

УДК 574.52.551

Е. В. Лепская<sup>1</sup>, А. В. Маслов<sup>2</sup>, О. Б. Тепнин<sup>1</sup>, В. Д. Свириденко<sup>1</sup><sup>1</sup> Камчатский научно-исследовательский институт рыбного хозяйства  
и океанографии; Петропавловск-Камчатский; e-mail: lepskaya@list.ru<sup>2</sup> ООО «Камчатские Авиалинии»; Елизово

## Биогенные элементы (содержание, динамика вымывания) из разноразмерного пирокластического материала Трещинного Толбачинского извержения 2012–2013 гг.

Экспериментально показано, что динамика вымывания биогенных элементов (БЭ) из разноразмерной пирокластики носит нелинейный характер, из чего следует, что обогащение водных объектов БЭ особенно интенсивно происходит, вероятно, в первый год после извержений. Однако факт стабилизации скорости вымывания БЭ из пепла и лапилли на фоновом для лососёвых водоёмов Камчатки уровне позволяет рассматривать пирокластику на водосборах как дополнительный и стабильный источник БЭ особенно фосфора, лимитирующего биологическую продуктивность большинства лососёвых экосистем. Рассчитали, что в 2013 г. в р. Камчатка из пирокластики попадет 50 т фосфатного фосфора, 823 т минерального азота, 1267 т железа и 7602 т кремния.

### Введение

Вулканы разного генезиса покрывают обширные пространства Камчатского полуострова. В их составе присутствуют соединения фосфора, азота, железа и кремния [6] — биогенных элементов (БЭ), поступление которых в водные экосистемы определяет биологическую продуктивность последних. Известно, что развитие первого и последующих трофических уровней и, в конечном итоге, рыбопродуктивность камчатских лососёвых озёр и рек лимитированы фосфором [8, 9, 15] и, в некоторых случаях, азотом [2]. Несомненно, главным источником поступления БЭ в большинство нерестовых рек и озёр — это тела лососей, погибших после нереста [7, 12]. Вместе с тем, в ряде работ показано, что результатом воздействия вулканического пепла на экосистему лососёвого водоёма может быть увеличение её рыбопродуктивности [3, 19]. Однако неизвестно могут ли вулканические породы водосборов озёр и рек обеспечивать долговременное и стабильное поступление БЭ в водные экосистемы. В настоящем сообщении рассматриваются результаты определения БЭ в водных вытяжках из образцов пирокластики разных фракций: от мелких (пеплы), до крупных (лапилли), собранных во время Трещинного Толбачинского извержения 2012–2013 гг., с целью определения динамики и оценки скорости экстракции БЭ из них.

### Материал и методики

Динамику экстракции БЭ из вулканитов экспериментально исследовали в лаборатории гидробиологии КамчатНИРО. Материалом для эксперимента послужили образцы пеплов и лапилли, изверженных во время Трещинного Толбачинского изверже-

ния в ноябре, декабре 2012 и феврале 2013 гг. Описание проб приведено в табл. 1 и 2, размер и форма частиц показаны на рис. 1.

Пепел отбирали со снегом на площади в 1 м<sup>2</sup>. Одну пробу лапилли также отобрали со снегом, остальные — сухими из свежих выбросов у подножия действующих конусов (см. табл. 1).

Первоначальную концентрацию БЭ в водных вытяжках из пепла со снегом 1К и 2К (см. табл. 1), определяли в фильтрате без разбавления бидистиллятом. Объём фильтрата составил 135 мл и 128 мл

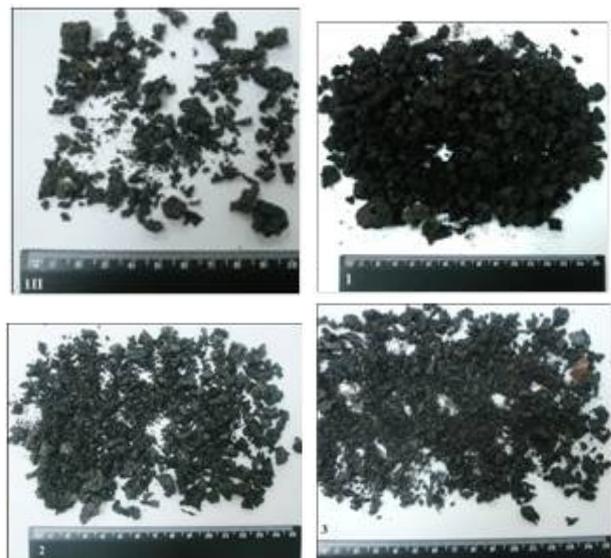


Рис. 1. Образцы проб, использованных для эксперимента, показаны соотношение разноразмерных фракций, форма и цвет частиц.

**Таблица 1.** Характеристика проб пирокластики, использованной в эксперименте.

Дата	№ пробы	Вид пробы	Масса пробы, г	pH начальной водной вытяжки	Место отбора проб	Координаты
30.11.2012 г.	1К	пепел со снегом	—	5,34	Сейсмостанция «Каменистая», 1000 м н. у. м.	55°48' с. ш. 160°15' в. д.
30.11.2012 г.	2К	пепел со снегом	—	4,43		
06.12.2012 г.	1П	лапилли со снегом	5,35	5,22	1 км от кратера, площадь сбора 1 м <sup>2</sup>	55°45' с. ш. 160°20' в. д.
07.12.2012 г.	2П	пепел со снегом	—	4,92	Развилка Ключи-Эссо	55°51' с. ш. 159°28' в. д.
16.12.2012 г.	1	лапилли, сухой свежий выброс	54,28	—	Подножие влк. Плоский Толбачик	50°45' с. ш. 160°18' в. д.
15.12.2012 г.	2	лапилли, сухой свежий выброс	48,84	—		
16.12.2012 г.	3	лапилли, сухой свежий выброс	24,26	—		
19.02.2013 г.	4	пепел со снегом	—	6,04	В 100 м от действующего конуса	55°45' с. ш. 160°19' в. д.
19.02.2013 г.	5	пепел со снегом	—	5,88		

