

## К ОЦЕНКЕ ВОЗМОЖНОГО ВЛИЯНИЯ МАТЕРИКОВОГО СТОКА НА ГИБЕЛЬ ГИДРОБИОНТОВ В АВАЧИНСКОМ ЗАЛИВЕ ТИХОГО ОКЕАНА (КАМЧАТКА)

© 2022 г. С. Р. Чалова<sup>a, b</sup>, А. С. Цыпленков<sup>a</sup>, \*, Д. И. Школьный<sup>a</sup>, К. Н. Прокопьева<sup>a</sup>, Е. И. Бахарева<sup>a</sup>

<sup>a</sup>Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия

<sup>b</sup>Всероссийский научно-исследовательский институт рыбного хозяйства и океанографии, Москва, Россия

\*E-mail: atsyplenkov@geogr.msu.ru

Поступила в редакцию 16.06.2022 г.

После доработки 13.07.2022 г.

Принята к публикации 28.07.2022 г.

В сентябре 2020 года в Авачинском заливе Тихого океана наблюдалась массовая гибель гидробионтов. В данной работе анализируется возможная роль материевого стока в формировании этого явления. По данным реанализа GloFAS-ERA5 проведена оценка водного режима исследуемых рек, для определения путей миграции взвесей использован метод “фингерпринтинга”, методами дешифрирования шлейфов мутности по космических снимкам Landsat и Sentinel-2 выполнено определение выноса взвесей в Тихий океан со стоком р. Налычева. Выявлена роль эрозионных процессов в формировании стока наносов со склонов вулканов Авачинский, Жупановский и Купол. Особое внимание в работе удалено последствиям схода лахара на склонах Жупановского вулкана, произошедшего в 2015 году. Сделан вывод о кратковременном (в течение одного года) воздействии этого события на сток наносов в устье р. Налычева.

**Ключевые слова:** Камчатка, сток наносов, сток растворенных веществ, красные приливы, гидробионты, природная катастрофа

**DOI:** 10.31857/S0869607122040048

### 1. ВВЕДЕНИЕ

В сентябре 2020 года в Авачинском заливе Тихого океана наблюдалась массовая гибель морских организмов [46, 47]. В целом в научном сообществе основной причиной этого признаны “красные приливы” [20, 40, 41].

Однако в качестве возможных дополнительных воздействий на акваторию океана по-прежнему рассматривались либо загрязнения с каких-либо из объектов Вооруженных Сил РФ, распространенных в этом районе, либо сброс ядохимикатов с Козельского полигона, а также проявления вулканической деятельности. Возможная роль последних связана с тем, что территория водосбора представляет собой обширную геохимическую аномалию. Здесь в результате размыва рыхлых пирокластических отложений, выщелачивания эффузивных пород, растворения тонкодисперсных пеплов, поступления термальных растворов в реки попадают токсичные элементы. В реках ранее повсеместно регистрировались повышенные концентрации нескольких неспецифических токсикантов [2, 3], среди которых медь, цинк, молибден, ванадий (тяжелые металлы), а также алюминий, сера и селен. Кроме того, современные экстремальные

проявления вулканической деятельности, в частности, – обвал стенки конуса Жупановского вулкана [43], произошедший в 2015 году и приведший к формированию серии лахаров, определили актуальность рассмотрения возможного влияния природных и антропогенных процессов на водосборе на состояние экосистемы Авачинского залива.

Учитывая преобладающую роль в миграции химических элементов и соединений речных наносов [6], а также высокую эрозионную опасность территории [44], материковый сток является наиболее вероятным агентом влияния процессов на водосборе на экосистему океана. Целью данной работы является количественная оценка поступления наносов и нерастворенных форм химических соединений в водотоки территории водосбора Авачинского залива и далее в Авачинский залив Тихого океана. Для решения этой цели в работе исследуется водный сток – притоков Авачинского залива (1);дается оценка путей миграции взвешенных наносов в пределах водосбора (2); анализируются масштабы формирования лахара на склонах Жупановского вулкана и его влияние на шлейфы мутности в устье крупнейшего водотока территории – р. Налычева (3). В основу исследования положены подходы, связанные с количественной оценкой доставки наносов [35] и методами оценки их перемещения по русловой сети. Использовано сочетание численных и дистанционных методов анализа [10, 11, 34], методов полевых исследований [9, 25, 26]. Для определения путей миграции взвесей использован метод “отпечатка пальцев” (*fingerprinting*, далее “фингерпринтинг”) [36]. Фактический анализ поступления взвесей и химических элементов и соединений в акваторию Авачинского залива выполнен с использованием данных ре-анализа, а также методов дешифрирования шлейфов мутности по космических снимкам Landsat и Sentinel-2 [7].

## 2. ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЯ И ЕГО ИЗУЧЕННОСТЬ

Район гибели водных организмов, протяженностью около 40 километров [46], охватил прибрежную зону Авачинского залива от мыса Налычева до Авачинской бухты (рис. 1). В исследуемый участок Авачинского залива впадает шесть рек и ручьев: р. Халатырка, р. Таенка, р. Половинка, р. Котельная и р. Налычева. Здесь отсутствуют действующие гидрологические посты, данные наблюдений на которых позволили бы расчетными путями восстанавливать характеристики стока для водных объектов бассейна. Наблюдения на реках бассейна р. Налычева не производились, на прилегающей территории существовало пять пунктов наблюдений: три на р. Халатырка (Кирпичная) – “свх. Ближний”, “мост” и “пост 3”. “1-я Кругобереговая” на руч. Кругобереговом (единственный функционирующий пост с продолжительностью наблюдений 82 года). Также и на руч. Козельском (действовавший с 1972 по 1978 гг.). На всех постах наблюдения производились только за уровнем, температурой и расходом воды, архивных данных о стоке наносов или растворенных веществ нет. На территории бассейна р. Налычева и водотоков, дренирующих юго-восточные склоны вулканов, метеостанции отсутствуют. Ближайшая действующая метеостанция располагается в пос. Светлый Елизовского района. Также действуют м/с непосредственно в г. Петропавловск-Камчатский и на Петропавловском маяке, в 12 км от Петропавловска-Камчатского, на мысе Маячный. В данной работе использовались наблюдения из пос. Светлый, как наиболее репрезентативные для района исследований. Системных исследований стока наносов, за исключением наблюдений на р. Сухая Елизовская группой Московского Государственного Университета в 2007–2020 гг. [8, 13, 32], не проводилось.



**Рис. 1.** Обзорная картосхема территории.

**Fig. 1.** Geographic location of the Nalychevo Watershed and its extent within the Avachinsky Gulf territory.

### 3. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

#### *Полевые исследования*

На территории водосбора Авачинского залива в 2021–2022 гг. было отобрано 33 образца почвогрунтов и донных отложений временных и постоянных склоновых водотоков (далее – “образцы источников”). Отбор производился 28 июля – 16 августа 2021 года. Отбор проб осуществляется стандартным пробоотборником с внутренним диаметром 8.25 см до известной глубины (30 см). В приусьевых створах р. Налычева и на р. Левая и Правая Котельная установлены интегральные ловушки взвешенных наносов Филлипса [30], в которых отобранные наносы рассматривались как репрезентативные для характеристики выноса материала с водосбора в океан (далее – “целевые образцы”).

В лабораторных условиях предварительно взвешенные образцы почв и донных отложений были высушены до абсолютно сухого состояния при температуре 105°C, повторно взвешены, затем размолоты и просеяны через сито с диаметром отверстий 63 мкм [14, 18, 23, 28]. Подготовка (просушка, гомогенизация) и анализ проб почвы были проведены в НИЛ эрозии почв и русловых процессов им. Н.И. Маккавеева Географического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова. Все отобранные грунты, почвы, взвешенные наносы анализировались масс-спектральным и атомно-эмиссионным методами с индуктивно-связанной плазмой на определения содержания Li, Be, B, Na, Mg, Al, Si, P<sub>общ.</sub>, S, K, Ca, Sc, Ti, V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, Ga, Ge, As, Se, Br, Rb, Sr, Y, Zr, Nb, Mo, Ru, Rh, Pd, Ag, Cd, Hg, In, Sn, Sb, Te, I, Cs, Ba, La, Ce, Pr, Nd, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu, Hf, Ta, W, Re, Os, Iu, Pt, Au, Tl, Pb, Bi, Th, U.

