

## СЕЗОННАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ КОНЦЕНТРАЦИИ БИОГЕННЫХ ВЕЩЕСТВ И ОРГАНИЧЕСКОГО УГЛЕРОДА В РЕКАХ КАМЧАТКЕ И АВАЧЕ (ПОЛУОСТРОВ КАМЧАТКА) В 2023 г.<sup>1</sup>

© 2025 г. П. Ю. Семкин<sup>a,\*</sup>, Г. Ю. Павлова<sup>a</sup>, С. Л. Горин<sup>b</sup>, А. М. Колтунов<sup>a</sup>,  
Е. В. Лепская<sup>c</sup>, О. А. Уланова<sup>a</sup>, Е. М. Шкирникова<sup>a</sup>, М. Г. Швецова<sup>a</sup>, Ю. Сүйд<sup>d</sup>,  
С. Цзян<sup>d</sup>, Дж. Чжан<sup>d</sup>

<sup>a</sup>Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН, Владивосток, 690041 Россия

<sup>b</sup>Всероссийский научно-исследовательский институт рыбного хозяйства и океанографии, Москва, 105187 Россия

<sup>c</sup>Камчатский филиал «Всероссийского научно-исследовательского института рыбного хозяйства и океанографии»,  
Петропавловск-Камчатский, 683000 Россия

<sup>d</sup>Государственная ключевая лаборатория исследований эстуариев и прибрежных зон,  
Восточно-Китайский педагогический университет, Шанхай, 200241 Китай

\*e-mail: pahno@list.ru

Поступила в редакцию 15.04.2024 г.

После доработки 29.05.2024 г.

Принята к публикации 30.05.2024 г.

В 2023 г. в основные фазы водного режима проведены четыре экспедиции для отбора проб воды от истоков до устья в реках Камчатке и Аваче, впадающих в зал. Камчатский и бух. Авачинскую Восточной Камчатки соответственно. В р. Камчатке установлены сезонные экстремумы концентраций и потоков с речным стоком минерального и органического фосфора, а также органического углерода в период таяния снега в долине реки и на высокогорье (май–июнь), что в меньшей степени проявилось для р. Авачи. Годовые потоки со стоком рек Камчатки и Авачи составили соответственно 4565 и 289 т/год для  $P_{\text{общ}}$ , 9526 и 2006 т/год для  $N_{\text{общ}}$ , 60485 и 3992 т/год для РОУ. Обсуждены источники и потоки биогенных веществ на водосборах исследуемых рек и потенциальные отклики водных экосистем приемных бассейнов в связи с вулканизмом, в том числе в связи с извержением вулкана Шивелуч, произошедшим 11 апреля 2023 г.

**Ключевые слова:** речной сток, биогенные вещества, углерод, вулканизм, прибрежно-морская экосистема, Восточная Камчатка.

**DOI:** 10.31857/S0321059625010102 **EDN:** UXMJWM

### ВВЕДЕНИЕ

Потоки биогенных веществ (БВ) и растворенного органического углерода (РОУ) со стоком рек важны для морских экосистем, поскольку их влияние проявляется в масштабе глобального биогеохимического цикла элементов [19]. Эвтрофикация — увеличение концентраций минерального азота DIN (dissolved inorganic nitrogen) и фосфора DIP (dissolved inorganic phosphorus) и РОУ — в шельфовых экосистемах Мирового океана связывается преимущественно с сельским хозяйством и сточными водами и сопровождается

ся негативными последствиями для гидробионтов [18, 21, 42]. Эвтрофикация также может быть связана с природными процессами, такими как хоуминг лососей [55] и вулканизм [20].

Известно, что вулканический пепел (тефра) обогащается БВ и железом (Fe) за счет конденсации вулканических газов и адсорбции аэрозолей на частицах тефры во время извержений [53]. Эксперименты по выделению солей металлов и БВ из тефры показали их разные концентрации в морской воде с течением времени [7, 36]. В публикациях показано, что в районах влияния стока рек Восточной Камчатки за последние 50 лет регулярно происходит цветение фитопланктона, включая цветение потенциально токсичных видов [5, 6, 44]. При этом полевые исследования БВ в реках Камчатки сильно затруднены отсутстви-

<sup>1</sup> Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект 23-77-10001) и в рамках Межведомственной комплексной программы научных исследований Камчатского полуострова и сопредельных акваторий в 2024–2026 гг. (регистрационный № 124072200009-5) в ТОИ ДВО РАН).

ем инфраструктуры. Поэтому из-за сочетания разной интенсивности вулканизма и разнообразия геохимии пеплов [1, 9, 10], биологических процессов на водосборах [4] и водного режима рек Камчатки [3] пространственно-временная изменчивость и потоки соединений БВ все еще остаются малоизученными.

Цель настоящей работы – изучение сезонной изменчивости концентрации БВ и РОУ в 2023 г. в двух наиболее значимых реках Восточной Камчатки. Особенность 2023 г. – сильнейшее за несколько десятилетий извержение вулкана Шивелуч, случившееся 11 апреля (сообщение А.Ю. Озерова и множественные сообщения СМИ).

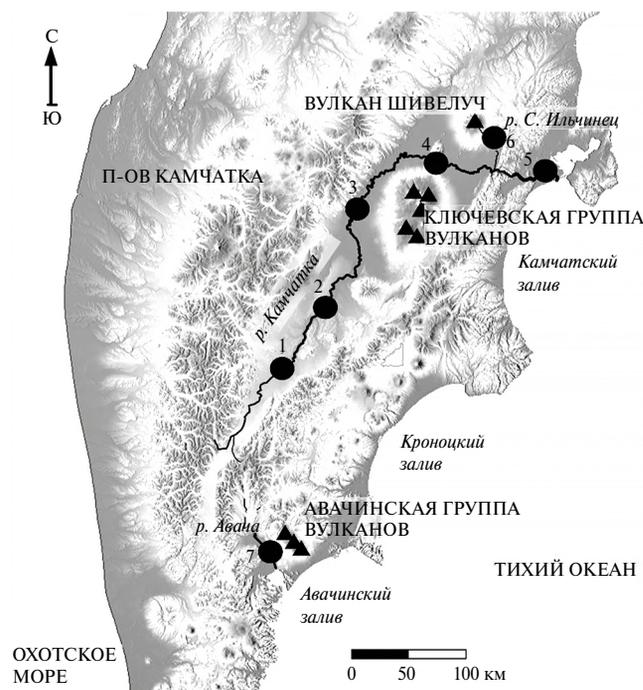
## ОБЪЕКТ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

### *Общая физико-географическая характеристика изучаемого района*

Камчатка – крупнейшая река п-ова Камчатка, дренирующая почти на всем протяжении Центральную Камчатскую депрессию (рис. 1). Камчатка имеет площадь водосбора 55 900 км<sup>2</sup> при длине 758 км. Авача – сравнительно крупная река на юго-восточном побережье Камчатки. Длина р. Авачи – 122 км, площадь водосбора составляет 5090 км<sup>2</sup>. Изучаемые реки имеют преимущественно подземное питание при значительном участии талого стока. Величина подземного водного стока для среднего по водности года для р. Камчатки составляет 50–70%, для р. Авачи – 50% [11]. Большой удельный вес подземных вод в поверхностном стоке этих рек объясняется особенностями геологического строения речных бассейнов, а именно распространением вулканогенных эффузивных пород. Это создает благоприятные условия для инфильтрации талых и дождевых вод и накопления значительных запасов подземных вод, оказывающих регулирующее влияние на речной сток. Из-за отрицательной среднегодовой температуры и большого количества твердых осадков рассматриваемый регион имеет снежный покров 180–300 дней в году, а в высокогорных районах распространены ледники [11]. Ледовые явления на реках Камчатки наблюдаются с начала ноября до мая. В бассейне р. Камчатки насчитывается 7707 мелких рек [11],

а в большинстве из притоков р. Камчатки располагаются нерестилища лососевых видов рыб.

