенных водосборов около $26 \text{ 000 т/год/км}^2$ можно предполагать, что только размывы берегов в руслоотводах поставляют не менее 20 % наносов ежегодно, а в случае прорывов руслоотводов размывы техногенных поверхностей настолько интенсивны, что в отдельные годы увеличивали модуль стока тех-

ногенных наносов на 240–480 %. Интегрально вклад русловой эрозии (горизонтальных и вертикальных деформаций) может составлять не менее 50 %. При этом стоит отметить высокие фоновые скорости размыва берегов на неизменных руслах. Так, только на участке р. Ветвей от р. Янытайлыгинываям до устья объем материала, поступающего в поток за счет плановых деформаций (на отдельных излучинах, достигающих 3,5 м/год), составляет до 40 тыс. т/год.

Таким образом, даже в условиях соблюдения технологических норм наличие разработок приводит к значительному превышению фоновых значений стока наносов за счет усиления поверхностного смыва на вскрытых территориях и интенсификации русловых процессов в искусственных руслах (табл. 3). В обоих случаях при аварийных событиях (для поверхностного смыва это перемещение больших объемов грунта при вскрыше или естественных процессах, для русловой эрозии – прорывы руслоотводов) объемы стока наносов увеличиваются кратно.

Таблица 3

Характеристики степени загрязнения ($S_{отн,5}$) р. Вывенки период 2016–2021 гг. и расчетной мутности воды ($S_{расч,5}$) в нижнем створе (5) р. Вывенки

Показатели	2016 г.	2017 г.	2018 г.	2019 г.	2020 г.	2021 г.
Среднее $S_{отн,5}$	0,95	0,99	1,11	1,13	1,00	0,99
Максимум $S_{отн,5}$	1,04	1,13	1,73	1,38	1,00	1,30
Минимум $S_{отн,5}$	0,81	0,87	0,93	1,05	1,00	0,82
Среднее $S_{расч,5}$, мг/л	25,8	41,6	56,8	46,5	51,1	42,0
Максимум $S_{расч,5}$, мг/л		80,5	85,8	66,9	77,2	65,2
Минимум $S_{расч,5}$, мг/л		24,1	25,6	32,9	23,3	22,5

Следует отметить, что далеко не весь материал, поступающий в результате размывов берегов и прорывов илоотстойников, достигает р. Вывенки, и соответственно фактическое изменение стока наносов не так значительно. Сток взвешенных наносов устойчиво формируется лишь за счет илистоглинистой фракции, составляющей от 10 до 40 % состава размываемых пород. В этой связи для оценки фактического объема воздействия и изменения стока наносов требуется проведение оценки непосредственно для р. Вывенки, что возможно на основе дешифрирования мутности по данным дистанционного зондирования Земли.

Оценка современных процессов загрязнения р. Вывенки

Разработка полезных ископаемых влияет на основные факторы изменения стока наносов – уменьшается расход воды, возрастает мутность, фактический расход наносов начинает превышать транспортирующую способность потока [Алексеевский, 1998]. В результате этого объем наносов, значительно превышающий фоновые значения по территории, поступает в нижние звенья речной цепи, имеющие меньшие уклоны. Это способствует аккумуляции наносов в реках ниже устьев загрязненных водотоков. Все вышеописанные источники повышенного стока наносов активизируются при повышении расходов воды.

Собранный архив снимков Sentinel-2 за период с 2016 по 2021 г. охватывает разные гидрологические фазы водности (пик половодья, спад половодья, межень и паводки), что позволяет максимально охарактеризовать сезонную изменчивость стока взвешенных наносов в условиях горнодобывающей деятельности в районе притоков р. Вывенки. Анализируемые в работе периоды сильно отличаются между собой по характеристикам водного режима. Максимальные значения расходов воды по данным GloFAS-ERA5 за период 2016–2021 гг. наблюдались в 2018 г. и составляли $2138 \text{ м}^3/\text{с}$. Прохождение высокого половодья в 2018 г. связано с выпадением аномально большого количества твердых осадков на севере Камчатки (на 200–300 % больше годовой суммарной нормы осадков) [Качество поверхностных ... , 2019]. Наиболее низкие значения максимальных расходов воды за период пришлось на маловодный 2016 г., когда наибольший расход воды весеннего половодья составил $754 \text{ м}^3/\text{с}$ (рис. 5).

