

УДК 556.535.6

С. Р. ЧАЛОВ\*, Д. И. ШКОЛЬНЫЙ\*, Е. В. ПРОМАХОВА\*,  
В. Н. ЛЕМАН\*\*, А. О. РОМАНЧЕНКО\*

\*Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова

\*\*Всероссийский научно-исследовательский институт рыбного хозяйства и океанографии,  
г. Москва

## ФОРМИРОВАНИЕ СТОКА НАНОСОВ В РАЙОНАХ РАЗРАБОТОК РОССЫПНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

*Приводится оценка вклада разных источников поступления наносов в реки, протекающие в районах открытых разработок россыпей в местах современного их освоения (на примере Российской Федерации и Монголии). Рассмотрены процессы преобразования стока наносов в условиях ведения открытых разработок золота и платины в долинах ручьев, малых и средних рек, где добыча полезных ископаемых является исключительным видом хозяйственной деятельности (реки бассейна Вывенки, Камчатский край) или одним из характерных для данной территории (р. Туул ниже г. Улан-Батора, бассейн Селенги, Монголия). Обобщены оценки трансформации стока наносов ниже разработок россыпей рек России, Монголии, США, Индии, Австралии, Суринама. Показано, что русловая эрозия в антропогенно преобразованных руслах определяет до 90 % техногенного изменения стока наносов. Наиболее значительное (на несколько порядков) увеличение стока наносов диагностируется для малых рек. Для крупных рек, характеризующихся низкими фоновыми значениями стока наносов, порядок его изменения варьирует от 1,1–1,2 при ведении единичных горных работ на водосборе до 5 раз при массовой горнодобывающей деятельности.*

Ключевые слова: трансформация стока наносов, открытые разработки полезных ископаемых, русловые деформации, поверхностный смыв.

*An assessment is made of the contribution from different source supplying sediments to the rivers flowing in areas of open-cast mining of placers in places of their contemporary exploitation (using the Russian Federation and Mongolia as an example). We examine the sediment yield transformation processes in conditions of open-cast mining of gold and platinum in the valleys of creeks and small and medium-sized rivers where extraction of mineral resources is an exceptionally important kind of activity (the rivers of the Vyvenka basin, Kamchatka krai) or characteristic for a given territory (Tuul river downstream of the city of Ulanbaatar, Selenge river basin, Mongolia). We summarized the assessments of the sediment yield transformation downstream of the areas of mining placer deposits along the rivers of Russia, Mongolia, USA, India, Australia, and Surinam. It is shown that stream-channel erosion in anthropogenically modified channels is responsible for up to 90 % of technogenic changes in sediment yield. The most significant (by several orders of magnitude) increase in sediment yield has been recorded for small rivers. For large rivers that are characterized by low background values of sediment yield, its change is by a factor of 1,1–1,2 in the case of single mining operations in the drainage area and reaches a factor of five for large-scale mining operations.*

Keywords: sediment yield transformation, open-cast mining of mineral resources, channel deformations, sheet erosion.

### ВВЕДЕНИЕ

Деятельность горнодобывающих предприятий — один из основных техногенных факторов преобразования окружающей среды и изменения стока наносов в реках [1]. Увеличение использования минеральных ресурсов более чем в 13 раз [2] в течение XX в. связано с усилением горнодобывающей деятельности в ряде районов мира, где она не была распространена. В последние десятилетия активно осваиваются ресурсы таких ранее недоступных регионов, как Камчатский край (Россия), о. Мадагаскар и др. Только в пределах Монголии в 2010 г. более 45 % территории было отнесено к лицензионным участкам добычи природных ресурсов [3].

Открытые разработки россыпей наиболее распространены на малых и средних реках горных и предгорных районов [4]. Русловой режим здесь оптимален для россыпеобразования, так как реки этого типа обладают достаточно высокой кинетичностью и скоростями потока, обеспечивающими транзит и концентрацию металла. В результате реки, в долинах которых ведутся открытые разработки

россыпей, часто имеют низкие естественные (фоновые) значения стока наносов. Это определяет их восприимчивость к воздействию горных работ. Из-за нерегулярности мониторинговых и сетевых наблюдений на этих реках почти полностью отсутствует оценка масштаба и факторов изменения стока наносов, а также какие-либо обобщения на эту тему.

Цель данной статьи — обзор литературных данных по рекам России, Монголии, США, Индии, Австралии, Суринама, протекающим ниже разработок россыпей, а также результатов многолетних экспедиционных исследований авторов на реках Монголии и Камчатского края (Россия) ниже разработок золота (месторождение Заамар, р. Туул, бассейн р. Селенги) и платины (Сейнав-Гальмознанский горный узел, бассейн р. Вывенки). Выбор объектов исследования обусловлен разным размером рек, в долинах которых расположены открытые разработки россыпей, и разной степенью освоенности речных бассейнов альтернативными видами хозяйственной деятельности. Рассмотрены следующие процессы, влияющие на сток наносов.

1. Русловые деформации (вертикальные и горизонтальные) рек в пределах нарушенных горными работами долин. Традиционной формой изменения руслового режима является отвод стока от участков размещения карьеров (создание руслоотводов) или канализирование русел, из-за их спрямления приводящее к интенсификации размывов дна и берегов [5, 6].

2. Просачивание и сбросы загрязненных вод технологических водоемов в водотоки.