Бассейны исследуемых рек расположены в зоне пеплопадов, где тефра распространяется на расстояние сотен километров от действующих вулканов. Наиболее активные вулканы изучаемого региона – Шивелуч, Ключевской, Безымянный, Плоский Толбачик, Карымский, Авачинский, Корякский, Горелый и Мутновский [2]. В нижней части водосбора р. Камчатки расположены наиболее активные вулканы Ключевской группы (рис. 1), среди которых вулкан Ключевской – самый высокий активный вулкан в Евразии высотой до 4850 м над уровнем моря и вулкан Шивелуч высотой 3283 м. В состав левобережного водосбора р. Авачи входят вулканы Авачинской группы (рис. 1), два из которых – Авачинский и Корякский – действующие. Высота Авачинского и Корякского вулканов составляет 2741 и 3456 м соответственно. Поскольку в задачи исследования входила оценка потоков БВ и РОУ в связи с вулканизмом в 2023 г., авторами была выбрана р. Сухой Ильчинец с водосбором непосредственно на склонах вулкана Шивелуч. В литературе не найдена информация о наблюдениях за гидро-



**Рис. 1.** Изучаемый район: • – станции отбора проб воды; ▲ – действующие вулканы в бассейнах изучаемых рек.

логическими и химическими характеристиками данной реки. Визуально вода в р. Сухой Ильчинец содержала наибольшее количество взвеси по сравнению с другими притоками на протяжении всей автодороги в бассейне р. Камчатки. В течение всего года вода в данном притоке имела коричнево-красноватый цвет, особенно в период снеготаяния в мае и июне после извержения вулкана Шивелуч. Активный вулканизм формирует преимущественно вулканический тип почв в бассейнах изучаемых рек [4].

Плотность населения в бассейне р. Камчатки низкая. Крупнейшие поселки – Мильково, Ключи, Козыревск с населением около 7300, 4200, 950 человек соответственно. Хозяйственная деятельность на территории бассейна реки практически не развита, т. е. природные условия остаются по большей части незатронутыми, о чем свидетельствует наличие популяции бурых медведей на полуострове примерно в 10000 особей. Таким образом, р. Камчатка – это объект для изучения естественных природных биогеохимических процессов в условиях вулканизма.

Авача, в отличие от Камчатки, получает дополнительный к природному приток БВ из г. Елизово с населением около 36 тыс. человек. Камчатка и Авача впадают в Камчатский залив и в бух. Авачинскую зал. Авачинского Тихого океана соответственно (рис. 1).

#### Водный режим изучаемых рек

Ключевая фаза водного режима изучаемых рек – затяжное весенне-летнее половодье с мая по июль, на которое приходится 70% их годового стока. Расход воды обычно увеличивается с начала мая и имеет два пика. Первый пик небольшой и обусловлен таянием снега в долинах рек; второй пик обусловлен таянием снега и льда в высокогорных районах и приходится на конец июня – начало июля. После половодья с сентября по октябрь наступает относительно многоводная устойчивая осенняя межень. Затем до конца апреля – начала мая устанавливается зимняя межень [11].

Средний годовой расход воды р. Камчатки в пункте наблюдений “Большие Щеки” составля-

ет ( $\text{м}^3/\text{с}$ ): 924 – за период с 1937 по 1985 г., 859 – за 1980–2008 гг. и 785 – за 2008–2020 гг. [32]. Из этих данных можно видеть, что расход р. Камчатки за 80 лет наблюдений уменьшился на  $> 10\%$ .

В настоящее время доступны данные по расходу р. Камчатки в пункте наблюдений пос. Ключи с 2008 г. для теплого периода года [32], согласно которым максимальные среднемесячные расходы воды изучаемых рек сместились с июля [12] на июнь (рис. 2). Абсолютные максимальные среднесуточные расходы при этом наблюдались в конце июня либо в самом начале июля, включая наиболее многоводный 2013 г., когда расход воды 19 июня достигал  $3010 \text{ м}^3/\text{с}$ .

Среднегодовой расход р. Авачи за 2008–2020 гг. составил  $138 \text{ м}^3/\text{с}$  [32]. Максимальные годовые расходы р. Авачи наблюдаются во время второго пика половодья – до  $940 \text{ м}^3/\text{с}$  (по данным 2013 г.). При этом средние расходы за 2008–2020 гг. составляют  $351.4$  и  $239.4 \text{ м}^3/\text{с}$  для июня и июля соответственно. Наименьшие расходы наблюдались в декабре–феврале, когда среднемесячные величины колебались от 80 до  $74 \text{ м}^3/\text{с}$ .

#### Полевые работы и отбор проб

Пробы воды отбирались на станциях, координаты которых представлены в табл. 1, а положение схематично показано на рис. 1. Пробы воды на всех семи станциях были отобраны за одни сутки в следующие даты: 1 апреля, 22 мая, 17 июня и 6 сентября 2023 г. На следующий день после отбо-

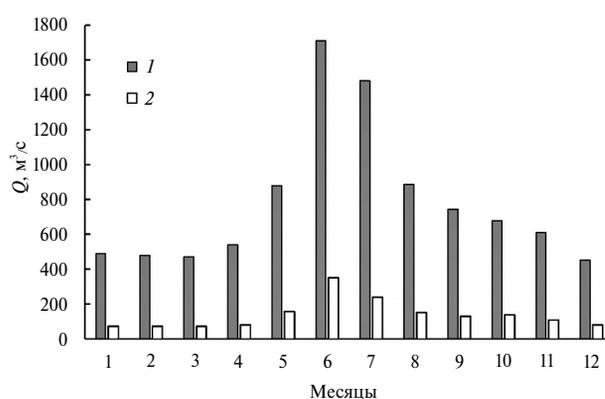


Рис. 2. Среднемесячные расходы воды ( $\text{м}^3/\text{с}$ ) рек Камчатки (п. Ключи) – 1 и Авачи (п. Елизово) – 2, полученные при осреднении за период с 2008 по 2020 г.

**Таблица 1.** Координаты станций отбора проб воды и названия поселков, расположенных вблизи станций

№ станции	Географические координаты	
	с.ш.	в.д.
1 (пос. Мильково)	54° 37.462′	158° 27.781′
2 (пос. Долиновка)	55° 06.953′	159° 03.951′
3 (пос. Козыревск)	55° 55.249′	159° 40.740′
4 (пос. Ключи)	56° 20.184′	160° 50.476′
5 (пос. Усть-Камчатск)	56° 14.572′	162° 29.508′
р. Сухой Ильчинец	56° 30.170′	161° 37.591′
р. Авача	53° 05.511′	158° 24.810′

ра пробы доставлялись в лабораторию гидрохимии ТОИ ДВО РАН (г. Владивосток), где сразу проводились измерения. В день доставки анализировались БВ в минеральной форме: DIP, DIN ( $\text{NO}_2^-$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{NH}_4^+$ ), силикаты DSi (dissolved silicate). Пробы для определения общего азота и общего осфора ( $N_{\text{общ}} = \text{DIN} + N_{\text{орг}}$ ;  $P_{\text{общ}} = \text{DIP} + P_{\text{орг}}$ ) замораживались в день доставки и в последующем анализировались в течение месяца.

В день извержения вулкана Шивелуч (11 апреля 2023 г.) была отобрана проба пепла в районе пос. Ключи (ст. 4, рис. 1), помещена в пластиковый контейнер и заморожена при температуре  $-20^\circ\text{C}$ . В течение трех дней проба пепла была доставлена в ТОИ ДВО РАН. Далее был проведен эксперимент с измерениями концентраций БВ в сериях двух типов проб воды – морской с соленостью 34.06 psu и воды Milli-Q, в которые добавляли пепел в соотношении 1 : 10. Пробы разливались в темные пластиковые бутылки объемом 0.5 л, непрерывно взбалтывались и находились при температуре  $\sim 23^\circ\text{C}$  на протяжении всего эксперимента. После контакта пепла с водой измерялась концентрация БВ в разные интервалы времени: от 10 мин до 9 сут. В лаборатории аналитической химии ДВГИ ДВО РАН методом атомно-эмиссионной спектроскопии с индуктивно связанной плазмой на спектрометре “iCAP 7600Duo” (“Thermo Scientific Corporation”, США) определено содержание главных элементов пепла.