**Таблица 2.** Размер частиц пирокластики, использованной в эксперименте.

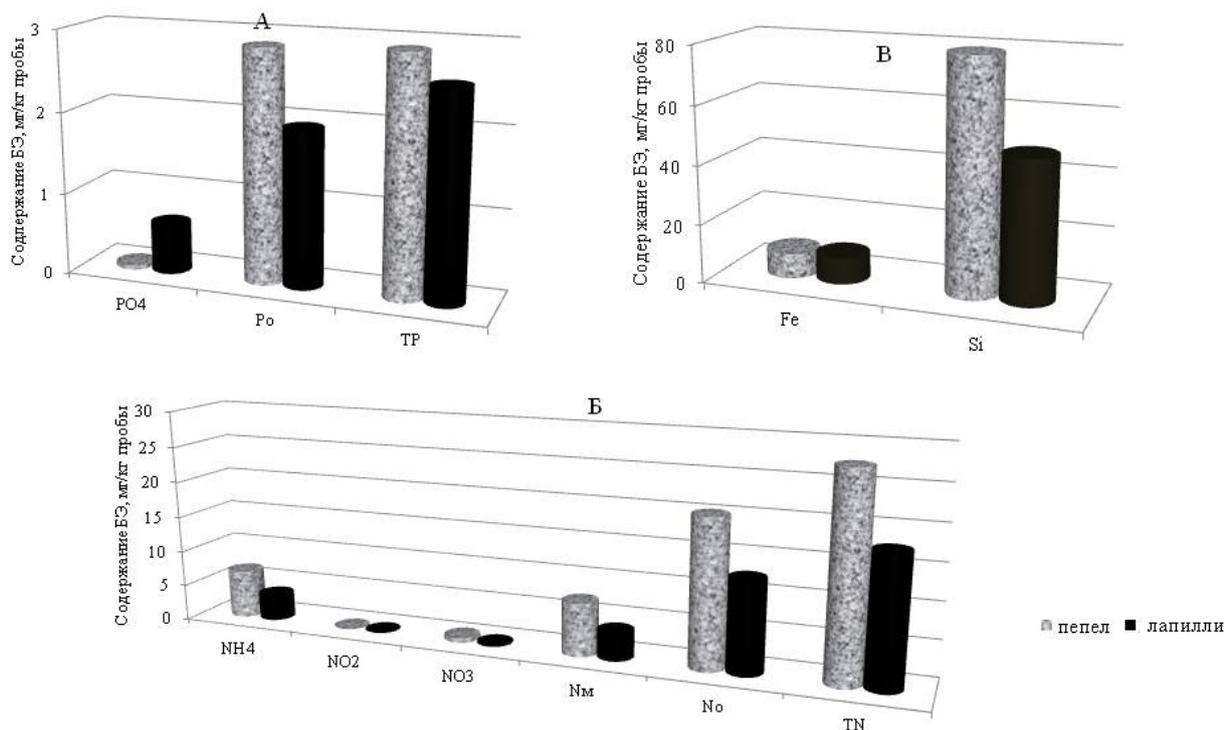
№ пробы	Вариации размеров частиц, мм	Относительное содержание частиц в пробе, %
1П	1–3	50
	5–15	50
1	5–9	90
	10–15	10
2	3–5	50
	10	50
3	2–5	70
	9–10	30

соответственно. Пробы пепла 4 и 5 заливали 150 мл бидистиллята и в фильтрате определяли содержание БЭ. Пробу лапилли со снегом (1П) отфильтровывали (объём фильтрата 41 мл) и довели бидистиллятом до 50 мл. Пробы сухих лапилли (1, 2, 3) заливали 250 мл бидистиллированной воды, фильтровали и сразу проводили определение БЭ. Далее пробы лапилли 1, 2, 3 снова заливали бидистиллированной водой (250 мл), пробу 1П заливали 50 мл и экс-

понировали в холодильнике при температуре 2° С. Примерно каждые 7 дней пробы отфильтровывали для определения БЭ в фильтрате. Далее эти же пробы лапилли снова заливали тем же объёмом бидистиллированной воды и вновь экспонировали в холодильнике. Все пробы отфильтровывали через бумажный фильтр «синяя лента». Эксперимент с пробой 1П продолжался 88 дней, а с пробами 1, 2 и 3–72 дня.

В водных вытяжках определяли концентрацию минерального, фосфатного фосфора (PO<sub>4</sub>), общего фосфора (TP); минеральных форм азота — аммонийной (NH<sub>4</sub>), нитритной (NO<sub>2</sub>) и нитратной (NO<sub>3</sub>), общего азота (TN); общего железа (Fe) — суммы растворимых соединений двух и трёхвалентного железа; кремния (Si). Все БЭ кроме TP и TN определяли по общепринятым методикам [1]. Определение TP и TN проводили согласно методикам, рекомендованным ВНИРО [17]. «Органическую» составляющую азота (No) и фосфора (Po) находили вычитанием минеральной составляющей из общего количества соответствующего элемента. Концентрация БЭ в водных вытяжках указана в мг элемента на литр.

После последних 30-ти дней экспозиции, в течение которых концентрация БЭ в водных вытяжках практически не менялась, т. е. скорость вымывания БЭ из породы стабилизировалась на низком уровне,



**Рис. 2.** Содержание БЭ (мг/кг пробы) в начальных водных вытяжках из пеплов и лапилли, изверженных в ходе Трещинного Толбачинского извержения 2012–2013 гг., усреднённые данные.

пробы лапилли растёрли в порошок, залили 250 мл бидистиллята (1П — 50 мл) и в фильтрате определили оставшееся после длительной экспозиции количество БЭ — «запас».

