

## **Активный биомониторинг в оценке влияния пеплопадов на загрязнение воздуха**

**Чернягина О.А.<sup>1</sup>, Зиньковская И.И.<sup>2</sup>, Юшин Н.С.<sup>2</sup>**

### **Active biomonitoring in assessing the impact of ashfalls on air pollution**

**Chernyagina O.A., Zinicovskaia I.I., Yushin N.S.**

<sup>1</sup> Камчатский филиал Федерального государственного бюджетного учреждения науки Тихоокеанский институт географии ДВО РАН, г. Петропавловск-Камчатский;

e-mail: kamchatika@mail.ru

<sup>2</sup> Объединенный институт ядерных исследований, г. Дубна

Впервые активный биомониторинг с использованием техники «мох в мешочках» был применен на Камчатке для оценки влияния пеплопадов на качество воздуха. Содержание Al, Ba, Co, Cd, Cr, Cu, Fe, Mn, P, Pb, Sr, S, V и Zn в экспонированных и контрольных образцах мха было определено на ИСП-ОЭС. Содержание элементов в экспонированных образцах практически во всех точках было выше по сравнению с контролем.

### **Введение**

Вулканы, во время извержения которых в воздух выбрасываются миллионы тонн пепла и газов, являются одними из наиболее важных природных загрязнителей воздуха. Шивелуч – наиболее активный вулкан Камчатки, расположенный в северной части Центральной Камчатской депрессии, в 50 км от пос. Ключи и в 450 км от г. Петропавловск-Камчатский [1]. Извержение вулкана в апреле 2023 года привело к выбросу огромного количества пепла, который выпал в населенных пунктах, находящихся вблизи вулкана. Как известно, помимо газообразных загрязнителей, пепел является важным источником загрязнения воздуха тяжелыми металлами.

Мхи рассматриваются как один из основных биологических индикаторов загрязнения воздуха из-за их широкого распространения, простоты строения, высокой скорости размножения, роста на территориях с разным уровнем загрязнения и возможности мониторинга концентраций загрязнителей различного происхождения [3, 5]. Поскольку у мхов отсутствует хорошо развитая корневая система, они поглощают питательные вещества и загрязняющие вещества в основном из воздуха [4].

В 1971 г. Гудман и Робертс предложили использовать технику «мох в мешках», которая заключается в сборе мха в относительно чистом (фоновом регионе) и экспонировании его на исследуемой территории в специальных проницаемых для воздуха мешочках [6]. На сегодняшний день данная техника широко используется во многих странах мира.

Целью данной работы стало использование техники «мох в мешках» для определения влияния пеплопадов на качество воздуха в населенных пунктах вблизи вулкана Шивелуч.

### **Материалы и методы**

Для проведения активного биомониторинга был выбран мох *Sphagnum girgensohnii*. Мох был собран в мае 2022 г. в водно-болотном угодье Тверской области, которая, по результатам пассивного биомониторинга, является самым чистым регионом в центральной России. Пробоподготовка мха перед экспонированием подробно описана в ранее выполненных работах [6]. Мешочки со мхом развешивали на территории Елизовского, Быстринского, Усть-Камчатского районов (рисунок). По окончании периода экспонирования мешочки со мхами хранили в закрытых бумажных пакетах. Часть неэкспонированного материала хранили в лаборатории и использовали в качестве контроля при расчетах.

В лаборатории растительное сырье извлекали из мешков, сушили до постоянной массы при температуре 105 °С и гомогенизировали в планетарной мельнице Pulverisette 6 («Fritsch», Германия).