Согласно результатам обработки космических снимков Sentinel, наблюдается увеличение максимальных и минимальных значений степени загрязнения рек взвесями на всех участках в 2018 и 2019 гг. (табл. 3). При этом в период высоких половодий формируются максимальные объемы поступления взвесей (рис. 5, А). Временная изменчивость степени загрязнения рек взвесями повторяет ход расходов воды, что наиболее явно прослеживается в течение 2018 г. При малой водности половодья пики формирования шлейфов наблюдаются с запаздыванием относительно даты прохождения максимальных расходов воды, как, например, в 2019 г.

Если в 2018 г. возрастание мутности по потоку может быть связано с прохождением высоких расходов половодья ($2138 \text{ м}^3/\text{с}$) и привносом вещества с водосбора, то в 2019 увеличение мутности приходится на меженный период. Увеличение меженных значений мутности в 2019 г., вероятно, также связано с проведением добычных работ на ГДУ Левтыриновьям и Ледяной, при этом шлейфы мутной воды распространялись и по р. Левтыриновьям, и по руч. Ольховый и по руч. Сентябрь. Повышение мутности подтверждено фотографиями с пролетов 14 августа 2019 г. Минимальные значения степени загрязнения рек взвесями приходятся на 2016 и 2017 гг. (см. табл. 3), когда в целом по потоку на участках выше впадения и ниже р. Левтыриновьям и р. Ветвей наблюдалась аккумуляция наносов и отсутствие привноса вещества на участке с притоками.

Расчет весовых значений мутности воды в замыкающем створе (5) отражает аналогичную ситуацию (рис. 5, Б). Максимальные значения мутности ($85,8 \text{ мг/л}$) по спутниковым снимкам наблюдались в 2018 г., средние значения также были выше за весь анализируемый период и составляли $56,8 \text{ мг/л}$. В среднем, ниже ведения разработок мутности воды превышают $41,6 \text{ мг/л}$. Это стало результатом локального прорыва руслоотвода в осенний паводок 2017 г. с последующим масштабным размывом центральной и нижней части ГДУ Левтыриновьям в 2018-м и последующие годы. Пик размывов техногенных поверхностей пришелся на 2018 и 2020 гг., шлейфы от которых читаются на снимках (19 июня 2018 г.; 18 июня 2020 г.) при впадении и руч.

Ольховый, и р. Левтыриновьям. До прорыва руслоотводов на ГДУ Левтыриновьям, произошедших в осенний паводок 2017 г., в маловодные 2016 и 2017 гг. и при малых расходах сток из илоотстойников прекращался, а руч. Ольховый и р. Левтыриновьям частично пересыхали в районе разработок, что приводило к отсутствию выноса вещества и шлейфов мутности.