Для пересчёта содержания БЭ на кг пирокластики, рассчитывали общее количество БЭ в фильтрате, а получившееся значение делили на соответствующую навеску пепла или лапилли.

### Результаты

Начальная вытяжка как из пеплов, так и лапилли содержала одинаковое количество TP (2,9 мгP/кг и 2,5 мгP/кг, соответственно) (рис. 2А), различался только его состав. В пеплах было в 1,5 раза больше Po (2,9 мгP/кг против 1,9 мгP/кг в лапилли), тогда как PO<sub>4</sub>, напротив, в лапилли (0,6 мгP/кг) было в 12 раз больше, чем в пеплах (0,05 мгP/кг) (рис. 2А). Содержание TN в пеплах (27,6 мгN/кг) и составляющих его No (20,3 мгN/кг) и Nm (7,3 мгN/кг) было, соответственно, в среднем, в 1,5 раза больше, чем в лапилли, в которых этих соединений содержалось 17,7; 12,6 и 3,8 мгN/кг соответственно (рис. 2Б). Среди минеральных форм N содержание NH<sub>4</sub> было на 2 порядка больше чем NO<sub>2</sub> и на порядок, чем NO<sub>3</sub>, как в пепле (6,7, 0,02, 0,6 мгN/кг), так и в лапилли (3,6; 0,01 и 0,2 мгN/кг) (рис. 2Б). Содержание биодоступных (водорастворимых) соединений Fe (8,4 мгFe/кг — пепел; 8,9 мгFe/кг — лапилли) в разноразмерной пирокластике различалось незначительно, а содержание Si (79 мгSi/кг — пепел,

48 мгSi/кг — лапилли) было почти в 2 раза больше в пеплах (рис. 2В).

Статистический анализ выборок концентраций, полученных при экспозиции проб 1, 2 и 3, показал отсутствие достоверных различий между ними. Это означает, что при разных начальных условиях эксперимента (разные навески) процесс вымывания БЭ из лапилли имеет одинаковую динамику, поэтому для её описания использовали значения БЭ, усреднённые для этих проб.

В пробе пирокластики 1П с высокой степенью размерной неоднородности частиц вымывание TP и TN проходило в два этапа. В первую неделю в раствор перешло вдвое меньше TP, по сравнению с его начальным количеством, тогда как после 2-х недельной экспозиции его концентрация в растворе была сравнима с первоначальной (рис. 3А). Для TN количество вымываемого вещества увеличилось до максимума в течение первых двух недель (рис. 3Б), далее и для TP и для TN темп вымывания стал замедляться, подчиняясь степенной зависимости (рис. 3А, Б). После 88 дней эксперимента в образце сохранился «запас» TP, который составил половину от первоначально вымытого количества и TN — в 1,4 раза больше от вымытого из образца в начале эксперимента (рис. 3А и Б). Скорость вымывания TP до стабилизации процесса (50-й день) составляла 0,026 мг/л/сутки, TN — 0,22 мг/л/сутки. После 8-ми недель эксперимента TP и TN вымывались с постоянной значительно меньшей скоростью — 0,005 мгP/л/сутки и 0,08 мгN/л/сутки.

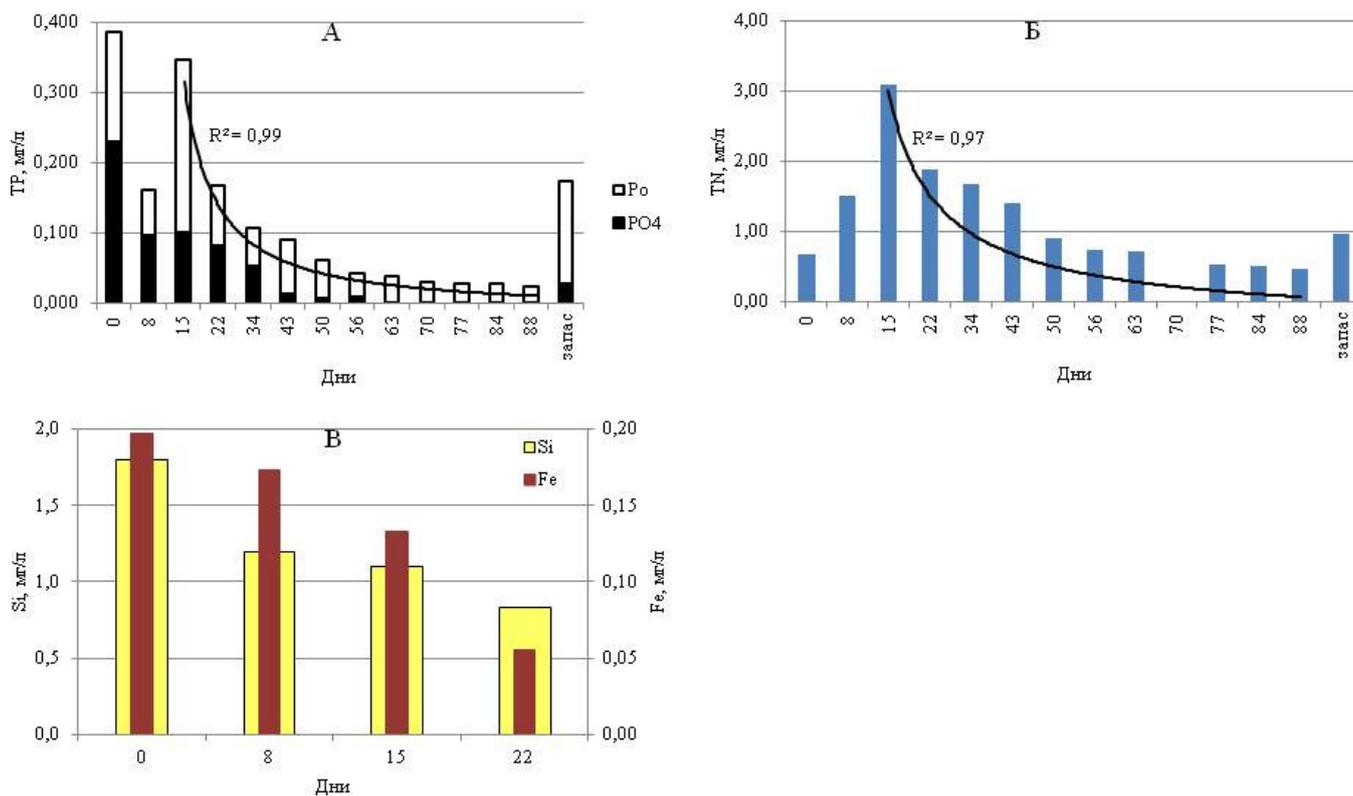


Рис. 3. Динамика вымывания БЭ из пирокластического материала с высокой степенью размерной разнородности частиц.