#### *Методы моделирования*

Для оценки водного стока выполнен блок гидрологических расчетов на основе базы данных HydroRIVERS, предоставляющей собой слои гидрографических данных на основе радарной интерферометрической съемки поверхности Земли (SRTM) высокого разрешения [22]. Для разграничения речной сети, представленной в HydroRIVERS, среднегодовые расходы рассчитываются с помощью процедуры геопространственного моделирования при помощи модели WaterGAP [21]. В результате с помощью базы

данных HydroRIVERS получены данные о средних расходах воды, площади водосбора и длине исследуемых водотоков.

Для восстановления гидрографов в замыкающих створах использована глобальная гидрологическая модель с суточной дискретностью GloFAS-ERA5, основанная на ре-анализе метеорологических характеристик [19]. Модель GloFAS-ERA5 представляет собой растровые файлы с ячейкой  $10^\circ \times 10^\circ$  со среднесуточными расходами за каждый день, начиная с 1979 года. С помощью этой базы данных, имеющей мелкий масштаб, достоверно оценен может быть только сток в устье крупнейшего водотока – р. Налычева.

Для идентификации долевого вклада различных источников наносов применен метод фингерпринтинга [36] с использованием набора геохимических трассеров на основании программного комплекса FingerPro [24]. Принцип фингерпринтинга в статистической сепарации источников наносов в седиментационной ловушке Филлипса (т.н. целевой образец). FingerPro – это стандартная линейная многомерная модель смешивания с анализом неопределенности Монте-Карло, реализованная в пакете R с открытым исходным кодом на платформе CRAN. Относительный вклад каждого источника наносов определяется по уравнению 1, которое удовлетворяет ограничениям уравнения 2 [18]:

$$\sum_{j=1}^m a_{i,j} \omega_j = b_i, \quad (1)$$

$$\sum_{j=1}^m \omega_j = 1 \quad 0 \leq \omega_j \leq 1, \quad (2)$$

где  $b_i$  – концентрация трассера  $i$  в целевом образце;  $a_{i,j}$  представляет концентрацию трассера  $i$  в источнике типа  $j$ ;  $\omega_j$  – неизвестный относительный вклад источника  $j$ ;  $m$  представляет количество потенциальных источников наносов, а  $n$  – количество выбранных трассеров. Процедура направлена на поиск пропорций источников с сохранением баланса массы, где пропорции должны лежать между 0 и 1 и суммой 1, выраженной в % (то есть между 0 и 100, суммой 100). Вклад источника, оцененный моделью FingerPro, был выражен как средний вклад из лучших 3000 решений, предсказанных моделью.

Выбор трассеров для модели фингерпринтинга производился на основе 4-х ступенчатой процедуры отбора в соответствие с рекомендациями [15, 23, 36]. Проверялась мультиколлинеарность в данных трассеров (на основе рангового корреляционного теста Спирмена) для исключения из выборки коллинеарных химических элементов; сравнивались диапазоны трассеров в пробах почвогрунтов (т. е. источники наносов) с соответствующими диапазонами в целевых образцах донных осадков (т. е. мишенях); проводился непараметрический тест Красского–Уоллиса для удаления тех трассеров, которые не показывают значительной ( $p$ -значение  $> 0.05$ ) разницы между потенциальными источниками и донными отложениями; к списку отобранных консервативных трассеров применялся пошаговый многомерный дискриминантный функциональный анализ для определения окончательной композитной сигнатуры дискриминации источника для включения в модель фингрепринтинга [15].

Качество аппроксимации модели определялось критерием согласия GOF (от англ. *goodness of fit*), предложенный Motha et al. [27] для оценки качества моделирования [17, 23, 29, 31]:

$$GOF = 1 - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left\{ \left( \frac{\left| b_i - \sum_{j=1}^m x_j a_{i,j} \right|}{\Delta_i} \right)^2 \right\}, \quad (3)$$

где  $a_{i,j}$  – это средняя концентрация трассера  $i$  в источнике  $j$  ( $j = 1$  до  $m$ );  $b_i$  это концентрация трассера  $i$  ( $i = 1$  до  $n$ ) в целевом образце;  $x_j$  – относительный вклад источника  $j$  в целевой образец;  $m$  – это количество потенциальных источников наносов;  $n$  – это количество трассеров.

#### *Дистанционные методы*

Для оценки формирования шлейфов мутности в устье р. Налычевой и приусьевой акватории Авачинского залива проводилось определение отражательной способности изображений водных объектов по ряду космических снимков Landsat и Sentinel-2. Было отобрано 67 спутниковых изображений за период с 2013 по 2021 гг. Выбранный временной интервал охватывает период активности Жупановского вулкана в 2013–2016 гг. и прохождение лахаров.

Обработка снимков проходила в два этапа; первый подготовительный этап заключался в предварительной коррекции изображений, которая позволила минимизировать искажения разного рода (разнозначные яркостные значения, влияние атмосферной дымки на изображения) и включил в себя последовательные радиометрическую и атмосферную коррекции, выполнявшиеся согласно рекомендациям [5, 7]. Второй этап заключался в создании визуализации снимка для снятия пиксельных значений коэффициента отражения  $\rho$ . Алгоритм работы включал в себя несколько последовательных этапов, выполненных в среде ArcGIS (рис. 2). Помимо коэффициентов отражения по космическим снимкам Landsat и Sentinel-2 осуществлялось определение площадей речных мутностных шлейфов. Для сопоставления площадных значений необходимо было выбрать пороговое значение контура повышенной мутности; для устья р. Налычева оно составило 0.4 пкс. (рис. 2). Результатом обработки космических снимков стали 58 значений коэффициента отражения  $\rho$  и 34 значения площадей шлейфов мутности в период с 2013 по 2021 гг. Пересчет в значения мутности воды осуществлялся по рекам-аналогам Северо-Востока РФ согласно [12] по формуле:

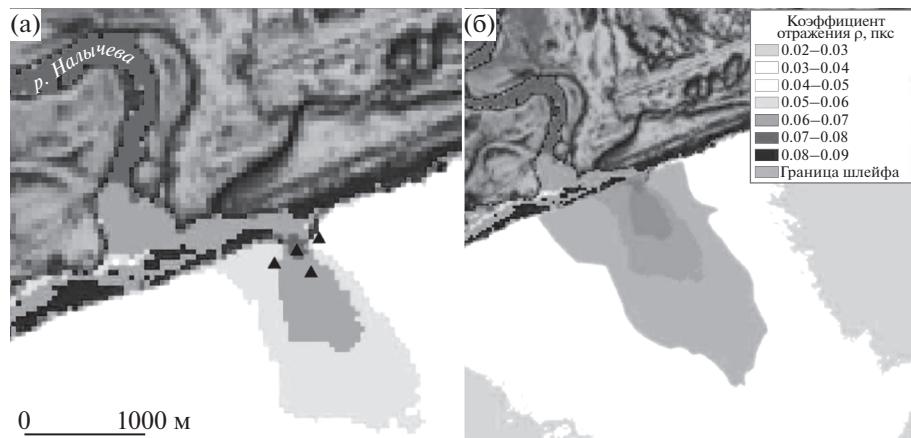
$$SSC = 0.39 \exp(74\rho). \quad (4)$$

### 3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

#### *Гидрологический режим рек Авачинской группы вулканов*

По данным реанализа GloFAS-ERA5, для рек бассейна Авачинского залива, дrenирующих вулканические постройки, характерны формирование растянутой волны половодья в мае во время таяния снежного покрова и многочисленные паводки в летне-осенний период, вызванные таянием отдельных снежников и прохождением ливневых дождей (рис. 3). Азональность бассейнов ярко выражается на примере постов в бассейне р. Халактырка. Модули стока на двух малых реках (руч. Крутобереговый и р. Халактырка), имеющих сопоставимые площади водосбора, отличаются в 4 раза (см. табл. 1). Неравномерный ход расходов по всем постам при их территориальной близости говорит о преобладании локальных факторов на формирования стока воды. Значительно неоднородно внутригодовое распределение стока на территории – так, в бассейне р. Авача и рек южного склона Авачинской группы вулканов таяние снега и основная волна половодья проходит в мае [45], то в бассейне же р. Налычева таяние наблюдается со значительной задержкой (в том числе, обусловленной большой площадью склонов северной экспозиции).