3. Поверхностный смыв с отвалов горных пород. Сведение растительности и создание отвалов горных пород приводит к усилению поверхностного смыва [7–9], при этом продукты смыва попадают либо напрямую в речную сеть, либо в технологические водоемы. В последнем случае поступление твердого материала связано со сбросом сточных вод, просачиванием или аварийными сбросами [10, 11].

#### ХАРАКТЕРИСТИКА ТЕРРИТОРИЙ ИССЛЕДУЕМЫХ РАЗРАБОТОК

Месторождение платины в пределах Сейнав-Гальмознанского горного узла относится к крупнейшим в мире (рис. 1). Оно приурочено к долинам малых рек Левтыринываям, Янытайлыгинываям и ручьев Ледяной, Сентябрь, Южный, Ветвистый, Пенистый в бассейне Вывенки (Камчатка, Корякское нагорье). Добыча платины ведется с 1994 г. и является исключительным видом хозяйственной деятельности в бассейне реки (см. рис. 1). По состоянию на 2013 г. общая площадь нарушенных земель составила 19 км<sup>2</sup>. Суммарная длина руслоотводов в реках высшей и первой рыбохозяйственных категорий достигает 30,7 км, с учетом технологических водотоков — 44 км. Доля нарушенных земель в бассейне р. Левтыринываям составила 5,1 % от общей площади водосбора, в бассейне р. Ветвей — 0,6 %. Для рек, дренирующих Сейнав-Гальмознанский горный узел и протекающих выше территории разработок по ненарушенным ландшафтам, модуль стока наносов меняется от 0,14 в межень до 7,1 т/(км<sup>2</sup>-год) в половодье (верховья бассейна р. Левтыринываям).

Месторождение Заамар находится в долине р. Туул (рис. 2) в монгольской части бассейна Селенги (длина реки выше месторождения 600 км, площадь бассейна 48 600 км<sup>2</sup>). Горнодобывающая деятельность на территории ведется с 1994 г. В 200 км выше по течению от месторождения в долине р. Туул расположена столица Монголии г. Улан-Батор с развитыми промышленными и коммунально-бытовыми комплексами. К 2014 г. общая площадь нарушенных земель в пределах месторождения составила 63 км<sup>2</sup>, длина отведенных участков в русле — 16,7 км. Суммарная протяженность руслоотводов (включая законсервированные запруды и прочие технологические водотоки) превышает 60 км. В пределах бассейна Туула доля отведенных под разработку месторождения Заамар земель составляет около 0,001 %. Мутность воды в Тууле выше территории разработки достигала 200 г/м<sup>3</sup>, что соответствовало модулю стока наносов до 8 т/(км<sup>2</sup>-год) [12] и было обусловлено воздействием вышерасположенной агломерации Улан-Батора и значительной сельскохозяйственной освоенностью водосбора. По осредненным данным гидрологических постов, в бассейне Селенги в 1950–1970 гг. модуль стока наносов составил 6,7 т/(км<sup>2</sup>-год) [13].

#### МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

На контрольных постах исследуемых рек (см. рис. 1, 2) проводились суточные измерения уровней и расходов воды и взвешенных наносов (с использованием гидрометрической вертушки ИСП-1, пор-