На 40–98% ТР состоял из т.н. «органической» части (P<sub>о</sub>), при этом относительное содержание фосфатного фосфора было высоким (60%) в первоначальной вытяжке и через 8 дней экспозиции. В остальное время в водной вытяжке фосфор определялся как «органическая» форма (см. рис. 3А).

Иная динамика вымывания была присуща Si и Fe, за которой наблюдали 22 дня. В этом случае процесс характеризовался линейным трендом, а скорость вымывания Si составила 0,2 мг/л/сутки, а Fe — 0,03 мг/л/сутки (см. рис. 3В).

Из проб, состоящих из сравнительно однородных по размеру лапилли, вымывание всех БЭ происходило относительно равномерно на протяжении всего эксперимента (рис. 4). В начальной вытяжке содержание ТР, ТN, Si и Fe было наибольшим. Значительная часть ТР и Fe была вымыта в первые 7 дней экспозиции (рис. 4А и Г) со скоростью для ТР 0,015 мгР/л/сутки, а Fe 0,06 мгFe/л/сутки. Далее процесс вымывания стабилизировался и еженедельно в воду поступало 0,029–0,048 (0,035±0,006) мгР/л и 0,03–0,09 (0,06±0,02) мгFe/л. При этом скорость вымывания составила для ТР — 0,006 мгР/л/сутки, а для Fe — 0,01 мг/л/сутки. Вымывание ТР и Fe проходило по одинаковому типу и характеризовалось степенным трендом (рис. 4А, Г). Большую часть ТР представляла т.н. «органическая» фракция (рис. 4А). К концу эксперимента в лапилли оставался значительный запас ТР — в 1,4 раза больше концентрации в первоначальной вытяжке; и Fe, запас которого

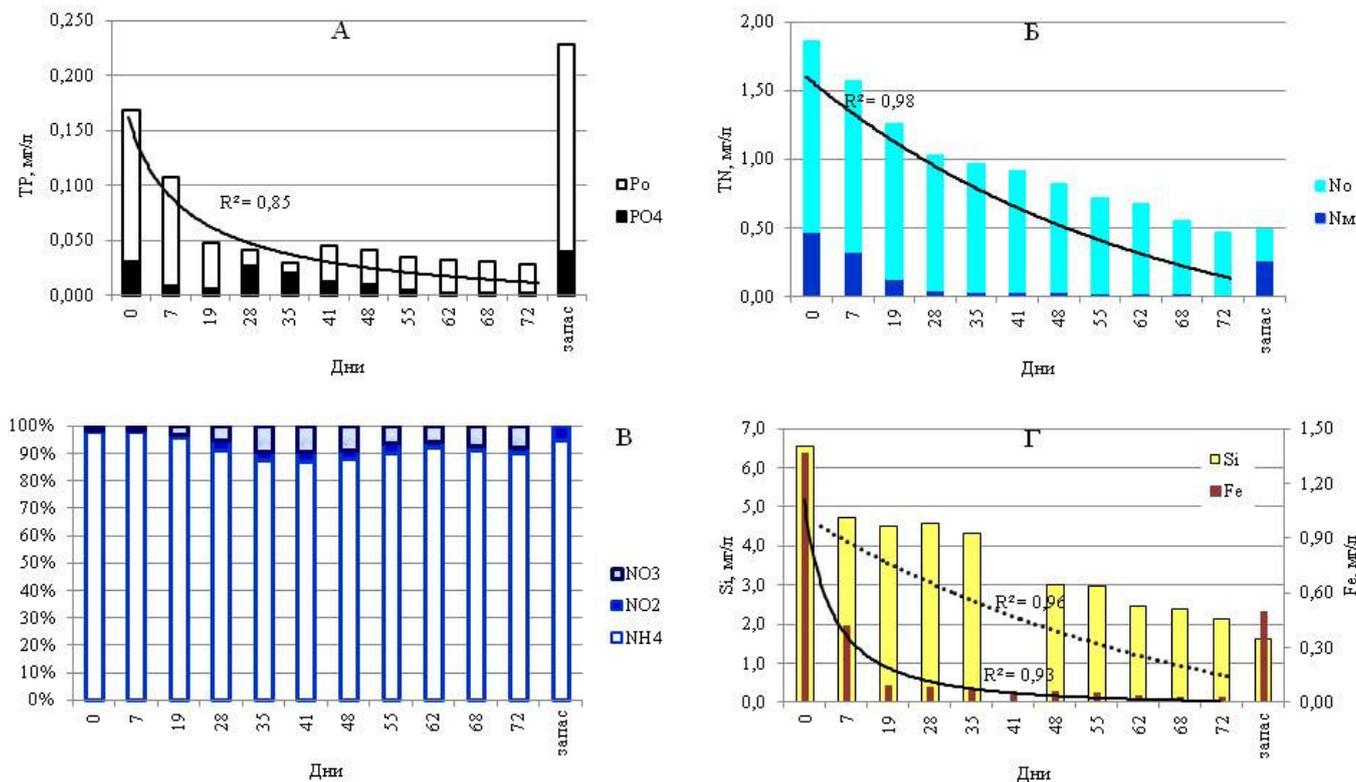
был в 2,5 раза меньше, чем в водной вытяжке в начале эксперимента (рис. 4А и Г).