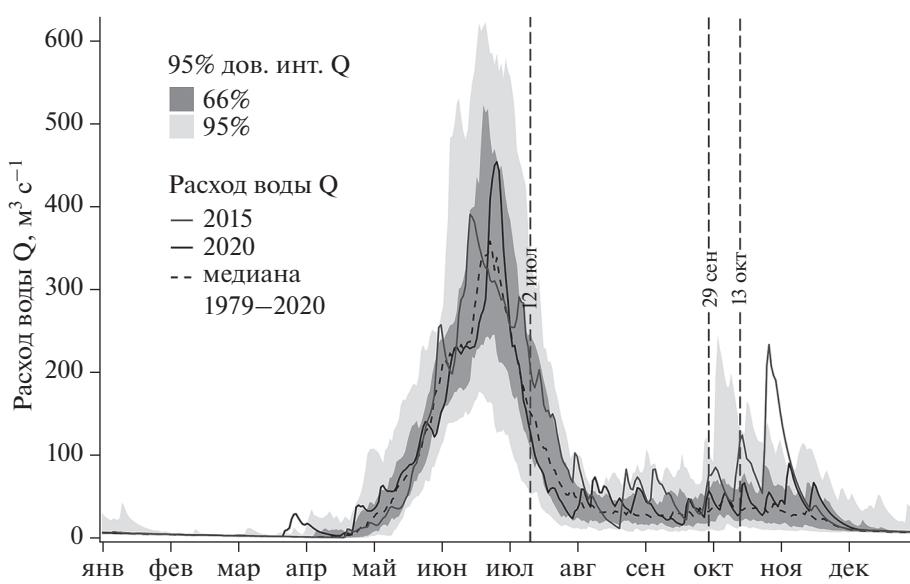
Наибольшей неравномерностью значений из створов наблюдений (см. табл. 1) характеризуется режим стока руч. Козельский, что связано с большей средней высотой его водосбора и его расположением непосредственно на вулканической постройке. Половодье, вызванное снеготаянием, не выражено в связи со значительной проница-



**Рис. 2.** Определение значений коэффициента отражения  $\rho$  в референсных точках приусьевой области р. Налычева (а) и выделение площади шлейфа по границе 0.4 пкс (б).

**Fig. 2.** Determining the reflection coefficient  $\rho$  in the reference points of the Nalycheva river estuary (left) and delineating the plume area along the 0.4 px boundary (right).

емостью поверхности водосбора. В связи с этим, на ручье (и подобных ему соседних водотоках) формируется специфический водный режим, для которого характерны значительные пульсации расходов воды и непродолжительные, но значительные увеличения расходов воды, вызванные обильными осадками или активным таянием



**Рис. 3.** Гидрограф р. Налычева в устьевом створе по данным GloFAS-ERA5 [19] за 1979–2020 гг.

**Fig. 3.** Nalycheva river hydrograph estimated with GloFAS-ERA5 [19] for 1979–2020 period. The 2020th year highlighted in red.

**Таблица 1.** Среднемноголетние значения характеристик стока исследуемых рек  
**Table 1.** Mean annual hydrologic parameters of Avachinsky Gulf rivers

Река	Крутобереговый	Халактырка	Козельский	Налычева
Пост	свх. Дальний	свх. Ближний	ГМС Козельский	Устье
Площадь водосбора, км <sup>2</sup>	60.2	17.5	8.8	1439
Q <sub>ср</sub> , м <sup>3</sup> /с	0.42	0.47	0.25	59.7
Q <sub>макс</sub> , м <sup>3</sup> /с	3.32	2.37	3.1	435
Модуль стока, л/с/км <sup>2</sup>	7.0	26.9	28.4	41.5
Период наблюдений	1945–1980	1944–1952	1972–1978	1979–2020
Источник	ГВК		[42]	GloFAS-ERA5 [19]

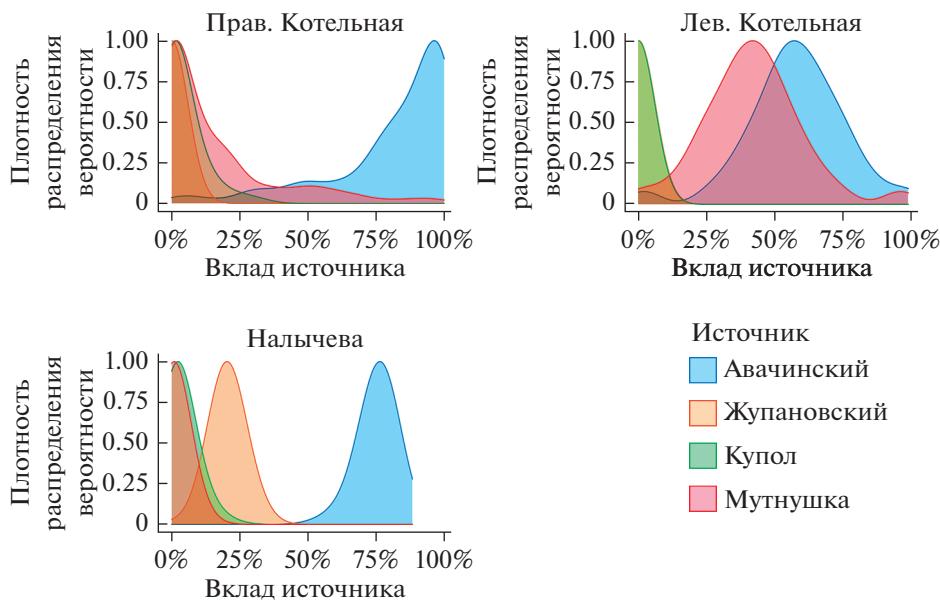
снежников и ледников при переувлажненном поверхностном слое почвы [42]. В результате этого максимальные расходы воды сопоставимы, а в отдельные годы – могут превышать максимальные расходы на руч. Крутобереговый, чей водосбор больше в 7 раз (табл. 1).

Оценка среднегодового объема стока воды по данным модели HydroRIVERS [22] указывает на то, что в среднем за год в Авачинский залив с речным стоком поступает около 2.3 км<sup>3</sup> воды). Объем литорали и сублиторали, где фиксировалась гибель животных, равен примерно 18 км<sup>3</sup> [39]. Таким образом, объемы стока воды и прибрежной зоны отличаются примерно в 8 раз.

#### *Количественная оценка путей миграции взвешенных наносов в пределах водосбора*

Обнаружены повышенные концентрации отдельных микроэлементов как во взвешенной, так и растворенной формах. Так, в р. Желтушка-Мутная превышеены рыбохозяйственные ПДК по цинку (примерно в 6 раз), а концентрация меди, свинца, молибдена и ванадия была близка к ПДК. С противоположной стороны склона вулканов, в р. Мутная, впадающей в р. Налычево, увеличена природная концентрация меди (в 5–7 раз), свинца (в 3 раза), цинка (в 6–9 раз). Избыточная концентрация этих же элементов отмечалась в р. Мутушка, стекающей с Козельского вулкана, но в концентрациях, незначительно превышающих ПДК. Среди группы тяжелых металлов повышенные содержания в грунтах и взвесях были характерны для отдельных элементов: ванадия, кобальта и никеля. При этом воды массово обогащены растворенным ванадием – по сравнению с рыбохозяйственными ПДК. Повышенные концентрации высокотоксичного для водных организмов ванадия, содержание которого в речных взвесях в меньшей степени по сравнению с другими тяжелыми металлами связано с антропогенным фактором [4], можно связать с геохимическими аномалиями вулканического генезиса. В частности, ванадий-содержащие минералы были ранее открыты в продуктах извержения вулкана Толбачик на Камчатке, а пятивалентный ванадий установлен в возгонах вулканов [38].