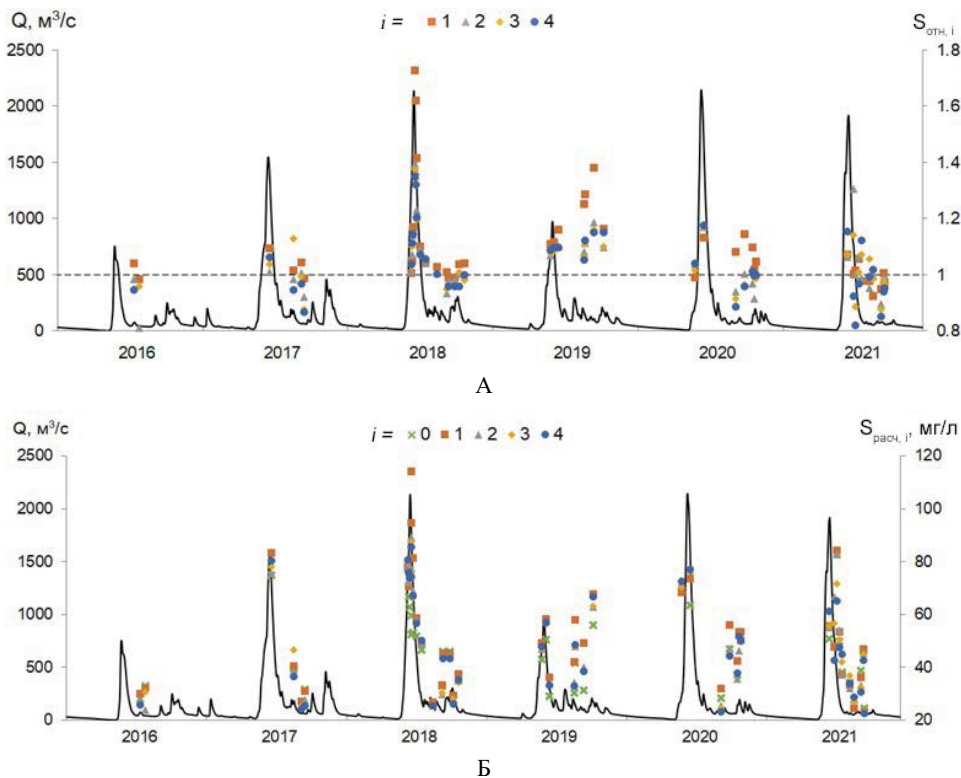


Рис. 5. Сезонные изменения (А) степени загрязнения рек взвесями ($S_{\text{отн},i}$) и (Б) расчетной мутности ($S_{\text{расч},i}$) воды на фоне гидрографов р. Вывенки – показаны точки разной формы и цвета; цифрами обозначены участки (см. рис. 1); расходы воды (Q , m^3/s) обозначены сплошной черной линией; пунктирная линия разделяет значения степени загрязнения рек взвесями менее и более 1

В меженный период образование шлейфов значительно отличается от закономерностей, установленных для прохождения половодья. Если прохождение высоких расходов и сход снежного покрова вызывает увеличение мутности почти всех притоков, дренирующих склоны разработок, то в меженный период наблюдаются разные ситуации. Возрастает степень влияния вод р. Ветвей на увеличение мутности р. Вывенки ниже по течению. Для р. Левтыриновьям и руч. Ольховый ситуации сильно отличаются и практически не зависят от водности рек – на период с 2018 по 2021 г. на меженный период приходятся ситуации как разбавляющего воздействия чистыми водами притоков, так и ситуации, когда вынос мутных вод приводит к распространению шлейфов вплоть до нижнего течения р. Вывенки.

Заключение

В условиях отсутствия данных о состоянии водных объектов дистанционные методы становятся важным источником информации для проведения современной оценки уровня загрязнения речной сети бассейна Вывенки.

Проведенный анализ динамики нарушенных поверхностей водосборов показал, что в условиях прекращения разработки происходит постепенное выполаживание отвалов в результате поверхностного смыва, часть продуктов которого может поступать в водотоки территории. На основе анализа размывов руслоотводов на ГДУ показано, что в среднем за период с 2011 по 2022 г. в русло поступало от 3 до 5 тыс. т/год материала за счет активизации русловых деформаций в руслоотводах. Эта величина соответствует модулю стока наносов территорий ГДУ 260 т/(км²·год), что почти в 15 превосходит приведенный выше фоновый сток наносов бассейна р. Ветвей и Левтыриновым (18 т/(км²·год)). При этом вынос материала за счет прорывов илоотстойников может значительно усиливать степень воздействия. Так, за период с 2017 по 2022 г. в среднем в русло ручья Ольхового могло ежегодно поступать от 63 до 126 тыс. т/год материала.

Подобные оценки подтверждают определением распространения шлейфов мутности по длине р. Вывенки. Степень воздействия на воды Вывенки связана с водностью притоков, а также с техногенной деятельностью на водосборе. В период повышенного стока происходит интенсивный размыв техногенных поверхностей и илоотстойников, и массовое поступление твердого материала в русловую систему, что приводит к многократному увеличению мутности воды по длине р. Вывенки. В первое, после прорыва руслоотводов, половодье 2018 г. происходило наиболее интенсивное опустошение емкостей илоотстойников с выносом максимального объема накопленных илов (в том числе в результате прорывов). В течение межени 2018 г. степень загрязнения р. Вывенки снижалась. В год с низкой водностью половодья (2019) увеличение степени загрязнения р. Вывенки в межень объясняется возобновлением добычных работ в течение весенне-летнего периода, что и привело к увеличению сброса сточных вод именно в конце года. Таким образом, в современных условиях высокое половодье сопровождается быстрым воздействием на русловую сеть; низкое половодье определяет растянутое воздействие.