Вымывание ТN проходило по экспоненциальному типу (рис. 4Б), со скоростью в начале эксперимента 0,23 мгN/л/сутки, в середине — 0,14 мгN/л/сутки и в конце — 0,07 мгN/л/сутки. От 75% до 96% ТN составляла «органическая» фракция. Запас ТN (0,49 мгN/л) оказался в 3,8 раза меньше его содержания в начальной водной вытяжке из свежих лапилли и на 54% состоял из Nm, который, в свою очередь, на 90% и более был сложен NH<sub>4</sub> (см. рис. 4В).

Вымывание Si также проходило по экспоненциальному закону (см. рис. 4Г) со скоростью 0,6 мгSi/л/сутки в первой половине эксперимента и 0,3 мгSi/л/сутки — во второй. Запас водорастворимого Si в конце эксперимента (1,6 мг/л) был в 6 раз меньше по сравнению с концентрацией этого элемента в вытяжке из свежих лапилли.

### Обсуждение

Химический анализ пеплов Большого Трещинного Толбачинского извержения 1975–1976 гг. показал, что из интересующих нас БЭ они содержат соединения P, Si и Fe. Содержание Si (49,88–51,19%) и Fe (9,88–10,89%) мало различалось в пеплах разного происхождения, тогда как P было в 2–3 раза больше в пеплах Южного прорыва (0,55%), чем в пеплах Северного (0,20%) [4]. Известно, что водные вытяжки пеплов БТТИ содержали Si и NH<sub>4</sub>, при этом их



**Рис. 4.** Динамика вымывания БЭ из пирокластического материала с незначительной степенью размерной разнородности частиц.

концентрации были достоверно выше в вытяжках из пеплов с наименьшим средним размером зёрна [14]. В нашем эксперименте концентрация БЭ за исключением  $PO_4$  в водной вытяжке из пеплов была больше, чем из лапилли. Фосфатный фосфор, напротив, в большем количестве содержался в водных вытяжках из лапилли.

ТР и TN формировали минеральные составляющие и «органическая» часть, которая в случае ТР, предположительно, представляет собой фосфор в составе зольей или комплексных соединений, в основном, с Fe, на что указывает сходная динамика вымывания этих двух элементов. Для TN — это, предположительно, амины неорганического происхождения и азот, связанный с комплексными минеральными соединениями и освобождающийся при жёстком окислении.

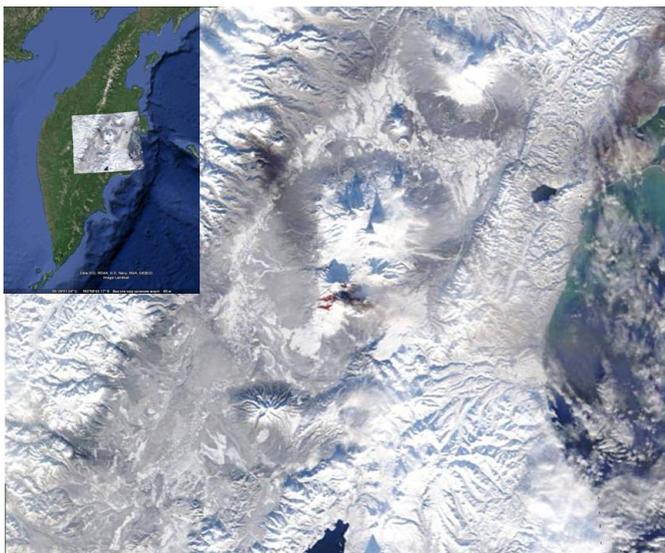
Динамика и скорость вымывания БЭ зависит от размерной разнородности материала. Поэтапное вымывание ТР и TN наблюдалось в тех случаях, когда пирокластический материал состоял из равных частях из очень мелких и из значительно более крупных частиц. Вымывание БЭ из однородного по размерам частиц материала происходит последовательно и подчиняется степенной зависимости для P и Fe или идёт по экспоненциальному типу — для N и Si. По сходному типу происходит вымывание ТР и Fe из костей тихоокеанских лососей на нерестилищах [11].

Средняя скорость вымывания ТР из лапилли составила 0,006 мгP/л/сутки, TN — 0,08 мгN/л/сутки, Si — 0,4 мг/л/сутки и Fe — 0,02 мг/л/сутки.

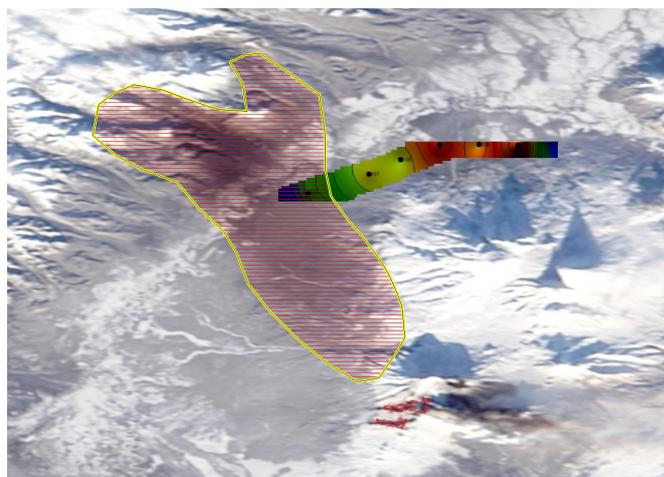
Экспериментально установлено, что в первые 30 суток из пирокластике с высокой степенью размерной неоднородности вымывается 69% ТР и 59% TN, при этом минеральный фосфор ( $PO_4$ ) извлекается значительно быстрее — 90% в первые 30 дней, чем фосфор в составе комплексных соединений (Po) — 57%. Из однородных по размеру лапилли в первые 30 дней вымывается 47% ТР; 65% TN; 70% Fe и 57% Si.  $PO_4$  извлекается быстрее — 56%, чем Po — 45%, как и в случае с разноразмерным пирокластическим материалом. То же отмечаем и для составляющих TN, когда минеральные формы азота извлекаются в первый месяц в большем объёме — 71%, чем «органические» — 29%.