*Лабораторные измерения, оценки расходов воды и потоков веществ с речным стоком*

Концентрацию  $\text{NH}_4^+$  определяли индофенольным методом, а концентрации  $\text{NO}_2^-$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,

DSi и DIP измеряли стандартными колориметрическими методами [28]. Предел обнаружения составил 0.01 мкмоль/л для фосфата и нитрита и 0.02 мкмоль/л для силиката. Концентрации  $N_{\text{общ}}$  и  $P_{\text{общ}}$  определяли на проточном анализаторе “Skalar San++” (“Skalar”, Нидерланды) с точностью  $\pm 1\%$ . Содержание POУ измерено на анализаторе “Shimadzu TOC-VCPN” (“Shimadzu”, Япония) с точностью  $\pm 2\%$ .

Среднесуточные расходы р. Камчатки для 2023 г. получены на основе данных уровня реки в пос. Ключи за 2021 и 2023 гг. [33] и его зависимости от расхода воды в 2021 г. [32]. Согласно данной оценке, максимальный расход р. Камчатки наблюдался 3 июля и достиг  $2553 \text{ м}^3/\text{с}$ . Поскольку данных по уровню р. Авачи для 2023 г. в открытом доступе не обнаружено, среднесуточные расходы воды этой реки рассчитаны на основе значений коэффициента связи ее расхода с расходом р. Камчатки, полученным для каждого месяца на основе средних многолетних данных за период с 2008 по 2020 г. Значения данного коэффициента находится в диапазоне 4.8–6.6 в зависимости от месяца.

Потоки растворенных веществ, поставляемых реками Камчаткой и Авачей в приемные бассейны, для дат отбора проб рассчитаны по соотношению:

$$J_i = Q C_i,$$

где  $J_i$  – поток вещества  $i$ ;  $Q$  – расход воды в реке;  $C_i$  – концентрация вещества  $i$  в речных водах.

Суммарные годовые потоки  $F_i$  веществ в приемные бассейны получены на основе соотношений между  $Q$  и  $J_i$  в конкретные даты экспедиций. По полученным соотношениям рассчитаны по-

токи для каждого дня в году с соответствующими среднесуточными расходами и просуммированы за весь год:

$$F_i = \sum_{i=1}^n J_i,$$

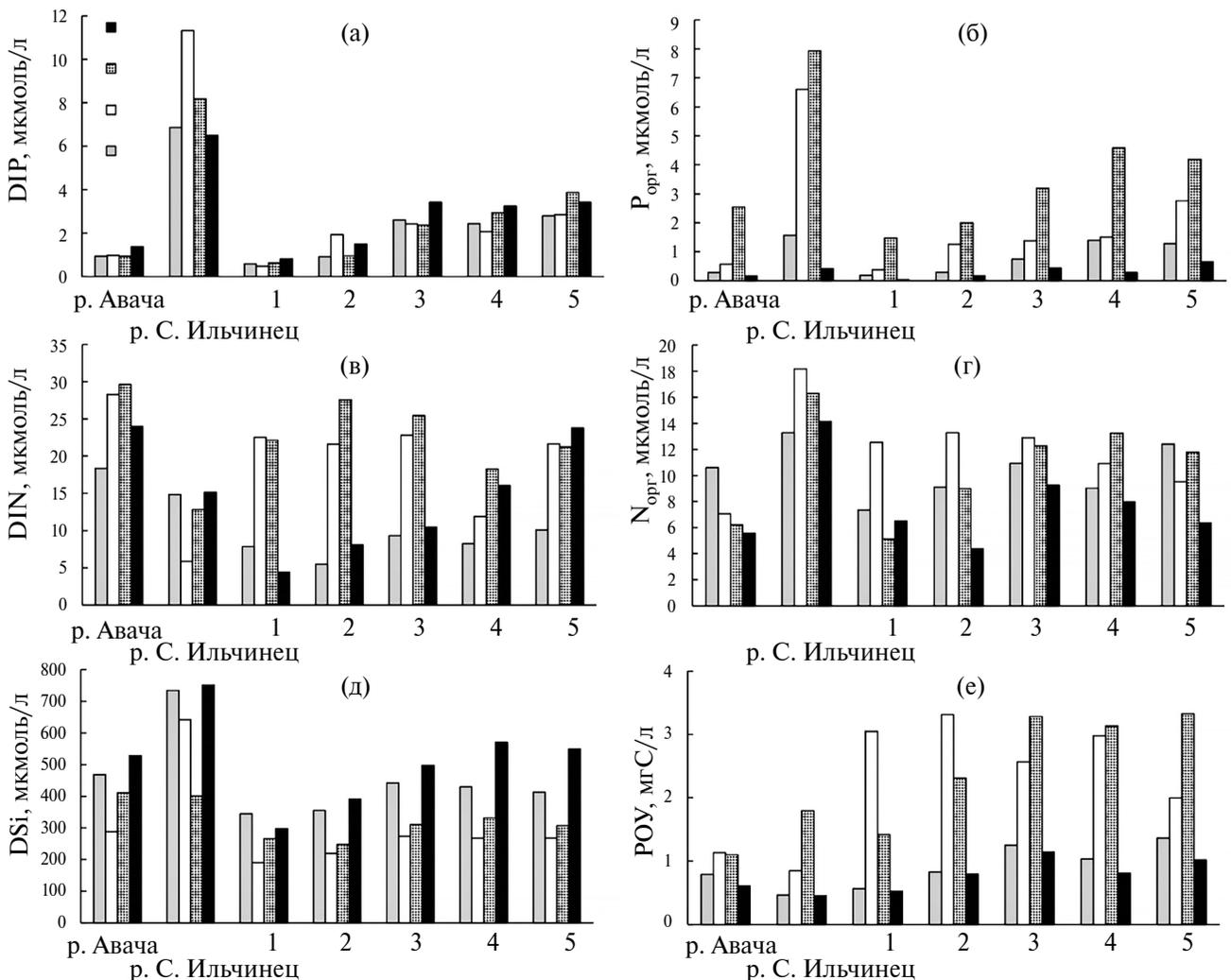
$N$  – количество дней в году.

### РЕЗУЛЬТАТЫ

#### *Пространственно-временная изменчивость концентрации БВ и РОУ*

Ниже приведены основные особенности сезонного распределения БВ и РОУ (рис. 3) изучаемых рек. Во-первых, максимальные для

речных вод концентрации DIP (рис. 3а) во все сезоны наблюдались в р. Сухой Ильчинец – от 6.5 мкмоль/л в апреле до 11.3 мкмоль/л в июне. Также зафиксировано повышенное содержание  $P_{орг}$  в мае и июне – 7.9 и 6.6 мкмоль/л соответственно. На этом фоне концентрация DIP в р. Аваче и в верхней части бассейна р. Камчатки была незначительной: 0.94–1.38 и 0.47–1.94 мкмоль/л соответственно. Увеличение DIP до 2.08–3.87 мкмоль/л во все сезоны наблюдалось в районе с непосредственным влиянием вулканов Ключевской группы и Шивелуча. Максимальная концентрация DIP отмечена на ст. 5 в мае в период после пеплопада и интенсивного снеготаяния в долине р. Камчатки. Максимальные концентрации  $P_{орг}$  (4.58 мкмоль/л) в р. Кам-



**Рис. 3.** Сезонная изменчивость концентрации БВ в реках Аваче, Сухой Ильчинец и на пяти станциях в р. Камчатке. По оси X указаны названия станций в соответствии с рис. 1: 1 – 1 апреля, 2 – 22 мая, 3 – 17 июня, 4 – 6 сентября 2023 г.