Выделение различных групп источников наносов происходило в несколько этапов. Анализ главных компонент (PCA), определенных методом ICP-MS содержания 64 элементов, сопоставленный с кластеризацией методом K-средних, показал на существование 3 пространственных кластеров однородных геохимических зон. На этой основе было сделано предположение о наличие 3-х источников поступлений наносов:



**Рис. 4.** Диаграммы распределения плотности вероятности 3000 результатов размешивания образцов донных отложений при помощи модели фингерпринтинга FingerPro [24].

**Fig. 4.** Results of the un-mixing procedure for suspended sediment samples collected using the Phillips Tube (PT) target sediment samples assessed using FingerPro model [24].

склоны вулканов Авачинский, Жупановский и Купол. Дополнительно на водосборе р. Мутнушка отмечено формирование специфических ассоциаций, также выделенных в отдельную группу (“Мутнушка”). Данное деление на группы подтверждается линейным дискриминантным анализом (LDA): 100% всех образцов классифицированы корректно.

Проведенная 4-ступенчатая процедура отбора консервативных трассеров (анализ на коллинеарность, диапазонный тест, тест Краскалла–Уоллиса и анализ дискриминантной функции) позволила выделить набор из шести трассеров, различия по группам между которыми такое же, как и между полным списком элементов (64). Это Литий (Li), Бериллий (Be), Галлий (Ga), Ниобий (Nb), Лютеций (Lu) и Тантал (Ta). В дальнейшем только эти шесть элементов использовались для «размешивания» целевых образцов. В целом, качество моделирования можно считать удовлетворительным, так как критерий качества GOF составил 0.79 для руч. Левая Котельная, 0.92 для руч. Правая Котельная и 0.95 для р. Налычева. Результаты расчетов показали, что взвесь р. Налычева летом–осенью 2021 года формировалась в основном (75%) за счет поступления со склонов Авачинской группы вулканов (рис. 4). Размыв тела лахара на склонах Жупановского вулкана приносит только 20% материала, вероятно за счет существенной аккумуляции на пойме р. Лев. Налычева в среднем течении (до слияния с Прав. Налычева). Здесь методами морфометрического анализа [16, 33] отмечено существование локальных ловушек наносов, потенциально перехватывающих значительную часть химического стока. Анализировался профиль величины  $K_{sn}$ , представляющий собой отношение крутизны реки на данном участке к водосборной площади этого участка [37]:

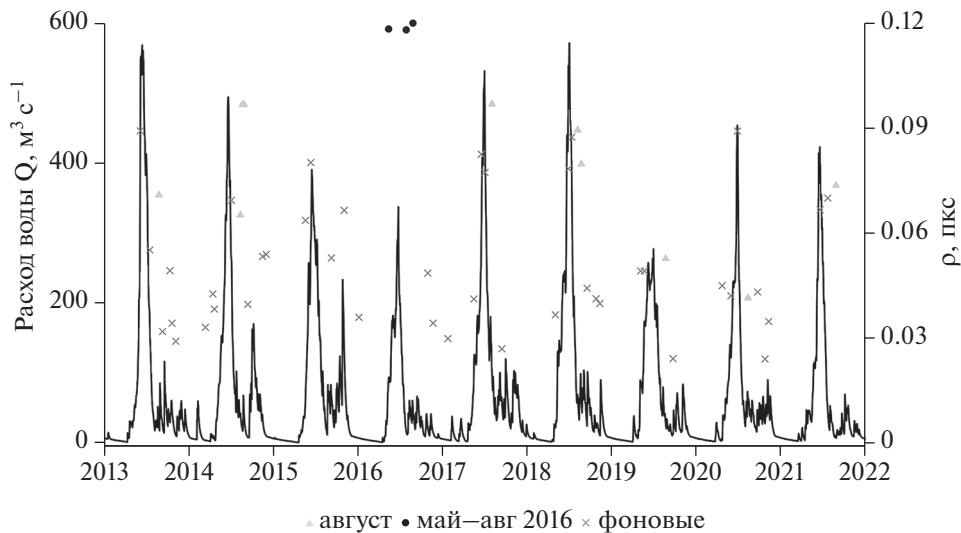
$$K_{sn} = SF^\theta, \quad (5)$$

где  $S$  – уклон русла (м/м);  $F$  – вышележащая водосборная площадь ( $\text{м}^2$ );  $\theta$  – индекс выпуклости, принимаемый равным 0.45 для возможности сравнения между собой рек разных порядков. Наличие точек перегиба на указанном участке р. Налычева свидетельствует о чередовании зоны эрозии и аккумуляции. Поступление наносов с водосбора р. Мутнушка составило 1%.

#### *Влияние схода лахара на Жупановском вулкане на сток наносов*

В пределах бассейна р. Налычева на склоне Жупановского вулкана (конуса Приемыш) в результате его эксплозивной активности в 2015–2016 гг. произошел обвал стенки его активного конуса в юго-западном направлении, что выразилось в формировании значительного по площади чехла из вулканогенных отложений (как обвального генезиса, так и пирокластических потоков), покрывающего прилегающие к склонам вулкана территории. Будучи значительно водонасыщенной (как за счет снежников и погребенного льда, так и за счет предшествующих событию обильных дождей), часть обвального материала трансформировалась в вулканический сель – лахаровый поток, заполнивший прилегающие к склону вулкана эрозионные врезы и долины ручьев. Согласно проведенным ранее исследованиям [1, 43], выделены несколько стадий трансформирования территории: 1) поступление материала от первичного обвала конуса (12 июля 2015 г.), его перекрытие отложениями пирокластических потоков и формирование водонасыщенных лахаровых потоков на поверхности обвального тела и прилегающей территории. Это сформировало две ветви выноса материала – в юго-западном и южном направлении; 2) дополнительное разрушение части конуса (14 июля), увеличившее мощность отложений на юго-западной ветви; 3) взрывные разрушения стенки конуса (27–30 ноября), материал которых был перераспределен по ветвям выноса водными потоками из растопленного при извержении льда и снега; 4) окончательное взрывное разрушение стенки конуса (12 февраля 2016 г.), сформировавшее новое обвальное тело и пирокластические потоки; 5) обвал склонов под конусом и пирокластические потоки, связанные с эксплозивным событием (24 марта). С большой долей вероятности во время каждого из этих событий формировались лахаровые, грязекаменные потоки, распространявшиеся в основном в южном направлении и увеличившие на 18% площадь затронутой территории по отношению к первичному обрушению. После окончания извержения началась эрозионная трансформация покрытой обвальными и лахаровыми отложениями территории за счет переноса мелкодисперсного материала водными потоками, что к 2021 году увеличило площадь затронутой территории еще на 3% – в основном, в крайней южной части, где чехол отложений, заполнивших долину ручья Домашний, практически достиг русла р. Налычева, на август 2021 года остановившись от нее в 800 м.

Проведенные оценки по космическим снимкам в устье р. Налычева свидетельствуют о диапазоне колебаний мутности в интервале от 2.4–506 мг/л. Мутности более 500 мг/л фиксируются в августе, среднее значение за июнь и июль равно 137 мг/л, среднегодовое – 79 мг/л. Для устья р. Налычева преимущественно характерны синхронные колебания стока воды и взвешенных наносов. Значения коэффициента отражения  $r$  по референсным точкам (рис. 2) за 2013–2021 гг., за исключением лета 2016 года, не превышали 0.1 пкс, в среднем составляя 0.05 пкс. В 2016 году в весенне-летний период наблюдалось превышение среднемноголетних значений в среднем в 1.7 раз. Значительные отскоки от фоновых значений свидетельствуют о повышенном поступлении взвесей в период 2016 года, т. е. непосредственно на следующий год после схода лахара на вулкане Жупановский. Повышенные концентрации взвешенных веществ, характерные для августа, наблюдались уже 12 мая 2016 года. Средние значения мутности в



**Рис. 5.** Изменения расходов воды в устье р. Налычева (по данным реанализа GloFAS-ERA5 [19]) и коэффициента отражения  $\rho$  для устья р. Налычева в 2013–2021 гг.