С учётом того, что нам не известны объёмные соотношения пепла и лапилли в пирокластике от трещинного Толбачинского извержения 2012–2013 гг. мы сочли возможным усреднить вышеприведенные значения для оценки количества БЭ, которое может поступить в реки. Таким образом, в первые 30 дней эксперимента из пирокластике было вымыто 73%  $PO_4$ , 71% Nm, 70% Fe и 57% Si. Фосфора и азота в составе более устойчивых соединений было извлечено меньше — 51% и 29%, соответственно.

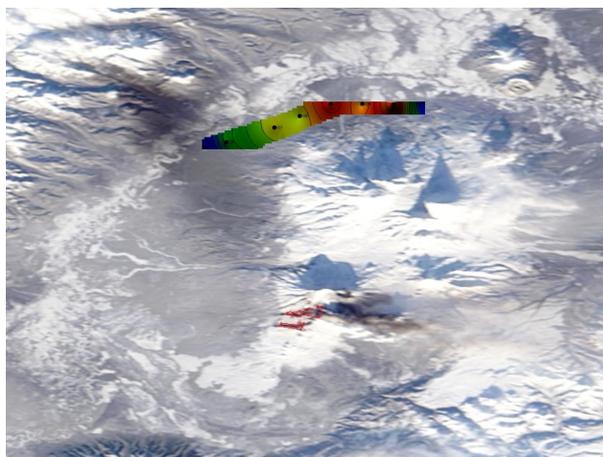
Основное количество материала, извергнутого в ходе Трещинного Толбачинского извержения в 2012–2013 гг., выпало на водосбор р. Камчатка в её



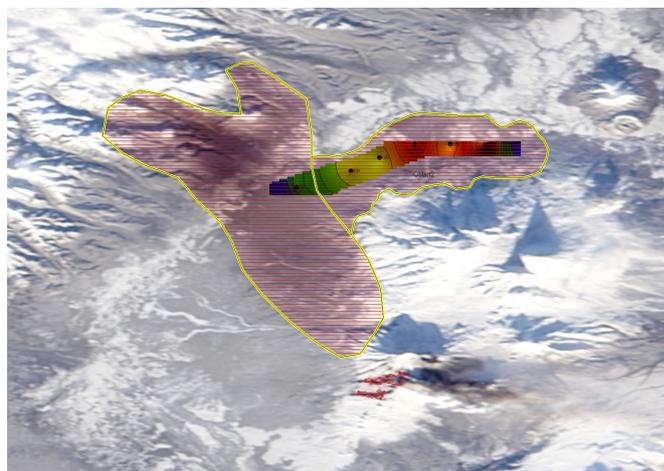
**Рис. 5.** Спутниковый снимок района вулканов Ключевской группы за 29 ноября 2012 г.



**Рис. 7.** Зона основного распределения пеплового выброса.



**Рис. 6.** Точки отбора проб и распределение количества учтенного пирокластического материала на маршруте.



**Рис. 8.** Зона вторичного выпадения пепла.

среднем течении (рис. 5). Для оценки количества БЭ, которые попадут в реку рассчитали площадь распространения пирокластического выброса и его весовой объём. Исходными данными для этого послужили:

- спутниковый снимок со сканирующего спектро- радиометра MODIS (MODerate-resolution Imaging Spectroradiometer) с борта космического аппарата (КА) Aqua за 29 ноября 2012 г. (рис. 5). Предостав- лен Д. В. Мельниковым.

- результаты маршрутного сбора пирокластиче- ского материала вдоль автомобильной трассы Миль- ково – Ключи (рис. 6, 28 ноября 2012 г.). Материалы предоставлены Ю. В. Демянчуком и Н. А. Малик.

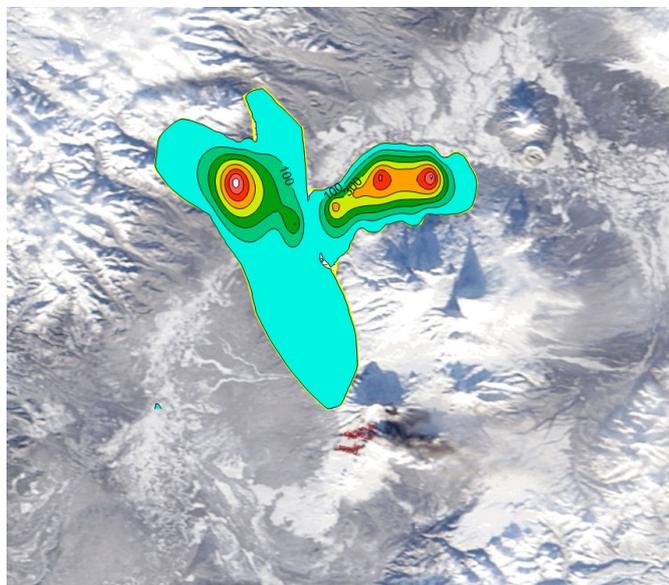
В результате анализа спутникового снимка была выделена и оцифрована область наиболее вероятного распространения пеплового выброса (рис. 7). При со- поставлении натуральных наблюдений с полученным

таким образом ареалом (рис. 8), выяснилось, что значительное количество пепла выпало и с северной стороны Ключевской группы вулканов, но также в пределах бассейна р. Камчатка. Исходя из дан- ных о количестве пепла на маршруте отбора проб и цветовой палитры спутникового снимка, логич- но прийти к выводу о существовании ещё одно- го «языка» осадения, образовавшегося благодаря особенностям местной топографии или при смене господствующего ветра на западный.