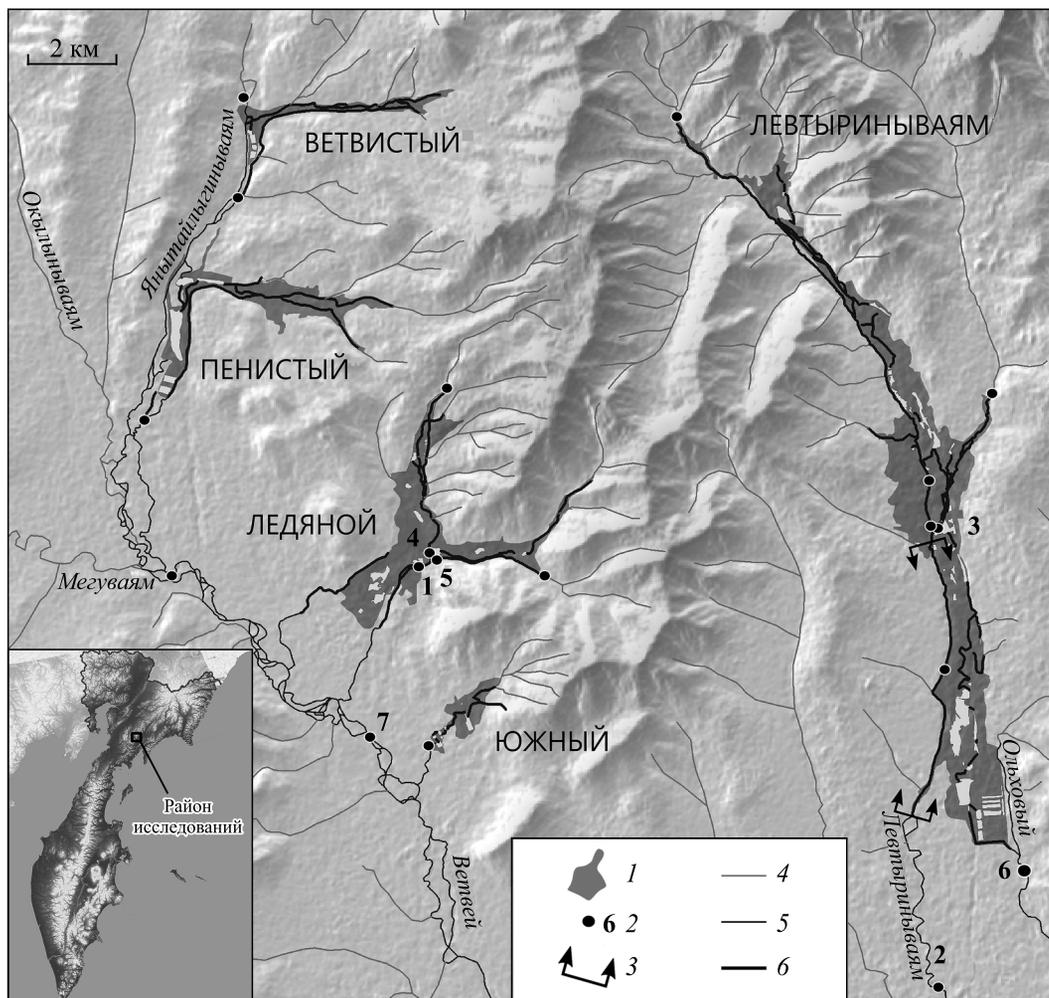


Рис. 1. План-схема территории разработок Сейнав-Гальмознанского горного узла.

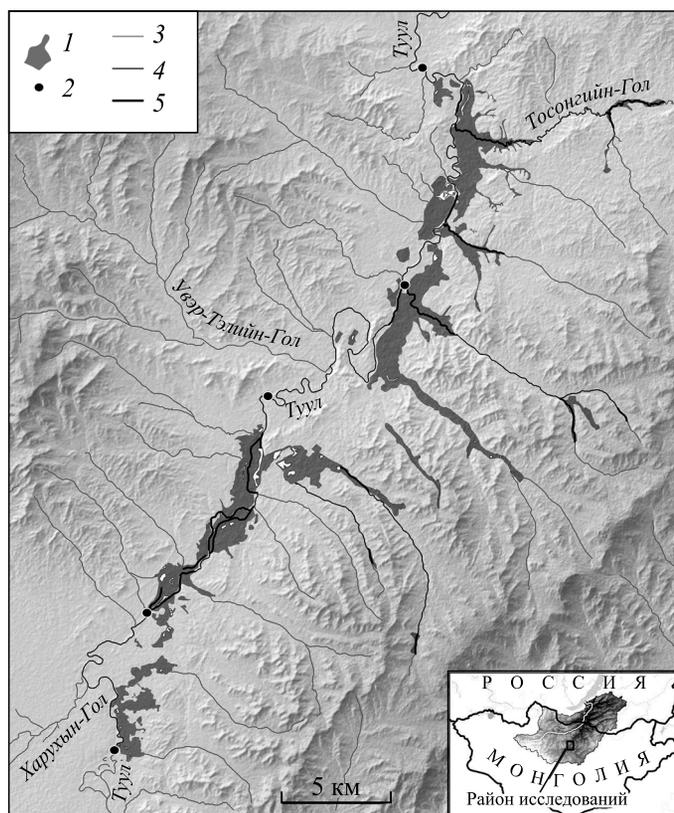
1 — максимальные площади территорий разработок; 2 — станции мониторинга в 2004–2013 гг.; 3 — границы участка гидродинамического моделирования. Русла рек и ручьев: 4 — естественные, 5 — естественные в пределах преобразованных горными работами речных долин, 6 — руслоотводы (канализированные русла) в пределах участков разработок полезных ископаемых.

тативных (Nach 2100 P) и автоматических (SebaChecker) измерителей мутности воды), температуры воды, расходов влекомых наносов. Оптическая мутность пересчитывалась в весовые значения с использованием региональных зависимостей [14]. Положение участков размыва берегов, донной эрозии, просачивания или оттока вод в прирусловые карьеры устанавливалось в рекогносцировочных маршрутах. На реках Сейнав-Гальмознанского горного узла измерения проводились ежегодно с 2003 по 2014 г. в течение трех-четырех недель в июне–августе. На р. Туул в районе месторождения Заамар измерения выполнялись в 2011–2013 гг. в течение недели в июне–сентябре.

Оценка стока наносов дополнялась данными, полученными с использованием одномерной гидродинамической модели HEC-RAS, реализованной для участка р. Левтыринываям (отрезок руслоотвода длиной 5,5 км) и р. Туул (участок нижнего течения длиной 250 км до устья реки, включающий в себя часть долины в пределах разработки золота Заамар). Морфология русла восстановлена по цифровой модели местности на основе данных SRTM [15], актуальных космических снимков и тахеометрической съемки руслоотвода р. Левтыринываям в 2012 г., а также поперечного профилирования долины р. Туул в 2011 г.

Рис. 2. План-схема территории разработок месторождения Заамар.

1 — максимальные площади территорий разработок; 2 — станции мониторинга в 2011–2013 гг. Русла рек: 3 — естественные, 4 — естественные в пределах преобразованных горными работами речных долин, 5 — руслоотводы (канализированные русла) в пределах участков разработок полезных ископаемых.



## РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТ

**Вертикальные деформации.** Канализирование русел, изменение их длины, формы поперечного сечения или высоты базиса эрозии приводит к созданию антропогенно преобразованных типов русла. Для таких отрезков реки характерны активное врезание, связанное со спрямлением русла [16], уничтожение прибрежной растительности и стеснение русла при создании дорог и отвалов пород вдоль участков добычи. В литературе описано врезание мощностью до 25 м в результате интенсификации вертикальных деформаций в антропогенно преобразованном русле (бассейн р. Беар, Калифорния, США) [17]. Соответствующее увеличение стока наносов может превышать объемы грунта, перемещаемого при ведении горных работ. Например, для р. Галего (Испания, площадь водосбора 4000 км<sup>2</sup>) в период с 1963 по 1989 г. при добыче гравийного материала было изъято около 1 млн м<sup>3</sup> грунта [5], в то время как сопутствующее и последующее врезание реки на прилегающих к русловым карьерам участках привело к выносу 2 млн м<sup>3</sup> материала.

На малой реке Левтыринываям (см. рис. 1) максимальная активизация вертикальных деформаций произошла в 2002–2005 гг., когда наблюдались активное врезание русла в верхнем течении руслоотвода и аккумуляция поступающего материала в нижнем. Создание в 2011 г. нового русла в среднем течении на территории добычи за счет его перемещения вверх по борту долины с увеличением абсолютных высотных отметок на 5–10 м и закрепление его валами привели к интенсификации регрессивной эрозии на этом участке, в результате чего сформировался каньон с высотой стенки до 5 м. При искусственном изменении продольного профиля возникают очаги регрессивной эрозии, развивающиеся вверх по течению со скоростью до 20 см/год. Самые высокие темпы переформирования руслоотводов, наблюдавшиеся в 2003–2013 гг., во многом были обусловлены техногенным фактором (механические работы в русле, создание новых и перенос части руслоотводов). Прогнозные оценки на гидродинамической модели HEC-RAS для участка нижнего течения руслоотвода р. Левтыринываям (см. рис. 1), с учетом полного прекращения добычи россыпной платины с 2014 г., показали, что за счет вертикальных деформаций продольного профиля в русло поступает от 300 до 1000 т наносов в год. Основной причиной этого является невыработанность продольного профиля канализированных участков рек (рис. 3). При этом до 90 % транспортируемого материала будет переоткладываться в нижней, выположенной части руслоотвода и выноситься за его пределы вниз по течению только в периоды прохождения дождевых паводков.

На средних реках воздействие открытых разработок на изменение режима русловых деформаций заметно в меньшей степени. На р. Туул в пределах части долины, занятой горными работами, антропогенные переформирования русла наблюдаются в виде спрямления отдельных участков. Это привело к изменению направленности русловых деформаций. Если выше месторождения Заамар преобладает аккумуляция, проявляющаяся в снижении расхода наносов от 82 000 до 68 700 т/год на прилегающем к разработке 80-километровом участке реки выше по течению, то по длине р. Туул в пределах



Рис. 3. Деформации продольного профиля руслоотвода р. Левтыриновьям.

1 — по состоянию на 2003 г., до переноса русла вверх по борту долины (штриховой линией показано восстановленное по топографическим картам положение профиля); 2 — по состоянию на 2013 г.; 3 — прогнозное положение на 2023 г., по результатам гидродинамического моделирования (в условиях консервации разработки). 4 — начало участка переноса русла в 2005 г. Вертикальными линиями показаны границы территории разработок в 2003 и 2012 гг.

нарушенной речной долины происходит увеличение стока наносов до 69 100 т/год. По длине антропогенно преобразованного русла максимальные темпы врезания типичны для участков спрямления (см. рис. 2), в то время как аккумуляция характерна для участков естественного русла.

**Горизонтальные деформации.** Антропогенное преобразование русел приводит к интенсификации размывов берегов. Наиболее подвержены размыву насыпные валы (отвалы грунта). Так, если в естественных условиях для малых рек и ручьев Корякского нагорья характерно стабильное положение русел [18], то за счет массового создания руслоотводов только в пределах участка Левтыриновьям сформировалось около 20 мест размыва берегов общей длиной 4 км, что способствовало поступлению 197 т/год твердого материала. В некоторых случаях размыв берегов короткого отрезка реки (15 м) приводил к устойчивому увеличению расхода наносов более чем в два раза при соответствующем изменении мутности от 45–49 до 80 мг/л (июнь 2011 г.). Одновременно диагностировалось изменение стока влекомых наносов [6].

Меандрирующее русло р. Туул в районе разработки золота Заамар отличается сравнительно высокими темпами размыва берегов (0,2–0,5 м/год). Зоны размыва приурочены к вершинам излучин, суммарная протяженность которых не превосходит 10–15 % от общей длины береговой линии. Не затронутые промышленными разработками участки поймы активно используются в качестве пастбищ, здесь хорошо развита дорожно-транспортная сеть, что значительно увеличивает предрасположенность берегов к размыву. Трансформация в районе разработок свободно меандрирующего русла в антропогенно преобразованное, характеризующееся меньшей степенью извилистости, привела к снижению интенсивности размыва берегов. Суммарная длина размываемых берегов сократилась до 5 % от общей длины русла (в пределах нарушенной горными работами части долины), скорость размыва для данных участков снизилась до 0,2–0,3 м/год, что соответствует поступлению около 1600 т/год материала в реку. Основными факторами уменьшения длины зоны размыва являются выполаживание берегов и закрепление растительностью из-за отсутствия здесь выпаса скота.