чатке также наблюдались в районе непосредственного влияния вулканов на ст. 3–5 в мае (рис. 3б). Во-вторых, в р. Аваче концентрация DIN (рис. 3в) была выше во все сезоны по отношению к р. Камчатке, а экстремумы наблюдались в мае и июне. Однако в р. Сухой Ильчинец концентрация DIN была  $\leq 15$  мкмоль/л. В-третьих, аномально высокие концентрации DSi наблюдались в р. Сухой Ильчинец в апреле, сентябре и июне: 752, 735 и 642 мкмоль/л соответственно (рис. 3д). Повышенные концентрации DSi в апреле фиксировались почти на всех станциях в р. Камчатке, а максимальные (570 мкмоль/л) – в районе непосредственного влияния вулканов Ключевской группы и Шивелуча. В р. Аваче концентрация DSi в апреле тоже была высокой – 528 мкмоль/л. В-четвертых, воды р. Камчатки имеют низкие величины азот-фосфорного соотношения (N/P – 3.6–7.5). В-пятых, для всех изученных рек характерны максимальные концентрации POY в периоды возрастающих расходов воды – в мае и июне (рис. 3е). При этом в р. Камчатке максимальная концентрация POY составляла 3.3 мгС/л, а в р. Аваче  $\leq 1.1$  мгС/л.

#### Потоки БВ и N/P

Из табл. 2 следует, что расход воды в реках увеличился в  $\sim 3.5$  раза за период с 1 апреля по 17 июня. При этом отмечены следующие особенности изменчивости суточных потоков веществ. Во-первых, величины JDIP в реках Камчатке и Аваче возросли в  $\sim 3$  раза, а величина  $JP_{\text{общ}}$  возросла в  $\sim 5$  раз в р. Камчатке. Во-вторых, величины JDIN и  $JN_{\text{общ}}$  увеличились соответственно в 3 и 3.6 раза для р. Камчатки и в 5.5 раз для р. Авачи. В-треть-

их, величины JPOY для обеих рек возросли в  $\sim 10$  раз. В-четвертых, возрастание величины JDSi для обеих рек было незначительным – в  $< 2$  раза. Таким образом, при возрастающих расходах рек отмечена следующая тенденция для потоков веществ: наибольшее увеличение JPOY, в меньшей степени повышение JDIN, JDIP и JDSi.

Молярные соотношения DIN/DIP в р. Камчатке менялись в диапазоне от 3.6 до 7.58, и существенно большая величина получена для р. Авачи – от 19.5 до 31.5 (табл. 2). Малые величины DIN/DIP в нижнем бассейне р. Камчатки объясняются высокими концентрациями DIP в районе непосредственного влияния вулканов Ключевской группы и Шивелуча (рис. 3). При этом в мае и в июне для р. Авачи отмечено увеличение DIN/DIP за счет увеличения концентрации DIN и незначительное повышение DIN/DIP для р. Камчатки в июне за счет уменьшения концентрации DIP по сравнению с майской и апрельской (рис. 3).

Зависимость потоков БВ от расходов р. Камчатки и р. Авачи в большинстве случаев близка к линейной (рис. 4). Исключение – величина  $JP_{\text{общ}}$ , полученная для 22 мая, когда на фоне растущего расхода рек наблюдалась максимальная концентрация  $P_{\text{орг}}$  (рис. 3).

Между реками Камчаткой и Авачей получен большой контраст годовых потоков веществ (табл. 3) – величины FDIP и FPOY со стоком р. Камчатки соответственно в 19 и 15 раз превышают их величины в р. Аваче. Этот контраст связан с относительно высокими концентрациями

**Таблица 2.** Потоки БВ  $J$  (т/сут), расходы воды  $Q$  (м<sup>3</sup>/с) и молярные N/P отношения для р. Камчатки (ст. 5) в точке отбора в р. Аваче

Характеристика	р. Камчатка				р. Авача			
	1 апреля	22 мая	17 июня	6 сентября	1 апреля	22 мая	17 июня	6 сентября
$Q$	556.8	993.5	1937.5	770.2	84.4	177.4	395.4	135.1
JDIP	5.1	10.3	14.8	5.8	0.31	0.45	1.03	0.34
$JP_{\text{tot}}$	6.1	21.4	29.1	8.0	0.35	1.65	1.63	0.44
JDIN	16.0	25.5	50.7	9.4	2.45	6.35	13.53	3.00
$JN_{\text{tot}}$	20.3	39.7	73.0	9.4	3.02	7.68	16.91	4.73
JDSi	740	738	1255	769	108	176	275	153
JDOC	49.0	285.8	499.0	113.1	4.42	16.84	38.60	9.19
DIN/DIP	6.95	5.48	7.58	3.60	17.39	31.5	29.1	19.5

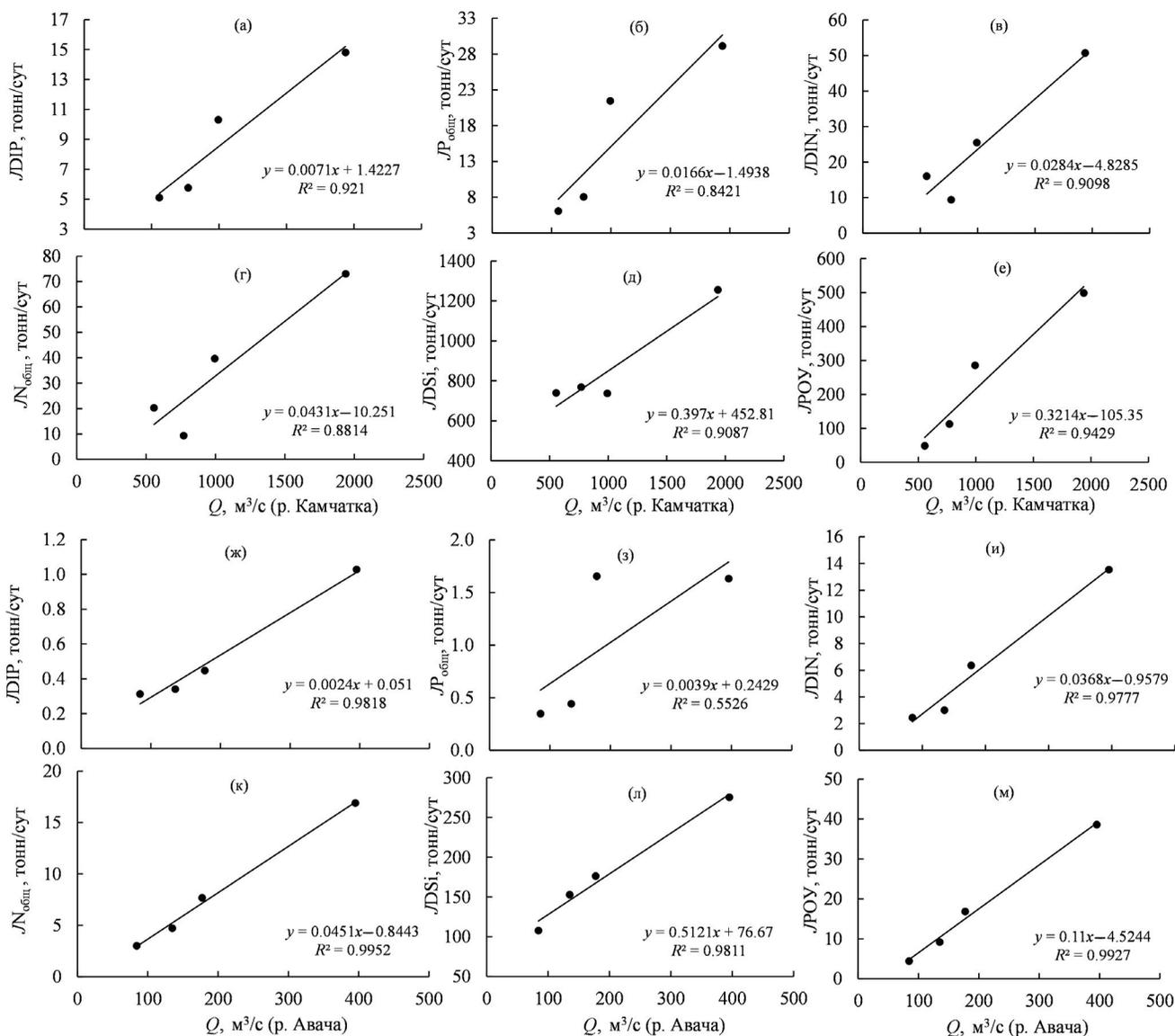


Рис. 4. Соотношения потоков БВ в приемные бассейны от расходов р. Камчатки (а–е) и р. Авачи (ж–м).