Расчёт площади контурных участков, а так- же объёма выпавшего пепла осуществлялся в про- грамме Surfer 10 (Golden Software, Inc.) с исполь- зованием реализованного в ней геостатистического метода Kriging. Исходя из цветовой плотности ис- следуемой территории в сопоставлении с данными натуральных наблюдений, мы экстраполировали чис- ловые значения в зоне максимального и минималь-

**Таблица 3.** Расчётное количество биогенных элементов в пирокластике Трещинного Толбачинского извержения и объёмы их вымывания в разные периоды 2013 г.

БЭ	Количество БЭ в пирокластике, мг элемента/кг породы	Кол-во БЭ, в составе пирокластики, т	Кол-во БЭ, вымываемых за период снеготаяния в 2013 г., т	Кол-во БЭ, поступившее в реку в 2013 г., т	Остаток БЭ в пирокластике после вымывания в период снеготаяния, т
ТР	2,7	626	365	328	261
PO <sub>4</sub>	0,325	75	55	50	20
Рo	2,4	557	285	256	272
TN	22,65	5252	3241	2917	2011
No	16,45	3815	1098	988	2717
Nм	5,55	1287	915	823	372
Fe	8,65	2006	1408	1267	598
Si	63,5	14 724	8447	7602	6278



**Рис. 9.** Расчёт плотности пирокластического материала (г/м<sup>2</sup>).

ного затенения, в которых отсутствовали данные по количеству пирокластического материала. Полученное в результате экспертной оценки и компьютерных расчётов распределение представлено на рис. 9. Оценка объёма распределенного на данной территории материала дала следующие результаты: 31 491,7 т пирокластики на площади 968 675 497,2 м<sup>2</sup>.

Для оценки количества БЭ, которые в 2013 г. попадут в реку, были сделаны следующие предположения:

1. Динамика вымывания БЭ из пеплов и лапилли имеет сходный характер.
2. Для больших площадей покрытия допустимо использовать средние значения содержания БЭ в пирокластическом материале.
3. Эксперимент проводили при условии постоянного увлажнения. Аналогичные условия в природе

складываются только в период таяния снега (при выпадении дождей осадки поступают эпизодически). Длительность снеготаяния на данной территории грубо можно оценить в 30 дней. Следовательно, из эксперимента берем процент вещества, переходящего в раствор за это время.

4. Коэффициент стока для бассейна среднего течения р. Камчатка равный 0,9 рассчитан как частное от деления величины слоя стока в мм на количество осадков в мм (среднемноголетние данные для метеостанций в средней части бассейна р. Камчатка [16]). По нашему мнению, тот же коэффициент стока можно отнести к объёму вещества, выпавшего на водосбор. Таким образом, теоретически, за год в реку из пирокластики может поступить 90% БЭ от того количества, которое было вымыто за период снеготаяния.

5. На долю прочих химических элементов приходится 10%.

Полученные результаты приведены в табл. 3.

Основным источником БЭ особенно PO<sub>4</sub> в экосистемах лососевых водоёмов и водотоков Камчатки являются погибшие после нереста тихоокеанские лососи [5, 7, 8, 9, 11]. Фосфор в составе мягких тканей поступает в воду в течение нескольких дней после гибели лососей, а кости рыб замываются в верховьях рек и озёрных донных отложениях и обогащают воду БЭ либо на следующий год после нереста, либо процесс выхода БЭ из костной ткани затягивается на несколько лет [9, 12, 13]. Количество БЭ, поступающих с рыбой, находится в тесной зависимости от мощности нерестовых заходов лососей в реки и по ряду причин естественного и антропогенного характера нестабильно. Также нестабильно и «массированное» поступление в экосистемы БЭ из пирокластического материала. В результате совместного воздействия двух этих факторов, продуктивность экосистем водотоков и водоёмов Камчатки, вероятно, может испытывать значительные кратковременные колебания. Вместе с тем, постоянный

характер поступления БЭ из донных и береговых отложений, сложенных «старым» пирокластическим материалом, может определять стабильность биогенного режима водоёмов и водотоков, в том числе, и в отсутствие поступлений «рыбных» БЭ. Пример тому вулканические безрыбные озёра Державина — влк. Дикий Гребень, а также Ключевое (Кальдера Ксудач) и Карымское до вселения в эти два водоёма кокани, и до стерилизации экосистемы извержением в случае с оз. Карымское, в которых сформировались высокопродуктивные экосистемы [10], долговременное и стабильное существование которых, вероятно, поддерживается, в большей степени, поступлением БЭ из пирокластике водосборов.

Обогащение минеральными (биодоступными) формами фосфора и азота рек, попавших в зону покрытия пирокластическим материалом, происходит в первый год после извержений и носит, вероятно, размытый и кратковременный характер в силу динамичности речных систем. Однако значительный запас фосфора и азота в «органической» форме обеспечивает многолетнее постепенное поступление этих БЭ в реки.

В нашем эксперименте мы показали, что, несмотря на первоначальное залповое вымывание БЭ из лапилли, в дальнейшем скорость их поступления в раствор быстро стабилизируется на уровне фоновом для лососёвых рек и озёр Камчатки. Это обстоятельство в сочетании со значительным «запасом» БЭ, особенно ТР, оставшимся к концу эксперимента, позволяет предположить, что поля лапилли могут длительное время служить источником биодоступного фосфора и других БЭ для водных экосистем.

### Заключение

Экспериментально показано, что выщелачивание БЭ из пирокластике носит нелинейный характер, из чего следует, что обогащение водных объектов биогенными элементами особенно интенсивно происходит, вероятно, в первый год после извержений. Однако факт стабилизации скорости вымывания БЭ из лапилли на фоновом для лососёвых водоёмов Камчатки уровне позволяет рассматривать пирокластике на водосборах как дополнительный и стабильный источник БЭ особенно ТР, лимитирующего биологическую продуктивность большинства лососёвых экосистем. Основываясь на данных эксперимента установили, что в 2013 г. в р. Камчатка из пирокластике попадет 50 т фосфатного фосфора, 823 т минерального азота, 1267 т железа и 7602 т кремния.