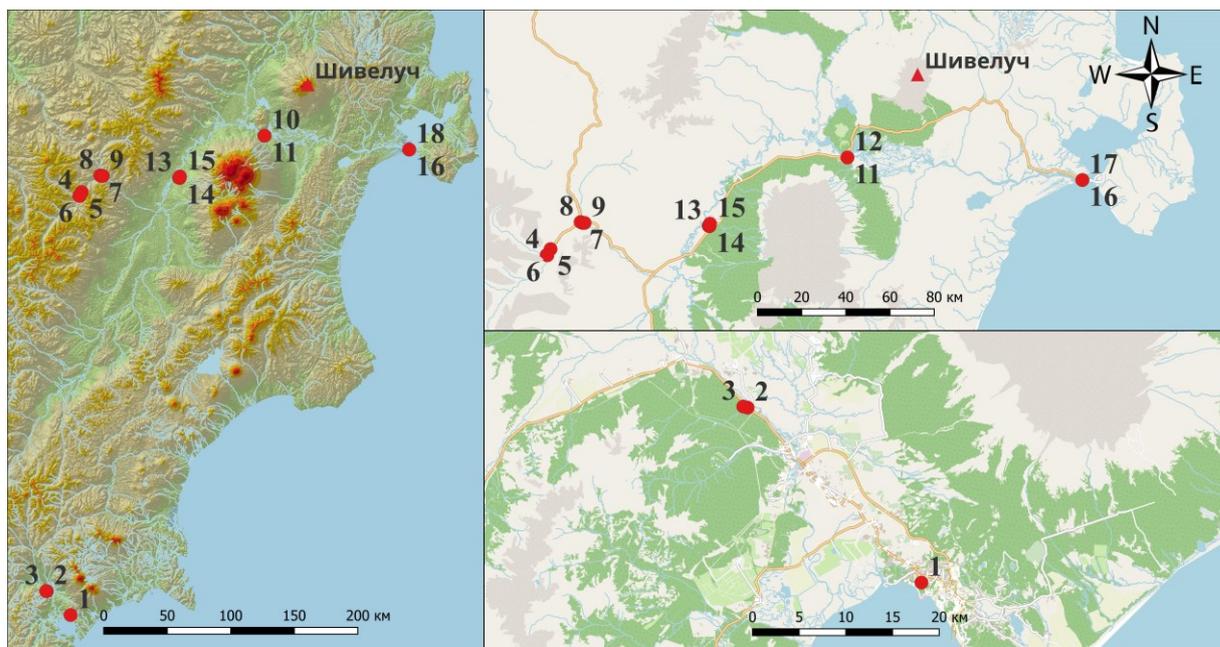


Рисунок. Карта экспонирования мешочков со мхами.

Для проведения элементного анализа 0.5 г мха помещали в тефлоновые сосуды и добавляли 5 мл концентрированной  $\text{HNO}_3$  («Sigma-Aldrich», Германия) и 2 мл  $\text{H}_2\text{O}_2$  (Sigma-Aldrich, Германия). Разложение проводили при 180 °С в микроволновой системе разложения Mars 6 (СЕМ, США). После охлаждения пробы количественно переносили в колбы емкостью 50 мл и доводили до объема деионизированной водой. Более подробную информацию о подготовке проб можно найти в работе [7]. Содержание Al, Ba, Co, Cd, Cr, Cu, Fe, Mn, P, Pb, Sr, S, V и Zn определяли на оптико-эмиссионном спектрометре с индуктивно-связанной плазмой (ИСП-ОЭС) PlasmaQuant 9000 Elite (Analytik Jena, Германия). Калибровочные растворы готовили из стандартного раствора IV-STOCK-27 (Inorganic Ventures, США). Все контрольные стандарты анализировали повторно после каждых 10 проб.

Контроль качества измерений обеспечивался анализом эталонного материала «Листья табака восточной басмы» (INCT-OBTL-5). Извлечение элементов из стандартного материала варьировало от 96 % до 110 %.

### Результаты и обсуждение

Как видно из данных, представленных в таблице, содержание элементов в экспонированных пробах мха было значительно выше по сравнению с контрольными образцами. Помимо населенных пунктов вблизи вулкана, мхи экспонировали также в г. Петропавловск-Камчатский и вблизи города Елизово. Содержание всех элементов, кроме P и S, в образцах мха, экспонированных в г. Петропавловск-Камчатский (точка № 1), было выше по сравнению с контролем. Так как город не был подвержен пеплопадам, основными источниками элементов в данном случае можно считать транспорт и дорожную пыль [2]. Вблизи г. Елизово (точки №№ 2, 3) содержание основной части элементов было на уровне контроля, кроме Zn, Ba, Mn, источником которых можно считать осаждение частиц почвы и дорожной пыли.

Таблица. Содержание химических элементов (мг/кг) в контрольных и экспонированных образцах мха