Таблица 3. Количество  $F$  (т/год) веществ (P, N, Si, C), поступивших за 2023 г. в приемные бассейны рек Камчатки и Авачи

Река	$FDIP$	$FP_{\text{общ}}$	$FDIN$	$FN_{\text{общ}}$	$FDSi$	$FPOУ$
Камчатка	2705	4565	6980	9526	287 486	60 485
Авача	142	289	1538	2006	54 258	3992

Таблица 4. Содержание главных элементов в пробе вулканического пепла (масса, %), отобранной в районе пос. Ключи 11 апреля 2023 г.

$SiO_2$	$TiO_2$	$Al_2O_3$	$Fe_2O_3$	$MnO$	$MgO$	$CaO$	$Na_2O$	$K_2O$	$P_2O_5$	$H_2O^-$	ППП	$\Sigma$
63.6	0.45	16.11	4.30	0.08	3.06	4.77	4.71	1.37	0.19	0.44	0.70	99.77

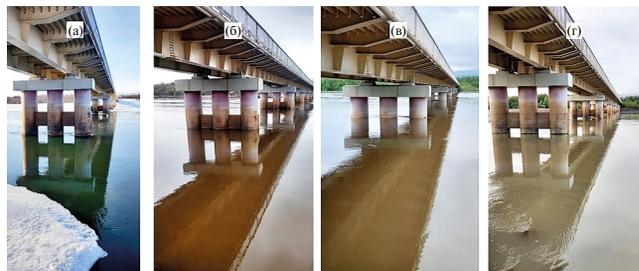
DIP и POY в р. Камчатке. Различия между реками в величинах  $FDSi$  и  $FDIN$  – соответственно в 5.3 и 4.5 раза – близки к разнице в величинах среднегодовых расходов этих рек.

## ОБСУЖДЕНИЕ

### *Источники БВ и POY для рек Камчатки и Авачи*

БВ, POY и микроэлементы поступают в речную воду в результате выветривания горных пород, при бактериальном разложении сформированного в результате фотосинтеза органического вещества и антропогенной деятельности на водосборах [55, 56]. Источники БВ и POY обычно разделяют на точечные и диффузные [41]. К диффузным относятся атмосферные осадки, поверхностные и грунтовые воды, а к точечным – локальные коммунально-бытовые стоки.

С учетом незначительной плотности населения на территории водосбора р. Камчатки влиянием точечных источников для этой реки можно пренебречь. Следовательно, максимальные концентрации DIP и  $P_{org}$  в нижнем течении р. Камчатки и в р. Сухой Ильчинец, находящихся в районе Ключевской группы вулканов и вулкана Шивелуч (рис. 3), в исследуемые сезоны – результат вулканизма. Максимальные концентрации DIP в самом нижнем створе (ст. 5) и зафиксированное на станциях 3–5 в мае повышение  $P_{org}$  (рис. 3) – наиболее значимые особенности распределения БВ в р. Камчатке в 2023 г. Этот экстремум сезонной изменчивости БВ в р. Камчатке напрямую связан с таянием снега в долине реки. После извержения вулкана Шивелуч 11 апреля 2023 г. снег был покрыт пеплом, 22 мая 2023 г. на протяжении ~200 км вдоль автодороги в бассейне р. Камчатки в районе пос. Ключи (ст. 4 (рис. 1)) наблюдались насыщенные тефрой “грязевые” поверхностные стоки. В результате поступления тефры в р. Камчатку с поверхностными стоками от вулкана Шивелуч ее вода в мае приобрела коричнево-красноватый цвет (рис. 5). Тефра – непосредственный источник DIP, поскольку она содержит оксид фосфора ( $P_2O_5$ ) (табл. 4), который благодаря быстрой реакции с водой образует биодоступный DIP.



**Рис. 5.** Изображения р. Камчатки со стороны левого берега левой протоки в районе пос. Ключи: а – 1 апреля; б – 22 мая; в – 17 июня; г – 6 сентября 2023 г.

При этом в другие сезоны, особенно в период наименьшего водного стока (полевые работы 1 апреля 2023 г.), также наблюдалось характерное повышение DIP в районе с действующими вулканами (ст. 3–5). Этот факт указывает на систематическое обогащение грунтовых вод DIP в этой части бассейна реки, поскольку вулканические почвы и коренные породы данного района также содержат  $P_2O_5$ , а грунтовое питание исследуемых рек – основное в период зимней межени, как показано выше.

Обогащение водосборов DIN, в отличие от DIP, поступающего напрямую из тефры, – происходит преимущественно за счет вулканических эксгаляций и последующего атмосферного переноса их продуктов [9]. Экспериментально показано, что во флюидах окисленной неглубокой верхней мантии азот N присутствует в основном в виде молекулярного азота  $N_2$ , тогда как в глубокой восстановленной верхней мантии N присутствует в виде аммиака  $NH_3$  [37]. Соответственно, N в вулканических эманациях существует почти преимущественно в виде  $N_2$  с незначительными выбросами  $NH_3$ , возможно – и в виде азотной кислоты  $HNO_3$  [39]. Таким образом, следует ожидать поступление DIN в бассейны исследуемых рек с атмосферными осадками и с осаждением аэрозолей с последующим накоплением DIN в снежном покрове на протяжении зимы. В настоящей работе авторы не ставили задачу изучить распределение DIN в снеге. Однако предыдущие результаты для талой воды с высокогорья в районе потухшего вулкана Вилучинского (побережье зал. Авачинского (рис. 3)) показали максимальную концентрацию DIN – 36.68 мкмоль/л (табл. 2 в [49]) на фоне всех данных, полученных для рек Авачи и Камчатки (результаты данного

исследования и из [11, 12, 49]). Соответственно, систематическое повышение DIN и  $N_{\text{орг}}$  в период увеличения расхода рек в мае и июне (рис. 3) и экстремум DIN в талой воде с высокогорья, полученный в предыдущих исследованиях авторов, указывают на накопление DIN в снеге и его доминирующую роль в формировании состава речных вод Восточной Камчатки в период интенсивного таяния снега. Антропогенные стоки для р. Авачи дают дополнительный, но незначительный поток DIN. На доминирующую роль вулканизма как источника DIN в реках Восточной Камчатки в 2023 г. указывают его относительно постоянные концентрации в течение последних нескольких десятков лет. Так, в 1970-е гг., когда население в бассейне р. Авачи (пос. Елизово) было < 10 тыс. человек, концентрация DIN составляла 17 мкмоль/л [12], т. е. была близка к результатам, полученным в 2023 (рис. 3) и 2022 гг. (19.51 мкмоль/л (табл. 2 в [49])).

DSi образуется в результате химического выветривания на поверхности Земли. DSi – важный компонент морских экосистем, поскольку находится в основе скелета диатомовых водорослей, доминирующих в мировом океане [17]. В глобальном масштабе наибольшие потоки DSi с суши в океан идут из вулканических дуг и затопленных базальтовых областей на континентальных окраинах [23, 25, 35, 48]. Однако JDSi варьирует в зависимости от литологии и скорости стока [29]. На Камчатке формирующаяся при таянии снега вода дренирует вулканические почвы и коренные породы, обогащенные  $\text{SiO}_2$ . Химическое выветривание – основная причина высоких концентраций DSi во все сезоны в реках Камчатке, Аваче и Сухой Ильчинец (рис. 3) по сравнению с концентрациями на водосборах Охотского и Японского морей, не испытывающих влияния вулканизма [8, 13, 14].