Список литературы

- Алексеевский Н. И.* Формирование и движение речных наносов. М. : Изд-во МГУ, 1998. 202 с.
- Введенская Т. Л., Улатов А. В.* Обзор результатов исследований состояния лососевых водных объектов с различной степенью антропогенной нагрузки в Камчатском крае. Контроль и охрана состояния водной среды и биоресурсов // Труды ВНИРО. 2015. Т. 157. С. 173–188.
- Виноградова О. В., Хмелева Н. В.* Русловые процессы и формирование аллювиальных россыпей золота. М. : Изд-во Моск. ун-та, 2009. 171 с.
- Дедков А. П., Мозжерин В. И.* Эрозия и сток наносов на Земле. Казань : Изд-во Казан. ун-та, 1984. 264 с.
- Зайцев В. П.* Платиноносность Сейнав-Гальмознанского рудного узла: Корякское нагорье : автореф. дис. ... канд. геол.-минерал. наук. СПб., 2002. 26 с.

Качество поверхностных вод Российской Федерации / ред. М. М. Трофимчук // Ежегодник 2018. Ростов н/Д : Росгидромет, 2019. 561 с.

Ларионов Г. А. Эрозия и дефляция почв: основные закономерности и количественные оценки. М. : Изд-во Моск. ун-та, 1993. 200 с.

Матвеев А. А., Волкова В. М. Повышение эффективности очистки промстоков при разработке россыпей. М. : Недра, 1981. 136 с.

Тарасов М. К. Картографическая оценка баланса взвешенных веществ в дельте реки Селенги по данным дистанционного зондирования : дис. ... канд. геогр. наук. М., 2019. 188 с.

Формирование стока наносов в районах открытых разработок россыпей / С. Р. Чалов [и др.] // Эрозия почв и русловые процессы. 2015. Т. 19. С. 236–260.

Чалов С. Р., Есин Е. В., Леман В. Н. Влияние взвешенных наносов на речные ихтиоцены // Известия ТИПРО. 2019. Т. 199. С. 179–192.

Чалов С. Р., Леман В. Н. Нормирование допустимого воздействия открытых разработок полезных ископаемых на речные системы Камчатки // Водное хозяйство России. 2014. Т. 2. С. 69–86.

A global streamflow reanalysis for 1980–2018 / L. Alfieri [et al.] // Journal of Hydrology X. 2020. Vol. 6. P. 100049. <https://doi.org/10.1016/j.hydroa.2019.100049>

Arnoldus H. M. J. An approximation of the rainfall factor in the Universal Soil Loss Equation // Assessment of Erosion. 1980. P. 127–132.

Cao Z., Pender G. Numerical modelling of alluvial rivers subject to interactive sediment mining and feeding // Advances in Water Resources. 2004. Vol. 27, N 5. P. 533–546. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2004.02.017>

Conceptual model of sediment processes in the upper Yuba River watershed, Sierra Nevada, CA / J.A. Curtis [et al.] // Geomorphology. 2005. Vol. 68, N 3-4. P. 149–166. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2004.11.019>

Environmental impact of mining activities in the Lousal area (Portugal): Chemical and diatom characterization of metal-contaminated stream sediments and surface water of Corona stream / A.T. Luís [et al.] // Science of The Total Environment. 2011. Vol. 409, N 20. P. 4312–4325. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2011.06.052>

Geomorphometric assessment of spatial sediment connectivity in small Alpine catchments / M. Cavalli [et al.] // Geomorphology. 2013. Vol. 188. P. 31–41. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2012.05.007>

GloFAS-ERA5 operational global river discharge reanalysis 1979-present / S. Harrigan [et al.] // Earth System Science Data. 2020. Vol. 12, N 3. P. 2043–2060. <https://doi.org/10.5194/essd-12-2043-2020>

Hydrochemical evaluation of the influences of mining activities on river water chemistry in central northern Mongolia / B. Batsaikhan [et al.] // Environmental Science and Pollution Research. 2017. Vol. 24, N 2. P. 2019–2034. <https://doi.org/10.1007/s11356-016-7895-3>

Impacts of gold mining and land use alterations on the water quality of central Mongolian rivers / A. Stubblefield [et al.] // Integrated Environmental Assessment and Management. 2005. Vol. 1, N 4. P. 365–373. <https://doi.org/10.1002/icam.5630010406>

Mossa J., James L. A. Impacts of mining on geomorphic systems // Treatise on Geomorphology. 2013. Vol. 13. P. 74–95.