### Благодарности

Авторы благодарят сотрудников Института вулканологии и сейсмологии РАН В. В. Ананьева, А. Б. Белоусова, Д. В. Мельникова, Ю. В. Демянчука и Н. А. Малик за консультации и советы в процессе написания статьи и за предоставленные материалы. Авторы также благодарны С. Л. Горину (ВНИРО)

за советы по гидрологической интерпретации экспериментальных результатов и Е. А. Шевлякову (КамчатНИРО) за внимательное прочтение и редакцию.

### Список литературы

1. Алексин О. А., Семёнов А. Д., Скопинцев Б. А. Руководство по химическому анализу вод суши. Л.: Гидрометеиздат. 1973. 269 с.
2. Базаркина Л. А. К проблеме повышения кормовых ресурсов молоди нерки в озере Азабачье // Исслед. водн. биол. ресурсов Камчатки и сев.-зап. части Тихого океана. 2002. Вып. VI. С. 251-259.
3. Бугаев В. Ф., Базаркина Л. А. Влияние вулканизма на численность нерки *Oncorhynchus nerka* р. Камчатки // Сохранение биоразнообразия Камчатки и прилегающих морей: Доклады XII-XIII международных. научн. конф. 2011-2012. Петропавловск-Камчатский: Камчатпресс. 2013. С. 52-66.
4. Будников В. А., Малеев Е. Ф., Овсянников А. А. Сравнительная характеристика пеплов Северного и Южного прорывов БТТИ 1975-1976 гг. // Бюллетень вулканологических станций. 1979. №56. С. 131-141.
5. Введенская Т. Л., Уколова Т. К., Свириденко В. Д. Гидрохимическая характеристика реки Большая (Камчатка) // Исслед. водн. биол. ресурсов Камчатки и сев.-зап. части Тихого океана. Петропавловск-Камчатский: КамчатНИРО. 2006. Вып. 8. С. 158-165.
6. Действующие вулканы Камчатки в 2 т. М.: Наука. 1991. Том 1. — 304 с. Том 2—416 с.
7. Крохин Е. М. Источник обогащения нерестовых озёр биогенными элементами // Изв. Тихоокеан. НИИ рыб. хоз-ва и океанографии. 1957. Том 45. С. 31-54
8. Крохин Е. М. О влиянии количества отнерестовавших в озере производителей красной (*O. nerka*) на режим биогенных элементов // ДАН АН СССР. 1959. Том 128. №3. С. 626-627.
9. Крохин Е. М. Влияние размеров пропуска производителей красной на фосфатный режим нерестовых озёр // Изв. Тихоокеан. НИИ рыб. хоз-ва и океанографии. 1967. Том 57. С. 31-54.
10. Лепская Е. В. Время трансформации каркасного фосфора в разнотипных озёрах Камчатки // X Съезд Гидробиологического общества при РАН. Тезисы докладов (г. Владивосток, 28 сентября — 2 октября 2009 г.) Отв. ред. Алимов А. Ф., Адрианов А. В. Владивосток: Дальнаука. 2009. С. 235.
11. Лепская Е. В., Лутикينا Е. Г. Диатомовые вулканических озёр Камчатки // Морфология, клеточная биология, экология, флористика и история развития диатомовых водорослей: материалы X Междунар. научн. конф. диатомологов стран СНГ, г. Минск, 9-14 сент. 2007 г. Минск: БГПУ. 2007. С. 95-97.
12. Лепская Е. В., Кучерявый А. В. Динамика вымывания фосфора и некоторых металлов из костей постнерестовой нерки в речном и озёрном биотопе оз. Курильское (Камчатка) // Чтения памяти Леванидова В. Я.. Владивосток. 21-23 марта 2011 г. Сб. докладов. Владивосток: Дальнаука. 2011. С. 293-299

13. Лепская Е. В., Маслов А. В. Долгосрочные изменения гидрометеорологической обстановки в бассейне озера Курильского (Камчатка) и особенности трансформации «рыбного» фосфора в озёрной экосистеме // Известия ТИНРО. 2009. Том. 158. С. 293-302.
14. Лепская Е. В., Маслов А. В., Свириденко В. Д., Уколова Т. К., Шубкин С. В. Влияние «рыбного» фосфора на фосфорный режим и структуру фитопланктона некоторых лососёвых озёр Камчатки // Озёрные экосистемы: биологические процессы, антропогенная трансформация, качество воды: тез. докл. IV Междунар. научн. конф., 12–17 сент. 2011 г., Минск – Нароч. (отв. редактор Михеева Т. М.) Минск: Изд. центр БГУ. 2011. С. 29
15. Меняйлов И. А., Никитина Л. П., Шапарь В. Н., Литасова С. Н. Водные вытяжки из пеплов новых тольбачинских вулканов. Бюллетень вулканологических станций. 1979. № 56. С. 149-161.
16. Миловская Л. В. Общая гидрохимическая характеристика и трофический статус озера Курильское // Исслед. водн. биол. ресурсов Камчатки и сев.-зап. части Тихого океана. 2004. Вып. 7. С. 59-69.
17. Ресурсы поверхностных вод СССР. Том. 20. Камчатка. 1973. Л.: Гидрометеоиздат. 368 с.
18. Руководство по химическому анализу морских и пресных вод при экологическом мониторинге рыбохозяйственных водоёмов и перспективных для промысла районов Мирового океана. М.: Изд-во ВНИРО. 2003. 202 с.
19. Kurenkov I. I. The influence of volcanic ashfall on biological process in a lake // Limnol. and Oceanogr. 1966. Vol. 11 (3). P. 426-429.