

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕМЕНТНОГО СОСТАВА РАСТЕНИЙ В ЗОНЕ ГЕОЛОГИЧЕСКОЙ НЕОДНОРОДНОСТИ

Е.П. Храмова¹, И.Г. Боярских¹, О.В. Чанкина², К.П. Куценогий²

¹Центральный сибирский ботанический сад СО РАН,
630090, Новосибирск, ул. Золотодолинская, 101, e-mail: khramova@ngs.ru, irina_2302@mail.ru

²Институт химической кинетики и горения СО РАН,
630090, Новосибирск, ул. Институтская, 3, e-mail: chankina@ns.kinetics.nsc.ru, koutsen@ns.kinetics.nsc.ru

С помощью метода РФА СИ определен элементный состав листьев пятилистника кустарникового (*Pentaphylloides fruticosus* (L.) O. Schwarz) и жимолости синей (*Lonicera caerulea* subsp. *altaica* (Pall.) Gladkova), совместно произрастающих в геологически активной зоне. Обнаружено, что в исследуемый период в зоне геологической неоднородности общее содержание микроэлементов повышается в листьях *Pentaphylloides fruticosus* по сравнению с контрольными участками, у *Lonicera caerulea*, напротив, снижается. Установлена связь отношений элементов Fe/Mn, Ca/Sr, Cu/Zn, K/Rb с геохимическими и геофизическими особенностями среды и накоплением элементов разными видами растений. Отмечено, что исследуемые два вида кустарника в одинаковых условиях произрастания реагируют на изменения геохимических и геофизических характеристик среды по-разному.

Ключевые слова: *Pentaphylloides fruticosus*, *Lonicera caerulea*, элементный состав, геомагнитные аномалии, рентгенофлуоресцентный анализ с синхротронным излучением.

INVESTIGATION OF ELEMENT COMPOSITION OF PLANTS IN THE ZONE OF CRUSTAL HETEROGENEITIES

E.P. Khramova¹, I.G. Boyarskikh¹, O.V. Chankina², K.P. Koutzenogii²

¹Central Siberian Botanical Garden, SB RAS,
630090, Novosibirsk, Zolotodolinskaya str., 101, e-mail: khramova@ngs.ru, irina_2302@mail.ru

²Institute of Chemical Kinetics and Combustion, SB RAS,
630090, Novosibirsk, Institutskaya str., 3, e-mail: chankina@ns.kinetics.nsc.ru, koutsen@ns.kinetics.nsc.ru

X-ray fluorescence analysis using synchrotron radiation (SR XRF) was applied to determine element composition in the aboveground part of *Pentaphylloides fruticosus* (bush cinquefoil) and *Lonicera caerulea* subsp. *altaica* (Pall.) Gladkova (blue honeysuckle), growing in a highly seismic zone. The total content of microelements in *P. fruticosus* is higher than the control one, and in *L. caerulea* it is lower. It has been revealed that the ratio between separate elements undergo considerable changes. The Fe/Mn, Ca/Sr, Cu/Zn, and K/Rb ratios were observed to be violated for the plants of the anomalous zones. It is noticed that two kinds of a bush react to changes of geochemical and geophysical characteristics of environment differently.

Key words: *Pentaphylloides fruticosus* (bush cinquefoil), *Lonicera caerulea* (blue honeysuckle), element composition, crustal heterogeneities, X-ray fluorescence analysis with synchrotron radiation.

ВВЕДЕНИЕ

В зонах протекания активных геологических процессов возникают геофизические, атмо-, гидро- и педогеохимические аномалии, вызывающие у биоты широкий спектр ответных реакций. Они проявляются в виде изменений элементного и биохимического состава органов и тканей, в увеличении фенотипического и генетического полиморфизма и появлении тератных форм (Трифонов, 1999). Влияние разного рода аномалий в геологически активных зонах на биологические системы изучено недостаточно, что обусловлено сложностью проблемы: многофакторностью и слабостью воздействия разных внешних факторов на

живые организмы, неочевидностью причинно-следственных связей, отсутствием необходимого объема данных.

В Горном Алтае в районе Северо-Чуйского хребта на границе с Курайской межгорной котловиной магнитное поле участка в долине р. Ак-Туру, в целом, отражает особенности его геологического строения и характеризуется слабомагнитными свойствами, за исключением магнитных аномалий, которые имеют юго-западное простирание и связаны с зонами разломов (Boyarskikh, Shitov, 2010). Согласно исследованиям последних лет по активным тектоническим разло-

мам вместе с парогазовыми глубинными потоками на поверхность поступают не только уже известные глубинные газы, но и ионные гидратные формы практически всех элементов, которые лучше проникают в организмы и усваиваются ими (цит. по: Рустамбекова, Барабашкина, 2006). В связи с этим вероятность возникновения избытка или недостатка химических эле-

ментов, воздействующих на биоту, в геологически активных зонах увеличивается.