| № точек<br>экспонирования | Определенные элементы |            |             |             |             |             |             |              |             |            |             |             |              |             |             |
|---------------------------|-----------------------|------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|--------------|-------------|------------|-------------|-------------|--------------|-------------|-------------|
|                           | Al                    | Cu         | Cd          | Co          | Pb          | Zn          | V           | Ba           | Cr          | Mn         | P           | S           | Sr           | Fe          | Ni          |
| <i>контроль</i>           | <u>217</u>            | <u>3.9</u> | <u>0.14</u> | <u>0.25</u> | <u>1.80</u> | <u>25.5</u> | <u>0.54</u> | <u>22.63</u> | <u>0.34</u> | <u>215</u> | <u>1966</u> | <u>1256</u> | <u>10.40</u> | <u>215</u>  | <u>1.44</u> |
| <b>1*</b>                 | <b>430</b>            | <b>4.9</b> | <b>0.23</b> | <b>0.37</b> | <b>2.36</b> | <b>70.8</b> | <b>1.32</b> | <b>45.2</b>  | <b>0.49</b> | <b>338</b> | <b>1191</b> | <b>1161</b> | <b>15.6</b>  | <b>577</b>  | <b>2.30</b> |
| 2                         | 197                   | 3.7        | 0.13        | 0.23        | 1.86        | 26.6        | 0.47        | 23.5         | 0.31        | 304        | 1945        | 1180        | 12.1         | 231         | 1.03        |
| 3                         | 215                   | 4.3        | 0.16        | 0.28        | 2.34        | 55.3        | 0.55        | 36.4         | 0.31        | 352        | 1732        | 1209        | 13.9         | 278         | 1.23        |
| <b>4</b>                  | <b>303</b>            | <b>4.7</b> | <b>0.15</b> | <b>0.26</b> | <b>1.89</b> | <b>49.8</b> | <b>0.62</b> | <b>40.3</b>  | <b>0.35</b> | <b>348</b> | <b>2051</b> | <b>1395</b> | <b>16.1</b>  | <b>311</b>  | <b>1.41</b> |
| <b>5</b>                  | <b>315</b>            | <b>4.1</b> | <b>0.13</b> | <b>0.25</b> | <b>1.68</b> | <b>45.0</b> | <b>0.76</b> | <b>33.7</b>  | <b>0.33</b> | <b>318</b> | <b>2045</b> | <b>1323</b> | <b>15.2</b>  | <b>341</b>  | <b>1.42</b> |
| <b>6</b>                  | <b>369</b>            | <b>4.7</b> | <b>0.15</b> | <b>0.29</b> | <b>1.96</b> | <b>49.1</b> | <b>1.06</b> | <b>37.4</b>  | <b>0.39</b> | <b>340</b> | <b>2101</b> | <b>1402</b> | <b>16.3</b>  | <b>427</b>  | <b>1.72</b> |
| 7                         | 796                   | 5.1        | 0.15        | 0.37        | 1.83        | 56.9        | 2.05        | 41.8         | 0.53        | 368        | 2207        | 1475        | 19.3         | 704         | 1.52        |
| 8                         | 401                   | 5.7        | 0.20        | 0.34        | 2.76        | 90.1        | 0.94        | 62.2         | 0.43        | 434        | 2038        | 1495        | 19.4         | 400         | 1.59        |
| 9                         | 711                   | 5.4        | 0.19        | 0.40        | 2.41        | 86.0        | 1.61        | 53.3         | 0.50        | 410        | 1947        | 1431        | 19.6         | 577         | 1.55        |
| <b>10</b>                 | <b>424</b>            | <b>5.0</b> | <b>0.14</b> | <b>0.33</b> | <b>1.83</b> | <b>34.0</b> | <b>1.19</b> | <b>29.5</b>  | <b>0.81</b> | <b>310</b> | <b>1856</b> | <b>1361</b> | <b>13.8</b>  | <b>427</b>  | <b>1.48</b> |
| <b>11</b>                 | <b>362</b>            | <b>4.5</b> | <b>0.15</b> | <b>0.31</b> | <b>1.77</b> | <b>37.0</b> | <b>0.87</b> | <b>31.1</b>  | <b>0.58</b> | <b>324</b> | <b>1664</b> | <b>1234</b> | <b>13.7</b>  | <b>344</b>  | <b>1.30</b> |
| <b>12</b>                 | <b>387</b>            | <b>4.4</b> | <b>0.14</b> | <b>0.33</b> | <b>1.90</b> | <b>30.4</b> | <b>0.97</b> | <b>27.1</b>  | <b>0.68</b> | <b>316</b> | <b>1800</b> | <b>1289</b> | <b>12.7</b>  | <b>384</b>  | <b>1.27</b> |
| 13                        | 1024                  | 5.1        | 0.14        | 0.51        | 2.48        | 39.2        | 2.55        | 38.7         | 1.02        | 309        | 1259        | 1017        | 17.7         | 830         | 1.50        |
| 14                        | 404                   | 4.5        | 0.14        | 0.31        | 1.89        | 50.3        | 0.91        | 47.4         | 0.45        | 332        | 1434        | 1096        | 13.8         | 368         | 1.28        |
| 15                        | 573                   | 4.9        | 0.15        | 0.36        | 1.81        | 53.6        | 1.39        | 41.8         | 0.75        | 381        | 1373        | 1136        | 16.4         | 493         | 1.46        |
| <b>16</b>                 | <b>981</b>            | <b>6.4</b> | <b>0.16</b> | <b>0.95</b> | <b>2.27</b> | <b>49.5</b> | <b>3.81</b> | <b>43.1</b>  | <b>3.34</b> | <b>339</b> | <b>1455</b> | <b>1234</b> | <b>15.7</b>  | <b>1366</b> | <b>6.29</b> |
| <b>17</b>                 | <b>702</b>            | <b>5.8</b> | <b>0.13</b> | <b>0.70</b> | <b>2.00</b> | <b>33.7</b> | <b>2.63</b> | <b>28.9</b>  | <b>2.20</b> | <b>307</b> | <b>1683</b> | <b>1253</b> | <b>13.6</b>  | <b>996</b>  | <b>4.69</b> |
| <b>18</b>                 | <b>595</b>            | <b>5.0</b> | <b>0.14</b> | <b>0.58</b> | <b>2.31</b> | <b>49.9</b> | <b>1.95</b> | <b>41.9</b>  | <b>1.79</b> | <b>327</b> | <b>1406</b> | <b>1131</b> | <b>14.5</b>  | <b>807</b>  | <b>3.77</b> |