**Поверхностный смыв.** Повышенные модули стока наносов и значительное содержание в составе взвешенных наносов тонкодисперсных фракций являются следствием увеличения поверхностного смыва (склоновой и овражной эрозии) с территорий проведения горных работ открытым способом [19]. Специальные экспериментальные наблюдения на отвалах разработок россыпной платины Сейнав-Гальмоэнанского горного узла показали, что при осадках малой интенсивности модуль смыва на отвалах горных пород составляет здесь  $0,82 \cdot 10^{-6}$  кг/(м<sup>2</sup>·с). Рассчитанный по этим данным годовой модуль смыва (5500 т/(км<sup>2</sup>·год)) более чем в 200 раз превышает региональные (фоновые) значения,

характерные для тундровой зоны Корякского нагорья [13]. Сходные значения получены другими исследователями: в частности, для разработок в бассейне р. Херберт (Австралия) они достигли 2500 т/(км<sup>2</sup>·год) [19], а на отвалах горных пород месторождений полезных ископаемых в штате Кентукки (США) — 5000 т/(км<sup>2</sup>·год) [20]. В то же время эти величины меньше аналогичных значений ускоренной антропогенной эрозии сельскохозяйственных земель (до 40 000 т/(км<sup>2</sup>·год)) [7].

Формирование техногенного стока наносов, связанного со смывом с отвалов грунта, лимитируется водосборными площадями водотоков, протекающих в пределах нарушенных горными работами речных долин и часто имеющих искусственные канализированные русла. Значительная часть водосбора оказывается отрезанной от речной сети из-за создания искусственных областей внутреннего стока (карьеров, технологических прудов, илоотстойников). Обобщение данных мониторинга о стоке наносов ниже участков добычи россыпной платины Сейнав-Гальмознанского горного узла позволило получить региональную эмпирическую формулу [21], связывающую годовой объем стока наносов  $W_{\text{скл}}$ , формирующегося за счет склоновой эрозии, и площадь нарушенных земель  $F_{\text{нар}}$ :

$$W_{\text{скл}} = 68,9 \ln(F_{\text{нар}}) + 41,6.$$

**Аварийные сбросы и поступление сточных вод.** Важную роль в изменении стока наносов в районах ведения разработки россыпей могут играть точечные источники поступления материала, в первую очередь переливы из технологических водоемов, а также сброс сточных вод с недостаточной степенью их очистки. Локальное увеличение стока наносов часто связано с работой техники и движением транспорта по руслам. Большую роль играют разрушения стенок карьеров: только в пределах разработок, расположенных в США [10], было зафиксировано более 180 случаев аварийных сбросов вод с высокой концентрацией взвеси. Данные по другим рекам свидетельствуют о масштабах поступления в результате аварийных сбросов твердого материала в реки: 25 апреля 1998 г. в речную систему р. Гвадиамар (Испания) поступило 7 тыс. м<sup>3</sup> пульпы, в конце августа 1996 г. в бассейн р. Рио-Пилькомайо (Боливия) — 225 тыс. м<sup>3</sup>. Зафиксированные в 2003–2013 гг. на разработках россыпной платины Сейнав-Гальмознанского горного узла сбросы сточных вод, в том числе из-за прорывов стенок руслоотвода (июнь 2007 г., р. Левтыриновьяям) и перетоков из илоотстойников в руч. Ольховый (2005–2010 гг., створ 6) (см. рис. 1), позволяют оценить поступление материала в речную систему величиной до 10 тыс. т в год.

**Интегральная оценка стока наносов.** Ведущая роль русловой эрозии в формировании техногенного стока наносов рек в районе разработок россыпей подтверждается результатами расчленения графиков хода мутности по источникам поступления наносов (рис. 4, табл. 1), выполненного на основе методики [22]. В 75 % случаев основным источником поступления дополнительной взвеси ниже участков добычи Ледяной и Левтыриновьяям (створы 1, 2, 7) (см. рис. 1) была русловая эрозия. В среднем ее вклад составил 51,8 %; при отсутствии осадков и аварийных сбросов он увеличивался до 92,9 %, что соответствовало изменению мутности воды от 7,93 до 47,6 г/м<sup>3</sup> в р. Левтыриновьяям в июле 2008 г. Наименьший вклад в сток наносов принадлежал сбросам сточных вод (в среднем 14,6 %), хотя отдельные события могут определять вынос материала.

Обобщение данных для рек Сейнав-Гальмознанского горного узла [6, 21] показало, что максимальный ежегодный техногенный сток наносов с этой территории достигал в период ведения добычи 23 000 т/год. Относительно ненарушенных условий произошло увеличение на 80 % стока взвешенных наносов рек Сейнав-Гальмознанского горного узла, испытывающих воздействие разработки. Это соответствовало модулю стока наносов 26 280 т/(км<sup>2</sup>·год). Аналогично для рек сходного размера (табл. 2) в бассейне Яны, долины которых были заняты горными работами, средний модуль стока взвешенных наносов в многоводные годы составлял 21 310 т/(км<sup>2</sup>·год) [7], а в пределах месторождений золота и платины на севере Хабаровского края эта величина достигала 50 000 т/(км<sup>2</sup>·год) [8]. В то же время для территорий, отличающихся высоким фоновым значением поверхностного смыва, вклад разработок может играть не столь значительную роль. Например, для р. Бхадра, в бассейне которой находится месторождение железной руды, техногенный модуль стока наносов всего в четыре раза превышал фоновый (947 т/(км<sup>2</sup>·год)) [9].