Nuth C., Kääb A. Co-registration and bias corrections of satellite elevation data sets for quantifying glacier thick-ness change // The Cryosphere. 2011. Vol. 5, N 1. P. 271–290. <https://doi.org/https://doi.org/10.5194/tc-5-271-2011>

Predicting soil erosion by water: a guide to conservation planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE) / K.G. Renard [et al.] // Agricultural Handbook. N 703. 1997. P. 404. <https://doi.org/DC0-16-048938-5> 65-100

Reconstructing a sediment pulse: Modeling the effect of placer mining on Fraser River, Canada / R.I. Ferguson [et al.] // Journal of Geophysical Research: Earth Surface. 2015. Vol. 120. P. 1436–1454. <https://doi.org/doi.org/10.1002/2015JF003491>

Schmidt S., Tresch S., Meusburger K. Modification of the RUSLE slope length and steepness factor (LS-factor) based on rainfall experiments at steep alpine grasslands // MethodsX. 2019. Vol. 6. P. 219–229. <https://doi.org/10.1016/j.mex.2019.01.004>

SoilGrids250m: Global gridded soil information based on machine learning / T. Hengl [et al.] // PLOS ONE. 2017. Vol. 12, N 2. P. e0169748. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0169748>

Williams J. R. Chapter 25: The EPIC model. // Computer models of watershed hydrology / ed. by Singh V.P. Highlands Ranch, Colorado : Water Resources Publications, 1995. P. 909–1000.

Zamana L. V., Vakhnina I. L. The impact of the placer gold mining in Eastern Transbaikalia (Russia) on the environment components of river valleys in the Amur River basin // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2022. Vol. 962, N 1. P. 012043. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/962/1/012043>

References

Alekseevskii N.I. *Formirovanie i dvizhenie rechnykh nanosov* [River sediment formation and transport]. Moscow, MSU Publ., 1998, 202 p. (in Russian)

Vvedenskaya T.L., Ulatov A.V. Obzor rezultatov issledovaniy sostoyaniya lososevykh vodnykh ob'yektov s razlichnoi stepenyu antropogennoi nagruzki v Kamchatskom krae. Kontrol i okhrana sostoyaniya vodnoi sredy i biosursov [Review of the results of studies of the state of salmon water bodies with varying degrees of anthropogenic load in the Kamchatka Territory. Control and protection of the state of the aquatic environment and bioresources]. *Trudy VNIRO* [Proceedings of VNIRO], 2015, vol. 157, pp. 173-188. (in Russian)

Vinogradova O.V., Khmeleva N.V. *Ruslovye protsessy i formirovanie allyuvial'nykh rossypei zolota* [Channel processes and formation of alluvial gold placer]. Moscow, MSU Publ., 2009, 171 p. (in Russian)

Dedkov A.P., Mozzherin V.I. *Eroziya i stok nanosov na Zemle* [Erosion and sediment runoff on Earth]. Kazan, Izdatelstvo Kazanskogo universiteta, 1984, 264 p. (in Russian)

Zaitsev V.P. *Platinonosnost Seynav-Galmoenanskogo rudnogo uzla: Koryakskoe nagorie* [Platinum bearing of the Seynav-Galmoenan ore node: Koryak upland. Cand. sci. diss.]. 2002, 176 p. (in Russian)

Kachestvo poverkhnostnykh vod Rossiiskoi Federatsii [The quality of surface waters of the Russian Federation] (ed. by M. M. Trofimchuk). *Ezhгодnik 2018* [Yearbook 2018]. Rostov-na-Donu, Rosgidromet, 2019, 561 p. (in Russian)

Larionov G.A. *Eroziya i deflyatsiya pochv: osnovnye zakonomernosti i kolichestvennye otsenki* [Erosion and deflation of soils: basic patterns and quantitative estimates]. Moscow, MSU Publ., 1993, 200 p. (in Russian)