Цель настоящей работы заключалась в исследовании влияния геологической активности на элементный состав почвы и растений *Lonicera caerulea* и *Pentaphylloides fruticosa* с помощью метода РФА СИ.

МЕТОДИКА И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Участок проведения исследований расположен у подножия Северо-Чуйского хребта на границе Курайской межгорной котловины в долине р. Ак-Туру (Республика Алтай, Кош-Агачский р-н).

Сопряженный отбор почвенных (зона минерального питания) и растительных (листья) образцов проводился на трех микроучастках: в зоне магнитной аномалии (2020 м над ур. м.) и в двух точках с фоновым магнитным полем, принятыми за контроль (1994 и 2070 м над ур. м.). Эти микроучастки находятся на вырубке в лиственнично-кедровом лесу в сходных геоботанических условиях. Подробная характеристика геомагнитной обстановки участка приведена в работе (Boyarskikh, Slitov, 2010).

Объектами исследования были выбраны два вида растений – жимолость синяя (*Lonicera caerulea* subsp. *altaica* (Pall.) Gladkova) и пятилистник кустарниковый (*Pentaphylloides fruticosa* (L.) O. Schwarz), широко распространенные в растительных сообществах горных районов. Для анализа одновременно брали среднюю пробу почвы и листьев однолетних побегов примерно с 20–30 растений *P. fruticosa* в фазе цветения и *L. caerulea* в фазе созревания плодов с каждого участка. Навеску воздушно-сухого растительного сырья, а также почвы (1 г) измельчали в агатовой ступке. За-

тем образцы прессовали в форме таблетки диаметром ~1 см, массой – 30 мг (с поверхностной плотностью 0.04 г/см²). Элементы определяли методом рентгенофлуоресцентного анализа с использованием синхротронного излучения (РФА СИ) на станции элементного анализа в Институте ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН (накопитель ВЭПП-3). Для элементов с атомным номером $Z = 19-42$ энергия возбуждающего монохроматизированного излучения $E_{\text{мон}} = 23$ кэВ. Обработку эмиссионных спектров проводили по программе AXIL. Концентрацию элементов определяли с использованием метода “внешнего стандарта”. В качестве образцов сравнения применяли российские стандарты травозлаковой смеси ГСО СОРМ1 и байкальского ила БИЛ-1 (Арнаутов, 1990). Величина ошибки – воспроизводимость результатов анализа, полученная путем 15 параллельных измерений 3 одинаковых образцов, для большинства элементов в растительных образцах колеблется в основном в пределах 3–11 %, для никеля и циркония – 40 и 60 % соответственно и для почвенных образцов составляет 3–20 % в зависимости от элемента. Возможности метода РФА СИ, конструкция станции и измерительного комплекса даны в работе В.Б. Барышева с соавт. (Baryshev et al., 1991).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

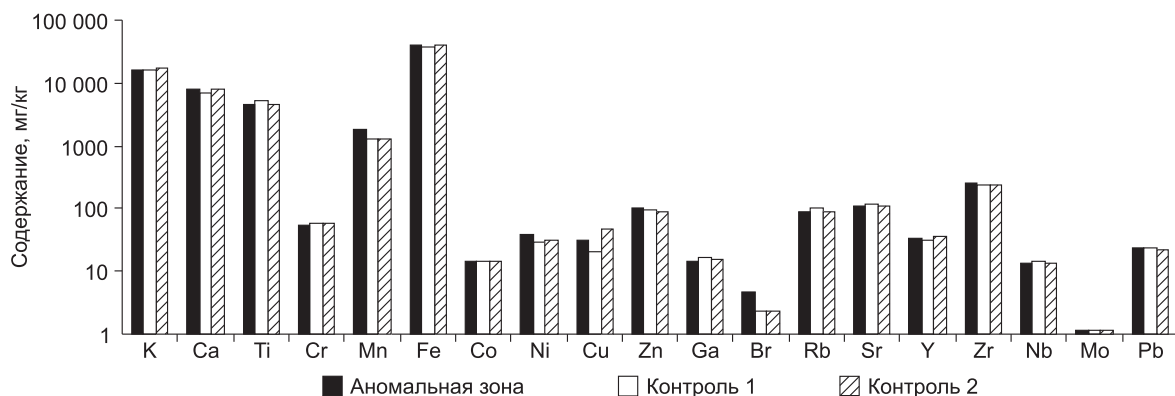
Общеизвестно, что одним из основных факторов, определяющих накопление элементов в растении, является их содержание в почве. Анализ полученных данных выявил сходство элементного состава почвы из аномального и двух контрольных участков (см. рисунок). Содержание рассмотренных химических элементов в почвенных образцах варьирует незначительно, что свидетельствует о том, что формирование изученных почв происходило на породах единого генезиса и минералогического состава. В почвах аномального участка отмечено незначительное повышение содержания Mn, Fe, Ni, Zr и, напротив, снижение концентрации K, Ga, Rb и Sr по сравнению с контрольными участками.