Ведение горных работ на водосборе слабее влияет на сток наносов более крупных рек (см. табл. 2). Даже в период выпадения осадков они почти не были выражены в стоке наносов р. Туул (площадь водосбора 55 тыс. км<sup>2</sup>) ниже месторождения Заамар. Однако этот факт связан также с высокими фоновыми значениями стока наносов на реках Монголии. Среднепогодный сток взвешенных наносов р. Вывенки (площадь водосбора 13 тыс. км<sup>2</sup>) в Берингово море составил 190 000 т/год (модуль стока взвешенных наносов в естественных условиях принят равным 18 т/(км<sup>2</sup>·год)). Введение в экс-

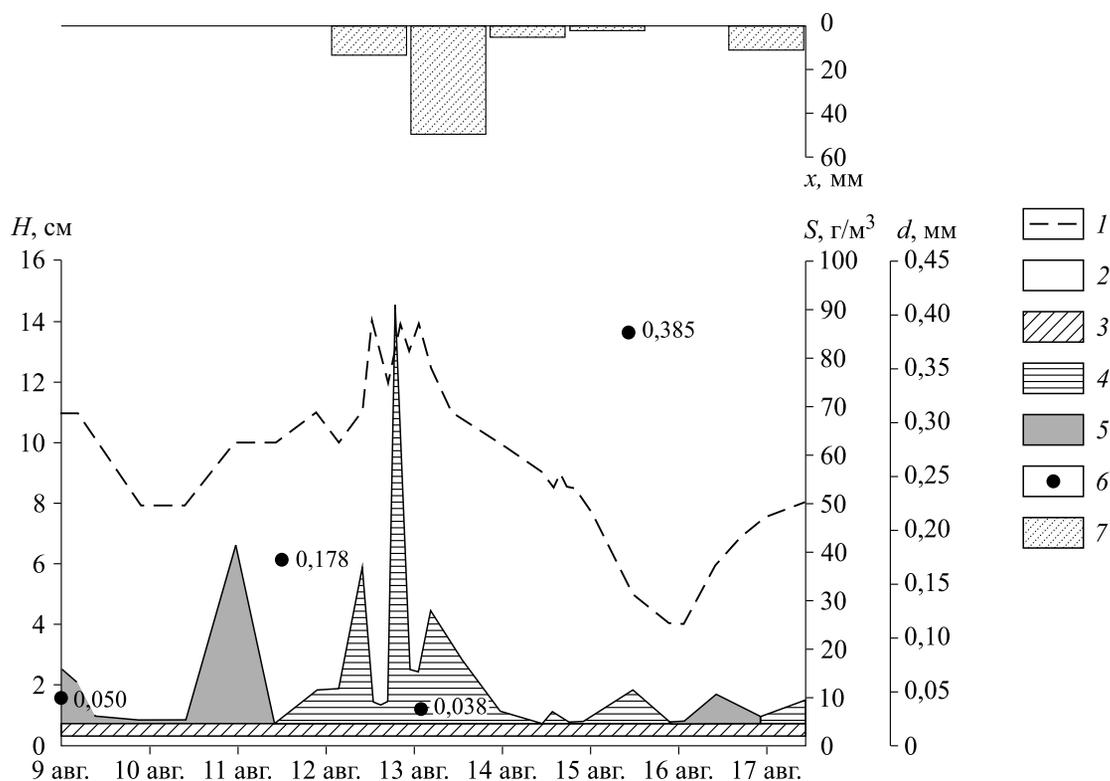


Рис. 4. Суточный ход уровня воды  $H$  (1), мутности воды  $S$  в зависимости от ее генезиса (2 — фоновая мутность, 3 — русловая эрозия, 4 — поверхностный смыв при осадках, 5 — сбросы технических вод), крупность взвешенных наносов  $d$  (6) в руч. Сентябрь и объем выпавших осадков  $x$  (7) за период мониторинга (август 2012 г.).

плуатацию месторождения платины привело к увеличению среднееголетнего стока взвешенных наносов на 10 %. Вклад водотоков в суммарный сток наносов при этом достигал 12,6 % (площадь их бассейнов составляет 13 % от площади бассейна р. Вывенки). Для бассейна р. Колымы [1, 23] на гидропосте Усть-Среднеканск (площадь водосбора 99,4 тыс. км<sup>2</sup>) увеличение модуля стока взвешенных наносов в связи с золотодобычей составило от 20 до 100 т/(км<sup>2</sup>-год).