Matveev A.A., Volkova V.M. *Povyshenie effektivnosti ochistki promstokov pri razrabotke rossypei* [Improving the efficiency of cleaning industrial effluents in the development of placers]. Moscow, Nedra Publ., 1981, 136 p. (in Russian)

Tarasov M.K. *Kartograficheskaya otsenka balansa vzveshennykh veshchestv v delte reki Selengi po dannym distantsionnogo zondirovaniya* [Cartographic assessment of the balance of suspended substances in the delta of the Selenga River according to remote sensing data. Cand. sci. diss.]. Moscow, 2019. 188 p. (in Russian)

Chalov S.R. et al. Formirovanie stoka nanosov v raionakh otkrytykh razrabotok rossypei [Formation of sediment runoff in areas of open placer mining]. *Eroziya pochv i ruslovye protsessy* [Soil erosion and fluvial processes], 2015, vol. 19, pp. 236-260. (in Russian)

Chalov S.R., Esin E.V., Leman V.N. Vliyanie vzveshennykh nanosov na rechnye ikhtiotseny [Influence of suspended sediments on river ichthyocenes]. *Izvestiya TINRO* [TINRO News], 2019, vol. 199, pp. 179-192. (in Russian)

Chalov S. R., Leman V.N. Normirovanie dopustimogo vozdeistviya otkrytykh razrabotok poleznykh iskopaemykh na rechnye sistemy Kamchatki [Rationing of the permissible impact of open-pit mining on Kamchatka river systems]. *Vodnoe khozyaistvo Rossii* [Water management of Russia], 2014, vol. 2, pp. 69-86. (in Russian)

Alfieri L. et al. A global streamflow reanalysis for 1980-2018. *Journal of Hydrology X*, 2020, vol. 6, p. 100049. <https://doi.org/10.1016/j.hydroa.2019.100049>

Arnoldus H.M.J. An approximation of the rainfall factor in the Universal Soil Loss Equation. *Assessment of Erosion*, 1980, pp. 127-132.

Cao Z., Pender G. Numerical modelling of alluvial rivers subject to interactive sediment mining and feeding. *Advances in Water Resources*, 2004, vol. 27, no. 5, pp. 533-546. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2004.02.017>

Curtis J.A., Flint L.E., Alpers C.N., Yarnell S.M. Conceptual model of sediment processes in the upper Yuba River watershed, Sierra Nevada, CA. *Geomorphology*, 2005, vol. 68, no. 3-4, pp. 149-166. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2004.11.019>

Luís A.T., Teixeira P., Almeida S.F.P., Matos J.X., Silva E.F. da Environmental impact of mining activities in the Lousal area (Portugal): Chemical and diatom characterization of metal-contaminated stream sediments and surface water of Corona stream. *Science of The Total Environment*, 2011, vol. 409, no. 20, pp. 4312-4325. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2011.06.052>

Cavalli M., Trevisani S., Comiti F., Marchi L. Geomorphometric assessment of spatial sediment connectivity in small Alpine catchments. *Geomorphology*, 2013, vol. 188, pp. 31-41. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2012.05.007>

Harrigan S. et al. GloFAS-ERA5 operational global river discharge reanalysis 1979–present. *Earth System Science Data*, 2020, vol. 12, no. 3, pp. 2043-2060. <https://doi.org/10.5194/essd-12-2043-2020>

Batsaikhan B. et al. Hydrochemical evaluation of the influences of mining activities on river water chemistry in central northern Mongolia. *Environmental Science and Pollution Research*, 2017, vol. 24, no. 2, pp. 2019-2034. <https://doi.org/10.1007/s11356-016-7895-3>

Stubblefield A., Chandra S., Eagan S. [et al.]. Impacts of gold mining and land use alterations on the water quality of central Mongolian rivers. *Integrated Environmental Assessment and Management*, 2005, vol. 1, no. 4, pp. 365-373. <https://doi.org/10.1002/ieam.5630010406>

Mossa J., James L.A. Impacts of mining on geomorphic systems. *Treatise on Geomorphology*, 2013, vol. 13, pp. 74-95.