**Fig. 5.** Temporal variability of Nalycheva river discharge (estimated with GloFAS-ERA5 [19]) and reflectance coefficient  $\rho$  in the estuary for the 2013–2021 period.

июле 2016 года оказались выше среднемноголетних на 162%. В августе 2016 года зафиксирован максимум концентраций взвешенных веществ за весь рассматриваемый период. О вероятной роли специфических воздействий на сток наносов свидетельствуют также данные о пониженных расходах воды р. Налычева в период половодья 2016 года (рис. 5), когда максимум половодья составил  $337.9 \text{ м}^3/\text{s}$  при среднемноголетнем значении в  $367 \text{ м}^3/\text{s}$ .

#### 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящем исследовании впервые получена комплексная оценка материевого стока как важнейшей компоненты возможных воздействий со стороны исследуемого водосбора на океан.

1. Даны оценки водного стока в Авачинский залив, сопоставленные с фактическими концентрациями микроэлементов в составе взвешенных наносов и водах рек-притоков. Сделан вывод, что для формирования экологически значимых (для экосистемы лitorали) объемов поступления потенциально опасных загрязняющих веществ необходимы их концентрации в реках, превышающие экологически допустимые концентрации в течение всего года не менее чем в 8–9 раз, или в течение суток – условно примерно не менее чем в 3000 раз. Подобные масштабы загрязнений на исследуемом водосборе отсутствуют.

2. Установлено, что сток наносов в нижнем течении рек формируется в основном за счет разрушения пород на склонах вулканов. Так, в устьевом створе р. Налычева поток взвесей сформирован преимущественно притоками, берущими начало на восточных склонах Авачинского вулкана. Подавляющее количество наносов на малых реках, дренирующих юго-восточный склон Козельского вулкана (р. Котельная, Таенка, руч. Козельский), не доходит до устья этих рек.

3. Размыв тела обвала на Жупановском вулкане является существенным источником наносов в верхнем течении р. Налычева, но только малая часть этого материала достигает ее устья. Обрушение стенки вулкана Жупановский в 2015 году и формирование крупного лахара привело к увеличению стока наносов р. Налычева в течение одного 2016 года, т.е. непосредственно на следующий год после извержения. Сход лахара, несмотря на свои масштабы (объем сошедшего материала более чем в тысячу раз превышает годовой сток наносов), мог оказывать активное воздействие на экосистему бассейна только в первый год после повлекшего его возникновение события. По состоянию на 2020–2021 гг. его воздействие на сток наносов ограничено водосборной площадью руч. Домашний.

#### БЛАГОДАРНОСТИ

Исследование выполнено в рамках программы развития Междисциплинарной научно-образовательной школы МГУ имени М.В. Ломоносова “Будущее планеты и глобальные изменения окружающей среды” и при поддержке гранта Русского Географического Общества “Камчатская экспедиция: комплексная экологическая оценка рек района Авачинской группы вулканов Камчатки”. Исследование выполнено по госзаданию НИ Лаборатории эрозии почв и русловых процессов географического факультета МГУ (проект № 121051200166-4).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Горбач Н.В., Самойленко С.Б., Плечова А.А., Мельников Д.В., Горбач Н.В., Самойленко С.Б., Плечова А.А., Мельников Д.В. Обвал на вулкане Жупановский (Камчатка) в июле 2015 г.: первые данные и наблюдения // Вестн. КРАУНЦ. Сер. Науки о Земле. 2015. Т. 27. вып. 3. С. 5–11.
2. Есин Е.В. Обзор токсичности основных элементов-загрязнителей лососевых нерестовых рек камчатки // Известия ТИНРО. 2015. Т. 180. С. 210–225.
3. Есин Е.В., Чалов С.Р. Экологическая классификация рек вулканических территорий Камчатки // Чтения памяти Владимира Яковлевича Леванидова. 2014. Т. 6. С. 220–238.
4. Савенко В.С. Химический состав взвешенных наносов рек мира. М.: ГЕОС, 2006. 175 с.
5. Тарасов М.К., Тутубалина О.В. Методика определения мутности воды в р. Селенге и прилегающей акватории оз. Байкал по данным дистанционного зондирования // Исследования Земли из Космоса. 2018. Т. 1. С. 60–71.
6. Чалов С.Р., Ефимов В.А. Механический состав взвешенных наносов: классификации, характеристики, пространственная изменчивость // Вестник МГУ. Серия 5. География. 2021. Т. 5. С. 91–103.
7. Чалов С.Р., Прокопьевка К.Н. Оценка баланса взвешенных наносов в дельте р. Лена по данным дистанционного зондирования земли // Исследования Земли из космоса. 2021. Т. 2021. вып. 3. С. 19–29.  
<https://doi.org/10.31857/S0205961421030027>
8. Чалов С.Р., Цыпленков А.С. Сток наносов малых рек районов современного вулканизма (р. Сухая Елизовская, Камчатка) // Геоморфология. 2017. Т. 6. вып. 1. С. 104–116.  
<https://doi.org/10.15356/0435-4281-2017-1-104-116>
9. Berger C., McArdell B.W., Schluenzer F. Sediment transfer patterns at the Illgraben catchment, Switzerland: Implications for the time scales of debris flow activities // Geomorphology. 2011. V. 125. № 3. P. 421–432.  
<https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2010.10.019>
10. Bracken L.J., Wainwright J., Ali G.A., Tetzlaff D., Smith M.W., Reaney S.M., Roy A.G. Concepts of hydrological connectivity: Research approaches, pathways and future agendas // Earth-Science Reviews. 2013. V. 119. P. 17–34.  
<https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2013.02.001>
11. Cavalli M., Goldin B., Comiti F., Brardinoni F., Marchi L. Assessment of erosion and deposition in steep mountain basins by differencing sequential digital terrain models // Geomorphology. 2017. V. 291. P. 4–16.  
<https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2016.04.009>
12. Chalov S., Prokopeva K., Habel M. North to South Variations in the Suspended Sediment Transport Budget within Large Siberian River Deltas Revealed by Remote Sensing Data // Remote Sensing.