Таблица 1

**Вклад различных источников формирования мутности вод рек Сейнав-Гальмознанского горного узла**

Река (ручей)	Номер створа на рис. 1	Сроки наблюдений	Источник формирования мутности вод, %				Диапазон изменения мутности воды, г/м <sup>3</sup>
			фоновая мутность	русловая эрозия	поверхностный смыв при дождевых осадках (при снеготаянии)	сбросы сточных вод	
Сентябрь	1	6–18 июля 2013 г.	17,7	62,7	13,0	6,5	6,44–16,9
Левтыриновьям	2	19–26 августа 2012 г.	24,0	64,3	11,7	0	6,18–9,57
Лев. Левтыриновьям	3	19–26 августа 2012 г.	30,8	62,9	6,3	0	5,30–8,62
Ледяной	4	9–17 августа 2012 г.	6,8	2,7	30,5	60,1	5,17–536,0
Осень	5	9–17 августа 2012 г.	32,0	51,9	9,3	6,8	4,48–10,4
Сентябрь	1	9–17 августа 2012 г.	12,8	21,3	41,8	24,1	4,59–90,6
Сентябрь	1	12–17 августа 2012 г.	18,5	20,9	40,1	20,5	0,88–175,0
Сентябрь	1	10–15 июня 2011 г.	2,9	18,9	6,7(71,5)	0	20,1–273,0
Левтыриновьям	2	10–18 июля 2010 г.	8,7	56,8	0	34,5	17,1–121,0
Сентябрь	1	3–10 июля 2010 г.	10,6	43,9	9,5	36,1	7,50–65,9
Левтыриновьям	2	14–17 августа 2009 г.	8,6	80,9	0	10,5	17,7–25,7
Сентябрь	1	20–24 августа 2009 г.	37,6	62,4	0	0	4,56–4,75
Левтыриновьям	2	18–26 июля 2008 г.	7,1	92,9	0	0	7,93–47,6

Фоновые и техногенные модули стока наносов для рек, дренирующих открытые разработки полезных ископаемых

Бассейн реки и добываемое полезное ископаемое	Площадь бассейна выше территории добычи полезных ископаемых, км <sup>2</sup>	Площадь нарушенных территорий, км <sup>2</sup>	Модуль стока наносов, т/(км <sup>2</sup> ·год)	
			фоновый	техногенный
Ветвей (платина, РФ)	181	19	18 [13]	26 280
Туул (золото, Монголия)	54 863	62,6	6,7 [13]	8
Яна, Омолой (золото, РФ)	737	47,4	16 [13]	21 310 [7]
Вача (золото, РФ)	1560	50	2,5 [13]	11 [24]
Мая, Киран (золото, РФ)	781	18,5	7,4 [13]	30 000–50 000 [8]
Беар (золото, США)	211	8,6	40 [13]	16 807 [17]
Юба (золото, США)	3035	907	40 [13]	9400 [25]
Бхадра (железо, Индия)	34	7,1	239 [9]	947 [9]
Маманари (золото, Суринам)	118,8	2,5	13 [26]	310 [26]
Ручей Купер-Крик (уран, Австралия)	16,3	1,73	20 [27]	640–1150 [27]
Херберт (олово, Австралия)	430	52	54 [19]	2500 [19]

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Увеличение стока наносов в реках, протекающих в районах разработок россыпей, определяется параметрами и технологией ведения горных работ, размером рек и фоновыми условиями на водосборе. При расположении разработок непосредственно в долинах малых рек сток наносов в них подвержен наиболее резкой трансформации. В таких случаях зафиксировано повышение модуля стока наносов в десятки тысяч раз (притоки р. Вывенки, Россия; р. Беар, США и др.). При расположении разработок в долинах более крупных рек влияние горнодобывающей деятельности на сток наносов относительно невелико (р. Туул, Монголия). Аналогично высокие фоновые значения стока наносов на малых реках также являются фактором снижения относительной нагрузки горнодобывающей деятельности на сток наносов (р. Бхадра, Индия). При этом изменение стока наносов в долинах рек, занятых разработками, может нивелироваться под воздействием местных факторов — снижения размывов берегов за счет их механического выполаживания и зарастания при уменьшении выпаса скота.

Для крупных рек, характеризующихся низкими фоновыми значениями стока наносов, порядок его изменения вследствие горных работ на водосборе варьирует от 1,1–1,2 (р. Вывенка, Россия) до 5 раз при массовой горнодобывающей деятельности в бассейне (р. Колыма, Россия). В условиях разработки россыпей на реках с высокими фоновыми значениями стока наносов, даже при расположении крупных разработок в долине реки, изменение стока наносов может быть еще более незначительным.

*Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (12–05–33090, 14–05–31351, 12–05–00348), гранта Русского географического общества «Экспедиция Селенга–Байкал» и гранта Российского научного фонда (14–17–00155).*

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Walling D. E., Fang D. Recent trends in the suspended sediment loads of the world's rivers // Global Planet. Changes. — 2003. — N 39. — P. 111–126.
2. Mossa J., James L. A. Impacts of mining on geomorphic systems // Treatise on Geomorphology. — San Diego: Academ. Press, 2013. — Vol. 13. — P. 74–95.
3. Золотые реки. Вып. 1: Амурский бассейн. — Владивосток: Апельсин, 2012. — 120 с.
4. Хмелева Н. В., Виноградова О. В., Маорс Л. В. Генетические комплексы россыпесодержащего аллювия водотоков низких порядков и их морфогенез // Эрозия почв и русловые процессы. — 1983. — Вып. 9. — С. 110–118.
5. Martín-Vide J. P., Ferrer-Boix C., Ollero A. Incision due to gravel mining: modeling a case study from the Gállego River, Spain // Geomorphology. — 2010. — Vol. 117. — P. 261–271.
6. Chalov S. R. Effects of placer mining on suspended sediment budget: case study of north of Russia's Kamchatka Peninsula // Hydrol. Sci. Journ. — 2014. — N 59 (5). — P. 1081–1094.