Примечание. 1 – г. Петропавловск-Камчатский; 2, 3 – в 40 км от г. Елизово; 4, 5, 6 – с. Эссо; 7, 8, 9 – с. Анавгай; 10, 11, 12 – п. Ключи; 13, 14, 15 – п. Козыревск; 16, 17, 18 – п. Усть-Камчатск.

В точках 4-6 (с. Эссо), содержание Al, Cd, Pb, Cu, Co, Cr, P, S и Ni было на уровне или чуть выше контроля, содержание Zn, V, Ba, Sr, Fe выше на 15-97 %. Источником этих элементов предположительно может быть вулканический пепел. Во мхах, экспонированных в с. Анавгай (точки №№ 7-9), содержание всех элементов, кроме P и Ni, было выше контроля. Самое высокое накопление наблюдалось для Al, Ba, Zn, V, Fe и Sr. Стоит отметить, что во мхах накапливались одни и те же элементы вне зависимости от расположения точки экспонирования, и накопление элементов было выше, чем в г. Петропавловск-Камчатский. В поселке Ключи (точки №№ 10-12) во мхах накапливались Cu, Co, Zn, V, Ba, Cr, Sr и Fe. Мхи, экспонированные в п. Козыревск, накопили Al, Co, Zn, V, Ba, Cr, Sr, Mn и Fe, а в образцах, экспонированных в п. Усть-Камчатск, наблюдали накопление Cu, Co, Pb, Zn, V, Ba, Cr, Sr, Ni, и Fe. Ввиду отсутствия в описанных населенных пунктах крупных промышленных предприятий можно считать вулканический пепел важным источником накопления химических элементов в образцах мха. В дальнейшем планируется определение элементного состава пепла и сопоставление результатов с данными, полученными в настоящей работе.

### Список литературы

1. *Гурина О.А., Лупян Е.А., Хорват А. и др.* Анализ развития пароксизмального извержения вулкана Шивелуч 10-13 апреля 2023 года на основе данных различных спутниковых систем // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2023. Т. 20. № 2. С. 283-291.
2. *Apeagyei E., Bank M.S., Spengler J.D.* Distribution of heavy metals in road dust along an urban-rural gradient in Massachusetts // *Atmospheric Environment*. 2022. V. 45. P. 2310-2323. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2010.11.015>
3. *Macedo-Miranda G., Avila-Pérez P., Gil-Vargas P. et al.* Accumulation of heavy metals in mosses: a biomonitoring study // *Springerplus*. 2016. V. 5. P. 1-13. <https://doi.org/10.1186/s40064-016-2524-7>
4. *Świsłowski P., Kosior G., Rajfur M.* The influence of preparation methodology on the concentrations of heavy metals in *Pleurozium schreberi* moss samples prior to use in active biomonitoring studies // *Environmental Science and Pollution Research*. 2021. V. 28. P. 10068-10076. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-11484-7>
5. *Vuković G., Urošević M.A., Pergal M. et al.* Residential heating contribution to level of air pollutants (PAHs, major, trace, and rare earth elements): a moss bag case study // *Environmental Science and Pollution Research*. 2015. V. 22. P. 18956-18966. <https://doi.org/10.1007/s11356-015-5096-0>
6. *Zinicovscaia I., Aničić Urošević M., Vergel K. et al.* Active moss biomonitoring of trace elements air pollution in Chisinau, Republic of Moldova // *Ecological Chemistry and Engineering S*. 2018. V. 25. № 3. P. 361-372. <https://doi.org/10.1515/eces-2018-0024>
7. *Zinicovscaia I., Hramco C., Chaligava O. et al.* Accumulation of potentially toxic elements in mosses collected in the Republic of Moldova // *Plants*. 2021. V. 10. P. 1-13. <https://doi.org/10.3390/plants10030471>