2021. V. 13. № 22. P. 4549.  
<https://doi.org/10.3390/rs13224549>
13. Chalov S.R., Tsyplenkova A.S., Pietron J., Chalova A.S., Shkolnyi D.I., Jarsjö J., Maerker M. Sediment transport in headwaters of a volcanic catchment—Kamchatka Peninsula case study // Frontiers of Earth Science in China. 2017. V. 11. № 3. P. 565–578.  
<https://doi.org/10.1007/s11707-016-0632-x>
14. Collins A.L., Pulley S., Foster I.D.L., Gellis A., Porto P., Horowitz A.J. Sediment source fingerprinting as an aid to catchment management: A review of the current state of knowledge and a methodological decision-tree for end-users // Journal of Environmental Management. 2017. V. 194. P. 86–108.  
<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.09.075>
15. Collins A.L., Walling D., Leeks G.J.L. Composite fingerprinting of the spatial source of fluvial suspended sediment : a case study of the Exe and Severn river basins, United Kingdom // Géomorphologie : relief, processus, environnement. 1996. V. 2. № 2. P. 41–53.  
<https://doi.org/10.3406/morfo.1996.877>
16. DiBiase R.A., Whipple K.X., Heimsath A.M., Ouimet W.B. Landscape form and millennial erosion rates in the San Gabriel Mountains, CA // Earth and Planetary Science Letters. 2010. V. 289. № 1–2. P. 134–144.  
<https://doi.org/10.1016/j.epsl.2009.10.036>
17. Evrard O., Navratil O., Ayral S., Ahmadi M., Némery J., Legout C., Lefèvre I., Poirel A., Bonté P., Esteves M. Combining suspended sediment monitoring and fingerprinting to determine the spatial origin of fine sediment in a mountainous river catchment // Earth Surface Processes and Landforms. 2011. V. 36. № 8. P. 1072–1089.  
<https://doi.org/10.1002/esp.2133>
18. Gaspar L., Lizaga I., Blake W.H., Latorre B., Quijano L., Navas A. Fingerprinting changes in source contribution for evaluating soil response during an exceptional rainfall in Spanish pre-pyrenees // Journal of Environmental Management. 2019. V. 240. № November 2018. P. 136–148.  
<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.03.109>
19. Harrigan S., Zsoter E., Alfieri L., Prudhomme C., Salamon P., Wetterhall F., Barnard C., Cloke H., Pappenberger F. GloFAS-ERA5 operational global river discharge reanalysis 1979–present // Earth System Science Data. 2020. V. 12. № 3.  
<https://doi.org/10.5194/essd-12-2043-2020>
20. Khesina Z.B., Karnaeva A.E., Pytskii I.S., Buryak A.K. The mysterious mass death of marine organisms on the Kamchatka Peninsula: A consequence of a technogenic impact on the environment or a natural phenomenon? // Marine Pollution Bulletin. 2021. V. 166. P. 112175.  
<https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2021.112175>
21. Lehner B., Grill G. Global river hydrography and network routing: baseline data and new approaches to study the world's large river systems // Hydrological Processes. 2013. V. 27. № 15. P. 2171–2186.  
<https://doi.org/10.1002/hyp.9740>
22. Linke S., Lehner B., Ouellet Dallaire C., Ariwi J., Grill G., Anand M., Beames P., Burchard-Levine V., Maxwell S., Moidu H., Tan F., Thieme M. Global hydro-environmental sub-basin and river reach characteristics at high spatial resolution // Scientific Data. 2019. V. 6. № 1. P. 283.  
<https://doi.org/10.1038/s41597-019-0300-6>
23. Lizaga I., Gaspar L., Blake W.H., Latorre B., Navas A. Fingerprinting changes of source apportionments from mixed land uses in stream sediments before and after an exceptional rainstorm event // Geomorphology. 2019. V. 341. P. 216–229.  
<https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2019.05.015>
24. Lizaga I., Latorre B., Gaspar L., Navas A. FingerPro: an R Package for Tracking the Provenance of Sediment // Water Resources Management. 2020. V. 34. № 12. P. 3879–3894.  
<https://doi.org/10.1007/s11269-020-02650-0>
25. Mao L., Cavalli M., Comiti F., Marchi L., Lenzi M.A., Arattano M. Sediment transfer processes in two Alpine catchments of contrasting morphological settings // Journal of Hydrology. 2009. V. 364. № 1–2. P. 88–98.  
<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2008.10.021>
26. Messenzehl K., Hoffmann T., Dikau R. Sediment connectivity in the high-alpine valley of Val Müschauns, Swiss National Park – linking geomorphic field mapping with geomorphometric modelling // Geomorphology. 2014. V. 221. P. 215–229.  
<https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2014.05.033>
27. Motha J.A., Wallbrink P.J., Hairsine P.B., Grayson R.B. Determining the sources of suspended sediment in a forested catchment in southeastern Australia // Water Resources Research. 2003. V. 39. № 3.  
<https://doi.org/10.1029/2001WR000794>

28. Owens P.N., Blake W.H., Gaspar L., Gateuille D., Koiter A.J., Lobb D.A., Petticrew E.L., Reiffarth D.G., Smith H.G., Woodward J.C. Fingerprinting and tracing the sources of soils and sediments: Earth and ocean science, geoarchaeological, forensic, and human health applications // *Earth-Science Reviews*. 2016. V. 162. P. 1–23.  
<https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2016.08.012>
29. Palazón L., Latorre B., Gaspar L., Blake W.H., Smith H.G., Navas A. Comparing catchment sediment fingerprinting procedures using an auto-evaluation approach with virtual sample mixtures // *Science of The Total Environment*. 2015. V. 532. P. 456–466.  
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.05.003>
30. Phillips J.M., Russell M.A., Walling D.E. Time-integrated sampling of fluvial suspended sediment: a simple methodology for small catchments // *Hydrological Processes*. 2000. V. 14. № 14. P. 2589–2602.  
[https://doi.org/10.1002/1099-1085\(20001015\)14:14<2589::AID-HYP94>3.0.CO;2-D](https://doi.org/10.1002/1099-1085(20001015)14:14<2589::AID-HYP94>3.0.CO;2-D)
31. Pulley S., Collins A.L. Tracing catchment fine sediment sources using the new SIFT (SedIment Fingerprinting Tool) open source software // *Science of the Total Environment*. 2018. V. 635. P. 838–858.  
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.04.126>
32. Romanescu G., Chalov S., Stoleriu C.C., Mihu-Pintilie A., Angileri S.E., Kuznetsova Y., Cama M., Maerker M. Geomorphologic map of the 1st Mutnaya River, Southeastern Kamchatka, Russia // *Journal of Mountain Science*. 2017. V. 14. № 12. P. 2373–2390.  
<https://doi.org/10.1007/s11629-017-4358-3>
33. Vanacker V., Blanckenburg F. von, Govers G., Molina A., Campforts B., Kubik P.W. Transient river response, captured by channel steepness and its concavity // *Geomorphology*. 2015. V. 228. P. 234–243.  
<https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2014.09.013>
34. Vigjak O., Borselli L., Newham L.T.H., McInnes J., Roberts A.M. Comparison of conceptual landscape metrics to define hillslope-scale sediment delivery ratio // *Geomorphology*. 2012. V. 138. № 1. P. 74–88.  
<https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2011.08.026>
35. Walling D.E. The sediment delivery problem // *Journal of Hydrology*. 1983. V. 65. № 1–3. P. 209–237.  
[https://doi.org/10.1016/0022-1694\(83\)90217-2](https://doi.org/10.1016/0022-1694(83)90217-2)
36. Walling D.E. Tracing suspended sediment sources in catchments and river systems // *Science of The Total Environment*. 2005. V. 344. № 1–3. P. 159–184.  
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2005.02.011>
37. Wobus C., Whipple K.X., Kirby E., Snyder N., Johnson J., Spyropoulos K., Crosby B., Sheehan D. Tectonics from topography: Procedures, promise, and pitfalls // *Tectonics, Climate, and Landscape Evolution*. Geological Society of America, 2006.  
[https://doi.org/10.1130/2006.2398\(04\)](https://doi.org/10.1130/2006.2398(04))
38. Yakubovich O.V., Yakovleva E.V., Golovanov A.N., Volkov A.S., Volkova O.S., Zvereva E.A., Dimitrova O.V., Vasiliev A.N. The First Vanadate–Carbonate, K 2 Mn 3 (VO 4) 2 (CO 3) : Crystal Structure and Physical Properties // *Inorganic Chemistry*. 2013. V. 52. № 3. P. 1538–1543.  
<https://doi.org/10.1021/ic302333e>
39. Березовская В.А. Авачинская губа. Гидрохимический режим, антропогенное воздействие. Петропавловск-Камчатский: КГАРФ, 1999.
40. Бондур В.Г., Замшин В.В., Чверткова О.И. Исследование из космоса экологического происшествия у полуострова Камчатка в сентябре–октябре 2020 г., связанного с красным приливом // Доклады Российской Академии Наук. Науки О Земле. 2021. Т. 497. вып. 1.  
<https://doi.org/10.31857/S2686739721030014>
41. Бондур В.Г., Замшин В.В., Чверткова О.И., Матросова Е.Р., Ходаева В.Н. Анализ причин экологического происшествия на Камчатке осенью 2020 г., связанного с красным приливом, на основании космических данных // Исследование Земли Из Космоса. 2021. вып. 3.  
<https://doi.org/10.31857/S020596142103009X>
42. Виноградов В.Н., Муравьев Я.Д. Ледник Козельский (Авачинская группа вулканов) Водно-ледниковый и тепловой баланс горноледниковых бассейнов. Спб: Гидрометеоиздат, 1992.
43. Гирина О.А., Лупян Е.А., Сорокин А.А., Мельников Д.В., Маневич А.Г., Маневич Т.М. Спутниковые и наземные наблюдения эксплозивных извержений вулкана Жупановский (Камчатка, Россия) в 2013 и 2014–2016 гг // Вулканология и сейсмология. 2018. вып. 1. С. 3–17.
44. Куксина Л.В., Алексеевский Н.И. Эрозионное районирование территории Камчатского края // География И Природные Ресурсы. 2016. Т. 2. С. 132–141.
45. Терский П.Н., Жбаков К.К., Михеева А.И. Связь морфометрических характеристик водосборов и ландшафтных условий в бассейне Р. Авачи (камчатка) с характеристиками среднего и максимального стока рек // Исследования водных биологических ресурсов Кам-

- чатки и северо-западной части Тихого океана. 2017. вып. 46. С. 51–65.  
<https://doi.org/10.15853/2072-8212.2017.46.51-65>
46. Kamchatka: Pollution killing sea life in Russian far east // BBC News. 2020.
47. 95% of Marine Life on Sea Floor Killed in Kamchatka Eco-Disaster, Scientists Say // The Moscow Times. 2020.