7. **Алексеевский Н. И., Сидорчук А. Ю.** Ускоренная эрозия в нарушенных горными работами ландшафтах (на примере бассейнов рек Омоля и Яны) // Экологические проблемы эрозии почв и русловых процессов. — М.: Изд-во Моск. ун-та, 1992. — С. 187–198.
8. **Махинов А. Н., Махинова А. Ф.** Преобразование антропогенного рельефа в районах разработок россыпных месторождений (север Хабаровского края) // Геоморфология. — 2006. — № 2. — С. 43–49.
9. **Krishnaswamy J., Bunyan M., Mehta V. K. et al.** Impact of iron ore mining on suspended sediment response in a tropical catchment in Kudremukh, Western Ghats, India // Forest Ecology and Management. — 2006. — N 224. — P. 187–198.
10. **Tailings Dam Incidents.** Denver, Colorado. U. S. Committee on Tailings Dams. 1994 [Электронный ресурс]. — <http://ussdams.org> (дата обращения 25.05.2014).
11. **Macklin M. G., Brewer P. A., Hudson-Edwards K. A. et al.** A geomorphological approach to the management of rivers contaminated by metal mining // Geomorphology. — 2006. — Vol. 79, Is. 3–4. — P. 423–447.
12. **Алексеевский Н. И., Белозёрова Е. В., Касимов Н. С., Чалов С. Р.** Пространственная изменчивость характеристик стока взвешенных наносов в бассейне Селенги в период дождевых паводков // Вестн. МГУ. Сер. 5. География. — 2013. — № 3. — С. 60–65.
13. **Дедков А. П., Мозжерин В. И.** Эрозия и сток наносов на Земле. — Казань: Изд-во Казан. ун-та, 1984. — 264 с.
14. **Белозёрова Е. В., Чалов С. Р.** Определение содержания взвешенных частиц в речных водах оптическими методами // Вестн. МГУ. Сер. 5. География. — 2013. — № 6. — С. 39–45.
15. **SRTM 90 m Digital Elevation Data** [Электронный ресурс]. — <http://srtm.csi.cgiar.org> (дата обращения 10.11.2013).
16. **Чалов С. Р., Чебанова В. В., Леман В. Н., Песков К. А.** Техногенные изменения русла малой лососевой реки и их влияние на сообщество макрозообентоса и лососевых рыб (юго-восточные отроги Корякского нагорья) // Чтения памяти Владимира Яковлевича Леванидова. — Владивосток: Дальнаука, 2005. — Вып. 3. — С. 36–48.
17. **James L. A.** Allan tailings fans and valley-spur cutoffs created by hydraulic mining // Earth Surf. Process. Landforms. — 2004. — N 29. — P. 869–882.
18. **Ермакова А. С.** Русловые процессы на реках Камчатки: Автореф. дис. ... канд. геогр. наук. — М.: Моск. ун-т, 2009. — 25 с.
19. **Bartley R., Olley J., Henderson A.** A sediment budget for the Herbert River catchment. — North Queensland, Australia: IAHS Publ., 2004. — Vol. 288. — P. 147–154.
20. **West T. O., Wali M. K.** A model for estimating sediment yield from surface-mined lands // Intern. Journ. Surface Mining, Reclamation and Environment. — 1999. — N 3. — P. 103–109.
21. **Чалов С. Р., Леман В. Н.** Нормирование допустимого воздействия открытых разработок полезных ископаемых на речные системы Камчатки // Вод. хоз-во России. — 2014. — № 2. — С. 69–86.
22. **Мозжерин В. В., Мозжерин В. И.** Расчленение стока наносов на русловую и бассейновую составляющие и возможности его использования в палеогеоморфологическом анализе // XXV пленарное межвузов. координац. совещ. по проблемам эрозионных, русловых и устьевых процессов. — Астрахань, 2010. — С. 46–55.
23. **Bobrovitskaya N. M.** Long-term variations in mean erosion and sediment yield from the rivers of the former Soviet Union // Erosion and Sediment Yield: Global and Regional Perspectives. IAHS Publ. — 1996. — Vol. 236. — P. 407–413.
24. **Алексеевский Н. И.** Формирование и движение речных наносов. — М.: Изд-во Моск. ун-та, 1998. — 202 с.
25. **James L. A., Ghoshal S.** Responses to episodic floodplain aggradation: hydraulic mining sediment in the Sacramento Valley // Amer. Geophys. Union, Fall Meeting Dec., San Francisco, CA, 2006 [Электронный ресурс]. — <http://adsabs.harvard.edu/abs/> (дата обращения 25.05.2014).
26. **Wantzen K. M., Mol J. H.** Soil erosion from agriculture and mining: a threat to tropical stream ecosystems // Agriculture. — 2013. — Vol. 3. — P. 660–683.
27. **Hancock G. R., Grabham M. K., Martin P. et al.** An erosion and radionuclide assessment of the former Nabarlek uranium mine, Northern Territory, Australia // Sci. Total Environment. — 2006. — N 354. — P. 103–119.

*Поступила в редакцию 16 августа 2014 г.*