POU имеет гуминовую и негуминовую составляющие, а реки, как правило, – гетеротрофные экосистемы, поставляющие преимущественно гуминовые вещества в океан – аллохтонное POU [16]. Существенное превышение концентрации POU в р. Камчатке по сравнению с р. Авачей (рис. 3) указывает на то, что природные источники POU на Камчатке – доминирующие. Поверхностные горизонты почв Камчатки залегают, как

правило, повсеместно на прослоях вулканического пепла, обогащенного БВ и микроэлементами, которые способствуют жизнедеятельности микроорганизмов [4]. Соответственно, почвы на водосборах могут служить важным источником POU для р. Камчатки. Состав POU может меняться в зависимости от метаболизма микроорганизмов в почве на водосборах в результате добавления негуминовой составляющей в виде полисахаридов [54]. В данной работе авторы не ставили задачу изучить компоненты POU. Однако хочется отметить, что в апреле в долине р. Камчатки в районе нижнего течения (ст. 3–5) на снегу визуально наблюдалось цветение микроводорослей, окрашивающих снег в красноватый цвет. Известно, что весеннее таяние снега мобилизует питательные вещества внутри снежного покрова, что впоследствии стимулирует дополнительный рост снежных микроводорослей и как результат – повышение концентрации POU в снеге [27]. Жизненный цикл снежных микроводорослей сложен, поскольку стадии их жизни проходят по всему снежному покрову при вертикальной миграции сквозь толщу снега [46]. Этот процесс затрудняет сделать точную оценку баланса POU и БВ в снежном покрове [50]. По результатам данного исследования (ст. 3–5, рис. 3) отчетливо прослеживаются максимальные концентрации POU в районе действующих вулканов в мае – т. е. в период таяния снега в долине реки; в то время как в июне, в период таяния снега на высокогорье, отчетливо проявилось повышение концентрации POU в воде в верховьях реки на ст. 1–2 (рис. 3). Соответственно, таяние снега, обогащенного POU за счет цветения снежных микроводорослей на высокогорье и в местах пеллопадов, – причина существенного повышения концентрации POU в р. Камчатке по сравнению с р. Авачей.

*Потенциальное влияние потоков БВ и POU в связи с вулканизмом на экологию прибрежно-морских вод Восточной Камчатки*

Известно, что в местах попадания тефры в океан возникает “цветение” фитопланктона, что сопровождается обогащением экосистем POU [22, 26, 31, 38, 43]. Компоненты тефры могут стать доступными для сообществ фитопланктона на шельфе несколькими путями [20]: 1) осаждение тефры непосредственно на поверхности океана;

2) растворение аэрозолей в облаках до осаждения в поверхностные воды океана через дождь или снегопад; 3) перенос тейфры и ее компонентов на водосборах посредством поверхностного и грунтового стока при дождевом смыве или снеготаянии и последующий речной перенос в океан. Растворение биодоступных компонентов тейфры с поставкой БВ в водную среду происходит достаточно быстро, именно это поддерживает повышенную первичную продукцию в поверхностных водах до погружения частиц тейфры за пределы фотического слоя [26]. Результаты лабораторного эксперимента (табл. 5) свидетельствуют о том, что концентрация DIP в воде существенно возрастает в первые минуты после контакта с пеплом. В случае пресной воды следует ожидать увеличение DIP до почти максимально возможной концентрации уже в первые минуты после контакта пепла с водой, в то время как для морской воды максимальная концентрация DIP достигается в течение ~1 сут, а концентрация DSi продолжает увеличиваться на протяжении 9 сут. Кроме DIP, в первые минуты после контакта в водную среду также поступают ионы  $\text{NO}_3^-$  и  $\text{NH}_4^+$ , однако концентрации DIN в эксперименте не были столь впечатляющими, как результаты по DIP.

Абсолютные концентрации БВ имеют центральное значение в динамике экосистемы, но соотношение DIN/DIP также влияет на видовой состав первичного звена пищевой цепи и, соответственно, на состояние всей водной экосистемы [52]. Согласно недавним исследованиям [40, 56], при значительном росте значения соотно-

шения DIN/DIP доминируют динофлагелляты, включая потенциально токсичные виды. Максимальные величины потока DIN с речным стоком в июне (табл. 2) могут быть причиной вредоносного цветения, которое отмечается в последние 50 лет в августе–октябре на Восточной Камчатке в приемном бассейне р. Авача – зал. Авачинском [5, 6, 44].

Если рассмотреть выводы предыдущих исследований [30, 40, 45, 51, 56] о взаимосвязи красных приливов и изменении отношения DIN/DIP в сторону более высоких DIN, то материковый сток в районе бух. Авачинской можно считать одним из основных факторов развития динофлагеллят после пика половодья в середине лета, в то время как существенное понижение DIN/DIP в р. Камчатке должно способствовать развитию диатомей в зал. Камчатском. Известно, что разные типы пепла сопровождаются разными величинами соотношений потоков DIN и DIP, а также есть разница размеров и состава пепла в зависимости от расстояния от действующих вулканов [7]. Соответственно, разная интенсивность извержений разных вулканов будет формировать сложную картину соотношений N/P в реках с сопутствующими откликами в первичном звене пищевой цепи. Увеличение биомассы фитопланктона будет сопровождаться изменениями в последующих пищевых звеньях и формировать дополнительную кормовую базу для гидробионтов. “Цветение” снежных микроводорослей на склонах вулканов и последующий смыв сформированного при этом РОУ в р. Кам-

**Таблица 5.** Концентрация БВ (мкмоль/л) в воде после контакта с тейфрой, отобранной в районе пос. Ключи (ст. 4) 11 апреля 2023 г. Соотношение тейфра : вода составляет 1 : 10 по результатам лабораторного эксперимента

Период после контакта тейфры с водой	Тип воды	DIP	DSi	$\text{NO}_2^-$	$\text{NO}_3^-$	$\text{NH}_4^+$
10 мин	Морская вода с соленостью 34.06 psu	3.56	7.01	0.18	1.34	8.78
1ч		3.79	12.34	0.24	1.37	8.71
5 ч		5.96	30.53	0.09	1.38	8.39
24 ч		8.19	76.57	0.12	1.03	8.84
9 сут		7.67	107.09	0.09	1.24	10.62
Фон		0.19	0.00	0.05	0.04	0.37
10 мин	Milli-Q	22.46	5.58	0.12	1.06	10.91
1ч		22.41	8.90	0.09	1.09	10.97
5 ч		23.60	22.69	0.07	1.07	12.77
24 ч		23.80	71.72	0.11	0.75	11.57
9 сут		23.30	103.31	0.08	0.83	10.97
Фон		0.00	0.17	0.02	0.12	0.18

чатку также должны приводить к изменениям видового состава фито- и зоопланктона в Камчатском заливе. Дальнейшие исследования авторов настоящей работы будут сосредоточены на межгодовой изменчивости потоков БВ в связи с разной интенсивностью вулканизма на Камчатке и на сопутствующих откликах прибрежно-морских экосистем.

## ВЫВОДЫ

Основная особенность распределения БВ в р. Камчатке в 2023 г. — максимальные концентрации DIP, P<sub>орг</sub> и РОУ, зафиксированные в период с мая по июнь р. Камчатке в районе непосредственного влияния вулканов Ключевской группы и вулкана Шивелуч. Этот экстремум сезонной изменчивости напрямую связан с таянием снега в долине реки и на склонах вулкана Шивелуч, который был покрыт пеплом после извержения 11 апреля 2023 г. Следовательно, пепел вулкана Шивелуч — важный источник DIP для данной части водосбора.

Значения соотношения N/P — 3.6–7.5 в водах р. Камчатки в 2023 г. — были гораздо ниже N/P в других реках п-ова Камчатка (29 в р. Аваче и 53 — в р. Вилюче). Эта пространственная изменчивость N/P в речной сети на п-ове Камчатка объясняется атмосферным переносом азота в аэрозолях и его последующим выпадением с атмосферными осадками в удалении от территории непосредственного влияния действующих вулканов, около которых в наибольшей степени сказывается поступление DIP из свежих пеплов.

Потоки БВ и РОУ со стоком рек во многом определяются сезонной изменчивостью их концентраций и распределены относительно равномерно из-за стабильной величины водного стока рек Камчатки и Авачи в течение года.