### Overland Runoff and its Impact on Hydrobiont Mortality in Avachinsky Gulf (Pacific Ocean, Kamchatka)

**S. R. Chalov<sup>1, 2</sup>, A. S. Tsyplenkova<sup>1, \*</sup>, D. I. Shkolny<sup>1</sup>, K. N. Prokopeva<sup>1</sup>, and E. I. Bahareva<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>*Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia*

<sup>2</sup>*All-Russian Research Institute of Fisheries and Oceanography,  
Moscow, Russia*

*\*E-mail: atsyplenkova@geogr.msu.ru*

This work discusses the specific features of riverine sediment inflow and its chemical composition to the Avachinsky Gulf of the Pacific Ocean. Based on the GloFAS-ERA5 reanalysis data, we assessed the hydrologic regime of the studied rivers. Further, the fingerprinting method was used to find the sediment transport pathways. In contrast, the sediment delivery to the Pacific Ocean with the Nalycheva River runoff is determined by the interpretation of turbidity plumes on Landsat satellite images. Our findings suggested the leading role of erosion processes on volcanic slopes in forming sediment yield associated with three primary sediment sources: the slopes of Avachinsky, Zhupanovsky and Kupol volcanoes. Our research pays special attention to the lahar consequences on the Zhupanovsky volcano slopes, which occurred in 2015. We supposed that this event had a short-term (within one year) impact on the sediment redistribution of the Nalycheva River estuary.

**Keywords:** Kamchatka, sediment yield, dissolved solids load, red tides, hydrobionts, natural disaster

### REFERENCES

- Gorbach N.V., Samoilenko S.B., Plechova A.A., Melnikov D.V., Gorbach N.V., Samoilenko S.B., Plechova A.A., Melnikov D.V. Obval na vulkane Zhupanovskii (Kamchatka) v iule 2015 g.: pervye dannye i nabliudeniia // Vestn. KRAUNTS. Ser. Nauki o Zemle. 2015. V. 27. № 3. P. 5–11.
- Esin E.V. Obzor toksichnosti osnovnykh elementov-zagriznitelei lososevykh nerestovykh rek kamchatki // Izvestiya TINRO. 2015. V. 180. P. 210–225.
- Esin E.V., Chalov S.R. Ekologicheskaja klassifikatsiya rek vulkanicheskikh territorii Kamchatki // Chtenija pamyati Vladimira Iakovlevicha Levanidova. 2014. V. 6. P. 220–238.
- Savenko V.S. Khimicheskii sostav vzveshennykh nanosov rek mira. M.: GEOS, 2006. 175 s.
- Tarasov M.K., Tutubalina O.V. Water turbidity estimation in the Selenga River and nearby waters of lake Baikal using remote sensing data // Issledovaniia Zemli iz Kosmosa. 2018. V. 1. P. 60–71.
- Chalov S.R., Efimov V.A. Particulate composition of suspended sediments: characteristics, classifications and spatial variability // Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 5, Geografiya. 2021. № 4. P. 91–103.
- Chalov S.R., Prokopeva K.N. Assessment suspended sediment budget of the Lena river delta based on the remote sensing dataset // Issledovaniia Zemli iz Kosmosa. 2021. № 3. P. 19–29. <https://doi.org/10.31857/S0205961421030027>
- Chalov S.R., Tsyplenkova A.S. Sediment discharge of small rivers in areas of active volcanism (River Sukhaya Elizovskaya, Kamchatka) // Geomorfologiya. 2017. V. 6. № 1. P. 104–116. <https://doi.org/10.15356/0435-4281-2017-1-104-116>
- Berger C., McArdell B.W., Schluener F. Sediment transfer patterns at the Illgraben catchment, Switzerland: Implications for the time scales of debris flow activities // Geomorphology. 2011. V. 125. № 3. P. 421–432. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2010.10.019>
- Bracken L.J., Wainwright J., Ali G.A., Tetzlaff D., Smith M.W., Reaney S.M., Roy A.G. Concepts of hydrological connectivity: Research approaches, pathways and future agendas // Earth-Science Reviews. 2013. V. 119. P. 17–34. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2013.02.001>
- Cavalli M., Goldin B., Comiti F., Brardinoni F., Marchi L. Assessment of erosion and deposition in steep mountain basins by differencing sequential digital terrain models // Geomorphology. 2017. V. 291. P. 4–16. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2016.04.009>

12. Chalov S., Prokopeva K., Habel M. North to South Variations in the Suspended Sediment Transport Budget within Large Siberian River Deltas Revealed by Remote Sensing Data // *Remote Sensing*. 2021. V. 13. № 22. P. 4549. <https://doi.org/10.3390/rs13224549>
13. Chalov S.R., Tsyplenkova A.S., Pietron J., Chalova A.S., Shkolnyi D.I., Jarsjö J., Maerker M. Sediment transport in headwaters of a volcanic catchment—Kamchatka Peninsula case study // *Frontiers of Earth Science in China*. 2017. V. 11. № 3. P. 565–578. <https://doi.org/10.1007/s11707-016-0632-x>
14. Collins A.L., Pulley S., Foster I.D.L., Gellis A., Porto P., Horowitz A.J. Sediment source fingerprinting as an aid to catchment management: A review of the current state of knowledge and a methodological decision-tree for endusers // *Journal of Environmental Management*. 2017. V. 194. P. 86–108. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.09.075>
15. Collins A.L., Walling D., Leeks G.J.L. Composite fingerprinting of the spatial source of fluvial suspended sediment: a case study of the Exe and Severn river basins, United Kingdom // *Géomorphologie : relief, processus, environnement*. 1996. V. 2. № 2. P. 41–53. <https://doi.org/10.3406/morfo.1996.877>
16. DiBiase R.A., Whipple K.X., Heimsath A.M., Quimet W.B. Landscape form and millennial erosion rates in the San Gabriel Mountains, CA // *Earth and Planetary Science Letters*. 2010. V. 289. № 1–2. P. 134–144. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2009.10.036>
17. Evrard O., Navratil O., Ayrault S., Ahmadi M., Némery J., Legout C., Lefèvre I., Poirel A., Bonté P., Esteves M. Combining suspended sediment monitoring and fingerprinting to determine the spatial origin of fine sediment in a mountainous river catchment // *Earth Surface Processes and Landforms*. 2011. V. 36. № 8. P. 1072–1089. <https://doi.org/10.1002/esp.2133>
18. Gaspar L., Lizaga I., Blake W.H., Latorre B., Quijano L., Navas A. Fingerprinting changes in source contribution for evaluating soil response during an exceptional rainfall in Spanish pre-Pyrenees // *Journal of Environmental Management*. 2019. V. 240. N November 2018. P. 136–148. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.03.109>
19. Harrigan S., Zsoter E., Alfieri L., Prudhomme C., Salamon P., Wetterhall F., Barnard C., Cloke H., Pappenberger F. GloFAS-ERA5 operational global river discharge reanalysis 1979-present // *Earth System Science Data*. 2020. V. 12. № 3. <https://doi.org/10.5194/essd-12-2043-2020>
20. Khesina Z.B., Karnaeva A.E., Pytskii I.S., Buryak A.K. The mysterious mass death of marine organisms on the Kamchatka Peninsula: A consequence of a technogenic impact on the environment or.
21. Lehner B., Grill G. Global river hydrography and network routing: baseline data and new approaches to study the world's large river systems // *Hydrological Processes*. 2013. V. 27. № 15. P. 2171–2186. <https://doi.org/10.1002/hyp.9740>
22. Linke S., Lehner B., Ouellet Dallaire C., Ariwi J., Grill G., Anand M., Beames P., Burchard-Levine V., Maxwell S., Moidu H., Tan F., Thieme M. Global hydro-environmental sub-basin and river reach characteristics at high spatial resolution // *Scientific Data*. 2019. V. 6. № 1. P. 283. <https://doi.org/10.1038/s41597-019-0300-6>
23. Lizaga I., Gaspar L., Blake W.H., Latorre B., Navas A. Fingerprinting changes of source apportionments from mixed land uses in stream sediments before and after an exceptional rainstorm event // *Geomorphology*. 2019. V. 341. P. 216–229. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2019.05.015>
24. Lizaga I., Latorre B., Gaspar L., Navas A. FingerPro: an R Package for Tracking the Provenance of Sediment // *Water Resources Management*. 2020. V. 34. № 12. P. 3879–3894. <https://doi.org/10.1007/s11269-020-02650-0>
25. Mao L., Cavalli M., Comiti F., Marchi L., Lenzi M.A., Arattano M. Sediment transfer processes in two Alpine catchments of contrasting morphological settings // *Journal of Hydrology*. 2009. V. 364. № 1–2. P. 88–98. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2008.10.021>
26. Messenleh K., Hoffmann T., Dikau R. Sediment connectivity in the high-alpine valley of Val Müschauns, Swiss National Park – linking geomorphic field mapping with geomorphometric modelling // *Geomorphology*. 2014. V. 221. P. 215–229. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2014.05.033>
27. Motha J.A., Wallbrink P.J., Hairsite P.B., Grayson R.B. Determining the sources of suspended sediment in a forested catchment in southeastern Australia // *Water Resources Research*. 2003. V. 39. № 3. <https://doi.org/10.1029/2001WR000794>
28. Owens P.N., Blake W.H., Gaspar L., Gateuille D., Koiter A.J., Lobb D.A., Petticrew E.L., Reiffarth D.G., Smith H.G., Woodward J.C. Fingerprinting and tracing the sources of soils and sediments: Earth and ocean science, geoarchaeological, forensic, and human health applications // *Earth-Science Reviews*. 2016. V. 162. P. 1–23. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2016.08.012>
29. Palazón L., Latorre B., Gaspar L., Blake W.H., Smith H.G., Navas A. Comparing catchment sediment fingerprinting procedures using an auto-evaluation approach with virtual sample mixtures // *Science of The Total Environment*. 2015. V. 532. P. 456–466. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.05.003>