Nuth C., Kääb A. Co-registration and bias corrections of satellite elevation data sets for quantifying glacier thickness change. *The Cryosphere*, 2011, vol. 5, no. 1, pp. 271-290. <https://doi.org/https://doi.org/10.5194/tc-5-271-2011>

Renard K.G. et al. Predicting soil erosion by water: a guide to conservation planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE). *Agricultural Handbook*, 1997, no. 703, pp. 404. <https://doi.org/DC0-16-048938-5> 65-100

Ferguson R.I., Church M., Rennie C.D., Venditti J.G. Reconstructing a sediment pulse: Modeling the effect of placer mining on Fraser River, Canada. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 2015, vol. 120, pp. 1436-1454. <https://doi.org/doi.org/10.1002/2015JF003491>

Schmidt S., Tresch S., Meusburger K. Modification of the RUSLE slope length and steepness factor (LS-factor) based on rainfall experiments at steep alpine grasslands. *MethodsX*, 2019, vol. 6, pp. 219-229. <https://doi.org/10.1016/j.mex.2019.01.004>

Hengl T. et al. SoilGrids250m: Global gridded soil information based on machine learning. *PLOS ONE*, 2017, vol. 12, no. 2, pp. e0169748. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0169748>

Williams J.R. Chapter 25: The EPIC model. Computer models of watershed hydrology. *Highlands Ranch, Colorado: Water Resources Publications*, ed. Singh V.P., 1995, pp. 909-1000.

Zamana L.V., Vakhnina I.L. The impact of the placer gold mining in Eastern Transbaikalia (Russia) on the environment components of river valleys in the Amur River basin. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2022, vol. 962, no. 1, pp. 012043. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/962/1/012043>

Сведения об авторах

Чалов Сергей Романович

доктор географических наук, доцент
кафедра гидрологии суши
Московский государственный университет
им. М. В. Ломоносова
Россия, 119991, г. Москва, ул. Ленинские
горы, 1
старший научный сотрудник

Information about the authors

Chalov Sergey Romanovich

Doctor of Sciences (Geography), Associate
Professor, Hydrology Department
Lomonosov Moscow State University (MSU)
1, Leninskie gory, Moscow, 119991,
Russian Federation
Senior Research Scientist
Russian Federal Research Institute of Fisheries

*Всероссийский научно-исследовательский институт рыбного хозяйства и океанографии (ВНИРО)
Россия, 105187, г. Москва, Окружной проезд, 19
e-mail: srchalov@geogr.msu.ru*

Прокопьева Кристина Николаевна
*младший научный сотрудник,
научно-исследовательская лаборатория
эрозии почв и русловых процессов им.
Н. И. Маккавеева,
Московский государственный университет
им. М. В. Ломоносова
119991, Россия, г. Москва, ул. Ленинские
горы, 1
e-mail: prokris3@mail.ru*

Школьный Данила Игоревич
*научный сотрудник, кафедры гидрологии
суши
Московский государственный университет
имени М. В. Ломоносова
119991, Россия, г. Москва, ул. Ленинские
горы, 1
e-mail: thabigd@gmail.com*

Цыпленков Анатолий Сергеевич
*кандидат географических наук, старший
научный сотрудник, научно-
исследовательская лаборатория эрозии почв
и русловых процессов им. Н. И. Маккавеева
Московский государственный университет
имени М. В. Ломоносова (МГУ)
119991, Россия, г. Москва, ул. Ленинские
горы, 1
e-mail: atsyplenkov@geogr.msu.ru*

*and Oceanography
19, Okrzhnoi proezd, Moscow, 105187,
Russian Federation
e-mail: srchalov@geogr.msu.ru*

Prokopenva Kristina Nikolaevna
*Junior Research Scientist, Laboratory for Soil
Erosion and Fluvial Processes,
Lomonosov Moscow State University
1, Leninskie Gory, Moscow, 119991,
Russian Federation
e-mail: prokris3@mail.ru*

Shkolnyi Danila Igorevich
*Senior Research Scientist, Hydrology
Department
Lomonosov Moscow State University
1, Leninskie gory, Moscow, 119991,
Russian Federation
e-mail: thabigd@gmail.com*

Tsyplenkov Anatolii Sergeevich
*Candidate of Sciences (Geography)
Senior Research Scientist, Laboratory for Soil
Erosion and Fluvial Processes,
Lomonosov Moscow State University
1, Leninskie Gory, Moscow, 119991,
Russian Federation
e-mail: atsyplenkov@geogr.msu.ru*