БВ, поступающие при вулканизме через речной сток или при прямом поступлении в прибрежно-морские воды в периоды пеплопадов, вероятно, способны оказывать влияние на видовой состав и биомассу фитопланктона и на последующие звенья пищевой цепи. В биогеохимических исследованиях прибрежно-морских водных экосистем Восточной Камчатки, следо-

вательно, должен учитываться вулканизм в качестве важного источника БВ.

Авторы выражают благодарность П.Я. Тищенко (ТОИ ДВО РАН) за консультации на всех этапах работы; сотрудникам лаборатории гидрохимии ТОИ ДВО РАН за активное участие в проведении анализа проб воды и вулканического пепла; В.Б. Лобанову (ТОИ ДВО РАН) за поддержку экспедиционных исследований; Е.Г. Калачевой (ИВиС ДВО РАН) и В.М. Шулькину (ТИГ ДВО РАН) за многочисленные консультации и всестороннюю поддержку; жителям г. Петропавловска-Камчатского, поселков Ключи и Усть-Камчатск за оказание бесценной помощи в ходе полевых работ, включая отбор и доставку пробы пепла после извержения вулкана Шивелуч.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Батулин Г.Н., Зайцева Л.В., Маневич Т.М. Геохимия вулканических пеплов исландского и камчатских вулканов // ДАН. 2012. Т. 443. № 3. С. 342–346.
2. Влодавец В.И., Пийп Б.И. Каталог действующих вулканов Камчатки // Бюлл. вулканологических станций. 1957. № 25.
3. Горин С.Л. Гидролого-морфологические процессы в эстуариях Камчатки. Автореф. дис. ... канд. геогр. наук. М.: МГУ, 2009. М.: 26 с.
4. Захарихина Л.В., Литвиненко Ю.С. Вулканизм и геохимия почвенно-растительного покрова Камчатки. Сообщ. 3. Элементный состав растительности вулканических экосистем // Вулканология и сейсмология. 2019. № 4. С. 40–51.
5. Коновалова Г.В. “Красные приливы” у Восточной Камчатки: посвящается памяти Игоря Ивановича Куренкова: атлас-справочник. Петропавловск-Камчатский: Камшат, 1995. 56 с.
6. Лепская Е.В., Тепнин О.Б., Коломейцев В.В. и др. Исторический обзор исследований и основные результаты комплексного экологического мониторинга Авачинской губы в 2013 году // Исследования водных биологических ресурсов Камчатки и северо-западной части Тихого океана. 2014. Вып. 34. 5–21.
7. Малик Н.А. Импактный вклад извержений вулканов в формирование химического состава сезонного снежного покрова (Камчатка) // Лед и снег. 2010. № 4. 45–52.
8. Михайлик Т.А., Тищенко П.Я., Колтунов А.М. и др. Влияние реки Раздольной на экологическое со-

- стояние вод Амурского залива (Японское море) // Вод. ресурсы. 2011. Т. 38. № 4. С. 474–484.
9. *Набоко С.И.* Вулканические эксгалиции и продукты их реакций // Тр. лаборатории вулканологии. Вып. 16. М.: Изд-во АН СССР, 1959 / Отв. ред. *В.И. Влодавец*. 303 с.
  10. *Пуйн Б.И.* Извержение Авачинской сопки в 1945 году // Бюлл. вулканологии. 1953. С. 6–23.
  11. Ресурсы поверхностных вод СССР. Т. 20. Камчатка / Под ред. *М.Г. Васьяковского*. Л.: Гидрометеиздат, 1973. 368 с.
  12. Ресурсы поверхностных вод СССР. Т. 20. Камчатка / Под ред. *В.Ч. Здановича*. Л.: Гидрометеиздат, 1977. 294 с.
  13. *Семкин П.Ю., Тищенко П.Я., Павлова Г.Ю. и др.* Влияние речного стока на гидрохимические характеристики вод Удской губы и залива Николая (Охотское море) в летний сезон // Океанология. 2021. Т. 60. № 3. С. 387–400.
  14. *Тищенко П.Я., Семкин П.Ю., Павлова Г.Ю. и др.* Гидрохимия эстуария реки Туманной (Японское море) // Океанология. 2018. Т. 58. № 2. С. 192–204.
  15. *Фролова Н.Л., Становова А.В., Горин С.Л.* Режим стока воды в нижнем течении реки Камчатки и его многолетняя изменчивость // Исследования вод. биол. ресурсов Камчатки и северо-западной части Тихого океана. 2014. № 32. С. 73–78.
  16. *Battin T.J., Kaplan L.A., Findlay S. et al.* Biophysical controls on organic carbon fluxes in fluvial networks // *Nature Geosci.* 2008. V. 1. P. 95–100.
  17. *Bernard C.Y., Dürr H.H., Heinze C. et al.* Contribution of riverine nutrients to the silicon biogeochemistry of the global ocean - a model study // *Biogeosci.* 2011. V. 8. P. 551–564.
  18. *Beusen A.H., Bouwman A.F., Van Beek L.P. et al.* Global riverine N and P transport to ocean increased during the 20th century despite increased retention along the aquatic continuum // *Biogeosci.* 2016. V. 13. P. 2441–2451.
  19. *Beusen A.H., Doelman J.C., Van Beek L.P.H. et al.* Exploring river nitrogen and phosphorus loading and export to global coastal waters in the Shared Socio-economic pathways // *Global Environ. Change.* 2022. V. 72. 102426.
  20. *Bisson K.M., Gassó S., Mahowald N. et al.* Observing ocean ecosystem responses to volcanic ash // *Remote Sensing Environ.* 2023. V. 296. 113749.
  21. *Bouwman A.F., Van Drecht G., Knoop J.M. et al.* Exploring changes in river nitrogen export to the world's oceans // *Global Biogeochem.* 2005. V. 19. Iss. 1. GB1002.
  22. *Browning, T.J., Stone, K., Bouman, H.A. et al.* Volcanic ash supply to the surface ocean—Remote sensing of biological responses and their wider biogeochemical significance // *Frontiers in Marine Science.* 2015. V. 2. <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fmars.2015.00014>
  23. *Chemtob S.M., Rossmann G.R., Young E. D. et al.* Silicon isotope systematics of acidic weathering of fresh basalts, Kilauea Volcano, Hawai'i // *Geochim. Cosmochim. Acta.* 2015. V. 169. P. 63–81.
  24. *Cole J.J., Prairie Y.T., Caraco N.F. et al.* Plumbing the global carbon cycle: Integrating inland waters into the terrestrial carbon budget // *Ecosystems.* 2007. V. 10. P. 172–185.
  25. *Dürr H. H., Meybeck M., Hartmann J. et al.* Global spatial distribution of natural riverine silica inputs to the coastal zone // *Biogeosci.* 2011. V. 8. P. 597–620.
  26. *Frogner P., Gislason S.R., Oskarsson N.* Fertilizing potential of volcanic ash in ocean surface water // *Geol.* 2001. V. 29. P. 487–490.
  27. *Ganey G., Loso M., Burgess A. et al.* The role of microbes in snowmelt and radiative forcing on an Alaskan icefield // *Nature Geosci.* 2017. V. 10. P. 754–759.
  28. *Grasshoff K., Ehrhard M., Kremling K.* Methods of Seawater Analysis. Weinheim, Germany: Verlag Chemie, 1983. p. 419.
  29. *Hartmann J., Moosdorf N., Lauerwald R. et al.* Global chemical weathering and associated p-release – the role of lithology, temperature and soil properties // *Chemical Geol.* 2014. V. 363. P. 145–163.
  30. *Hodgkiss I., Ho K.* Are Changes in N: P Ratios in Coastal Waters the Key to Increased Red Tide Blooms? Berlin; Heidelberg, Germany: Springer, 1997. P. 141–147.
  31. *Hoffmann L.J., Breitbarth E., Ardelan M.V. et al.* Influence of trace metal release from volcanic ash on growth of *Thalassiosira pseudonana* and *Emiliania huxleyi* // *Marine Chem.* 2012. V. 132. P. 28–33.
  32. <https://gmvo.skniivh.ru/>
  33. <https://allrivers.info/gauge/kamchatka-klyuchi>
  34. *Huang K., Zhuang Y., Wang Z. et al.* Bioavailability of Organic Phosphorus Compounds to the Harmful Dinoflagellate *Karenia mikimotoi* // *Microorganisms.* 2021. V. 9. 1961.
  35. *Ibarra D.E., Caves J.K., Moon S. et al.* Differential weathering of basaltic and granitic catchments from concentration–discharge relationships // *Geochim. Cosmochim. Acta.* 2016. V. 190. P. 265–293.
  36. *Jones M.T., Gislason S.R.* Rapid releases of metal salts and nutrients following the deposition of volcanic ash