30. Phillips J.M., Russell M.A., Walling D.E. Time-integrated sampling of fluvial suspended sediment: a simple methodology for small catchments // *Hydrological Processes*. 2000. V. 14. № 14. P. 2589–2602.  
[https://doi.org/10.1002/1099-1085\(20001015\)14:14<2589::AID-HYP94>3.0.CO;2-D](https://doi.org/10.1002/1099-1085(20001015)14:14<2589::AID-HYP94>3.0.CO;2-D)
31. Pulley S., Collins A.L. Tracing catchment fine sediment sources using the new SIFT (SedIment Fingerprinting Tool) open source software // *Science of the Total Environment*. 2018. V. 635. P. 838–858.  
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.04.126>
32. Romanescu G., Chalov S., Stoleriu C.C., Mihu-Pintilie A., Angileri S.E., Kuznetsova Y., Cama M., Maerker M. Geomorphologic map of the 1st Mutnaya River, Southeastern Kamchatka, Russia // *Journal of Mountain Science*. 2017. V. 14. № 12. P. 2373–2390.  
<https://doi.org/10.1007/s11629-017-4358-3>
33. Vanacker V., Blanckenburg F. von, Govers G., Molina A., Campforts B., Kubik P.W. Transient river response, captured by channel steepness and its concavity // *Geomorphology*. 2015. V. 228. P. 234–243.  
<https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2014.09.013>
34. Viglak O., Borselli L., Newham L.T.H., McInnes J., Roberts A.M. Comparison of conceptual landscape metrics to define hillslope-scale sediment delivery ratio // *Geomorphology*. 2012. V. 138. № 1. P. 74–88.  
<https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2011.08.026>
35. Walling D.E. The sediment delivery problem // *Journal of Hydrology*. 1983. V. 65. № 1–3. P. 209–237.  
[https://doi.org/10.1016/0022-1694\(83\)90217-2](https://doi.org/10.1016/0022-1694(83)90217-2)
36. Walling D.E. Tracing suspended sediment sources in catchments and river systems // *Science of The Total Environment*. 2005. V. 344. № 1–3. P. 159–184.  
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2005.02.011>
37. Wobus C., Whipple K.X., Kirby E., Snyder N., Johnson J., Spyropoulos K., Crosby B., Sheehan D. Tectonics from topography: Procedures, promise, and pitfalls // *Tectonics, Climate, and Landscape Evolution*. Geological Society of America, 2006.  
[https://doi.org/10.1130/2006.2398\(04\)](https://doi.org/10.1130/2006.2398(04))
38. Yakubovich O.V., Yakovleva E.V., Golovanov A.N., Volkov A.S., Volkova O.S., Zvereva E.A., Dimitrova O.V., Vasiliev A.N. The First Vanadate–Carbonate, K<sub>2</sub>Mn<sub>3</sub>(VO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>(CO<sub>3</sub>): Crystal Structure and Physical Properties // *Inorganic Chemistry*. 2013. V. 52. № 3. P. 1538–1543.  
<https://doi.org/10.1021/ic302333e>
39. Berezovskaja V.A. Avachinskaia guba. Gidrokhimicheskii rezhim, antropogennoe vozdeistvie. Petropavlovsk-Kamchatskii: KGARF, 1999.
40. Bondur V.G., Zamshin V.V., Chvertkova O.I. Space study of a red tide-related environmental disaster near Kamchatka peninsula in September–October 2020 // *Doklady Earth Sciences*. 2021. V. 497. № 1. P. 255–260.  
<https://doi.org/10.31857/S2686739721030014>
41. Bondur V.G., Zamshin V.V., Chvertkova O.I., Matrosova E.R., Khodaeva V.N. Analysis of the causes of the Kamchatka environmental disaster in autumn 2020 related with a red tide, based on satellite data // *Issledovanie Zemli Iz Kosmosa*. 2021. №. 3. P. 3–18  
<https://doi.org/10.31857/S020596142103009X>
42. Vinogradov V.N., Muravev Ia.D. Lednik Kozelskii (Avachinskaia gruppa vulkanov) Vodno-lednikovy i teplovoi balans gornolednikovykh basseinov. Spb: Gidrometeoizdat, 1992.
43. Girina O.A., Lupian E.A., Sorokin A.A., Melnikov D.V., Manevich A.G., Manevich T.M. Sputnikove i nazemnye nabliudeniia eksplozivnykh izverzhenii vulkana Zhupanovskii (Kamchatka, Rossiia) v 2013 i 2014–2016 gg // *Vulkanologija i seismologija*. 2018. № 1. P. 3–17.
44. Kuksina L.V., Alekseevkii N.I. Erozionnoe raionirovanie territorii Kamchatskogo kraia // *Geografija I Prirodnye Resursy*. 2016. V. 2. P. 132–141.
45. Terskii P.N., Zhbakov K.K., Mikheeva A.I. Sviaz morfometricheskikh kharakteristik vodosborov i landshaftnykh uslovii v basseine R. Avachi (kamchatka) s kharakteristikami srednegodovogo i maksimalnogo stoka rek // *Issledovaniia vodnykh biologicheskikh resursov Kamchatki i severo-zapadnoi chasti Tikhogo okeana*. 2017. № 46. P. 51–65.  
<https://doi.org/10.15853/2072-8212.2017.46.51-65>
46. Kamchatka: Pollution killing sea life in Russian far east // BBC News. 2020.
47. 95% of Marine Life on Sea Floor Killed in Kamchatka Eco-Disaster, Scientists Say // *The Moscow Times*. 2020.