- into aqueous environments // *Geochim. Cosmochim. Acta*. 2008. V. 72. 3661–3680.
37. *Li Y., Keppler H.* Nitrogen speciation in mantle and crustal fluids // *Geochim. Cosmochim. Acta*. 2014. V. 129. P. 13–32.
  38. *Longman J., Palmer M.R., Gernon T.M., Manners H.R.* The role of tephra in enhancing organic carbon preservation in marine sediments // *Earth-Sci. Rev.* 2019. 192. P. 480–490.
  39. *Mather T.A., Allen A.G., Davison B.M. et al.* Nitric acid from volcanoes // *Earth and Planetary Sci. Lett.* 2004. V. 218. Iss. 1–2. P. 17–30.
  40. *Medina M., Kaplan D., Milbrandt E.C. et al.* Nitrogen-enriched discharges from a highly managed watershed intensify red tide (*Karenia brevis*) blooms in southwest Florida // *Sci. Total Environ.* 2022. V. 827. 154149.
  41. *Meybeck M.* Carbon, nitrogen and phosphorous transport by world rivers // *Am. J. Sci.* 1982. V. 282. P. 401–450.
  42. *Nixon S.F.* Coastal marine eutrophication: A definition, social causes, and future concerns // *Ophelia*. 1995. V. 41. P. 199–219.
  43. *Olgun N., Duggen S., Andronico D. et al.* Possible impacts of volcanic ash emissions of Mount Etna on the primary productivity in the oligotrophic Mediterranean Sea: Results from nutrient-release experiments in seawater // *Mar. Chem.* 2013. V. 152. P. 32–42.
  44. *Orlova T.Y., Aleksanin A.I., Lepskaya E.V. et al.* A massive bloom of *Karenia* species (Dinophyceae) off the Kamchatka coast, Russia, in the fall of 2020 // *Harmful Algae*. 2022. V. 120. 102337.
  45. *Paerl H.W.* Coastal eutrophication and harmful algal blooms: Importance of atmospheric deposition and groundwater as “new” nitrogen and other nutrient sources // *Limnol. Oceanogr.* 1997. V. 42. P. 1154–1165.
  46. *Remias D.* Cell structure and physiology of alpine snow and ice algae // *Plants in alpine regions* / Ed. C. Lütz. Vienna: Springer, 2012. 175–185.
  47. *Schopka H.H., Derry L.A., Arcilla C.A.* Chemical weathering, river geochemistry and atmospheric carbon fluxes from volcanic and ultramafic regions on Luzon Island, the Philippines // *Geochim. Cosmochim. Acta*. 2011. V. 75 P. 978–1002.
  48. *Schopka H.H., Derry L.A.* Chemical weathering fluxes from volcanic islands and the importance of groundwater: The Hawaiian example // *Earth Planetary Sci. Lett.* 2012. V. 339–340. P. 67–78.
  49. *Semkin P.Yu., Pavlova G.Yu., Lobanov V.B. et al.* Nutrient Flux under the Influence of Melt Water Runoff from Volcanic Territories and Ecosystem Response of Vilyuchinskaya and Avachinskaya Bays in Southeastern Kamchatka // *J. Marine Sci. Engineering*. 2023. V. 11. 1299.
  50. *Schuler C.G., Mikucki J.A.* Microbial ecology and activity of snow algae within a Pacific Northwest snowpack // *Arctic, Antarctic Alpine Res.* 2023. V. 55 Iss. 1.
  51. *Shen A., Liu H., Xin Q. et al.* Responses of Marine Diatom–Dinoflagellate Interspecific Competition to Different Phosphorus Sources // *J. Mar. Sci. Engineering*. 2022. V. 10. 1972.
  52. *Sterner R.W., Elser J.J.* *Ecological stoichiometry* // *Ecological Stoichiometry*. Princeton, NJ, USA: Princeton Univ. Press, 2017.
  53. *Symonds R.B., Reed M.H., Rose W.I.* Origin, speciation, and fluxes of trace-element gases at Augustine volcano, Alaska: Insights into magma degassing and fumarolic processes // *Geochim. Cosmochim. Acta*. 1992. V. 56. P. 633–657.
  54. *Wen Zh., Song K., Shang Y. et al.* Natural and anthropogenic impacts on the DOC characteristics in the Yellow River continuum // *Environ. Pollution*. 2021. V. 287. 117231.
  55. *Zhang J., Tishchenko P.Ya., Jiang Z.J. et al.* Diverse nature of the seasonally coastal eutrophication dominated by oceanic nutrients: An eco-system based analysis characterized by salmon migration and aquaculture // *Marine Pollution Bull.* 2023. V. 193. 2023. 115150.
  56. *Zhang Q.-C., Wang Y.-F., Song M.-J. et al.* First record of a Takayama bloom in Haizhou Bay in response to dissolved organic nitrogen and phosphorus // *Marine Pollution Bull.* 2022. V. 178. 113572.

## SEASONAL VARIABILITY OF NUTRIENTS AND ORGANIC CARBON IN THE KAMCHATKA AND AVACHA RIVERS (KAMCHATKA PENINSULA) IN 2023

P. Yu. Semkin<sup>a,\*</sup>, G. Yu. Pavlova<sup>a</sup>, S. L. Gorin<sup>b</sup>, A. M. Koltunov<sup>a</sup>, E. V. Lepskaya<sup>c</sup>, O. A. Ulanova<sup>a</sup>,  
E. M. Shkirknikova<sup>a</sup>, M. G. Shvetsova<sup>a</sup>, Y. Xu<sup>d</sup>, S. Jiang<sup>d</sup>, J. Zhang<sup>d</sup>

<sup>a</sup>*Il'ichev Pacific Oceanological Institute, Far Eastern Branch, Russian Academy of Sciences, Vladivostok, 690041 Russia*

<sup>b</sup>*Russian Federal Research Institute of Fisheries and Oceanography, Moscow, 105187 Russia*

<sup>c</sup>*Kamchatka branch of the "Federal Research Institute of Fisheries and Oceanography", Petropavlovsk-Kamchatsky, 683000 Russia*

<sup>d</sup>*State Key Laboratory of Estuarine and Coastal Research (SKLEC), East China Normal University (ECNU), Shanghai, 200241 China*

*\*e-mail: pahno@list.ru*

In 2023, during the main phases of the water regime, four expeditions were carried out to collect water samples from sources to mouths in the Kamchatka and Avacha rivers, flowing into Kamchatka Bay and Avacha Bay of Eastern Kamchatka, respectively. In the r. In Kamchatka, seasonal extremes of concentrations and fluxes with river runoff of dissolved and organic phosphorus, as well as organic carbon, were established during the period of snow melting in the river valley and in the highlands (May–June), which was less in the river. Avacha. The annual fluxes with the runoff of the Kamchatka River and the Avacha River were respectively 4565 and 289 tons/year for P<sub>tot</sub>, 9526 and 2006 tons/year for N<sub>tot</sub>, 60485 and 3992 tons/year for DOC. The article discusses the sources and fluxes of nutrients in the catchments of the studied rivers and the potential responses of the aquatic ecosystems of the receiving basins in connection with volcanism, including in connection with the eruption of the Shiveluch volcano, which occurred on April 11, 2023.

*Keywords:* river runoff, nutrients, carbon, volcanism, coastal ecosystem, Eastern Kamchatka.