В таблице представлена информация по содержанию элементов в листьях пятилистника кустарникового и жимолости синей, собранных в зоне магнитной аномалии и двух контрольных участках в конце июля 2009 г. Как видно из таблицы, растения *P. fruticosa* и *L. caerulea* вне зависимости от места произрастания

содержат одинаковый набор элементов, но в разных количествах и соотношениях.

Отмечено, что содержание макроэлементов (Ca и K) в листьях пятилистника кустарникового снижается с увеличением высоты, тогда как у жимолости изменяется незначительно. Максимальное накопление микроэлементов обнаружено в листьях *P. fruticosa* из аномальной зоны, при этом в растениях из обоих контрольных участков содержание микроэлементов практически равнозначно. У жимолости синей наибольшее количество микроэлементов установлено в контроле 1, расположенном выше аномального участка, наименьшее – в контроле 2. Таким образом, можно заключить, что общее накопление элементов разными видами растений в геоактивной зоне различно.

По характеру изменений концентрации отдельных микроэлементов в зависимости от места произрастания виды *P. fruticosa* и *L. caerulea* имели существенные различия.



Содержание элементов в почве из аномальной зоны и контрольных участков 1, 2.

Содержание химических элементов в листьях *P. fruticosa* и *L. caerulea*, произрастающих в аномальной зоне разлома и контроле (K и Ca даны в мг/г, остальные элементы – в мг/кг сухого вещества)

| Элемент | <i>Pentaphylloides fruticosa</i> | | | <i>Lonicera caerulea</i> | | |
|-------------------------------|---|---------------------------------|---------------------------------|--------------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|
| | Аномальная зона <i>h</i> = 2020 м над ур. м. | Контроль 1 <i>h</i> = 2070 м | Контроль 2 <i>h</i> = 1994 м | Аномальная зона <i>h</i> = 2020 м | Контроль 1 <i>h</i> = 2070 м | Контроль 2 <i>h</i> = 1994 м |
| K | 10 ± 0.4 ¹ | 8 ± 0.3 | 11 ± 0.4 | 13 ± 0.5 | 13 ± 0.5 | 12 ± 0.5 |
| Ca | 7 ± 0.3 | 8 ± 0.3 | 10 ± 0.4 | 12 ± 0.5 | 11 ± 0.5 | 12 ± 0.5 |
| Br | 2.0 ± 0.08 | 0.9 ± 0.04 | 4 ± 0.14 | 0.5 ± 0.02 | 0.8 ± 0.03 | 0.4 ± 0.02 |
| Cu | 3.6 ± 0.2 | 4.3 ± 0.3 | 3.8 ± 0.2 | 4.1 ± 0.2 | 3.5 ± 0.2 | 4.4 ± 0.3 |
| Fe | 195 ± 10 | 278 ± 14 | 186 ± 9 | 88 ± 4 | 112 ± 6 | 83 ± 4 |
| Mn | 369 ± 11 | 108 ± 3 | 161 ± 5 | 195 ± 6 | 316 ± 9 | 188 ± 6 |
| Nb | 1.8 ± 0.5 | 1.9 ± 0.6 | 1.0 ± 0.3 | 0.9 ± 0.3 | 1.6 ± 0.5 | 0.5 ± 0.2 |
| Ni | 1.5 ± 0.6 | 1.1 ± 0.5 | 1.4 ± 0.6 | 1.3 ± 0.5 | 2.4 ± 1.0 | 1.7 ± 0.7 |
| Rb | 7.8 ± 0.3 | 7.5 ± 0.3 | 13.5 ± 0.5 | 6.4 ± 0.3 | 6.8 ± 0.3 | 2.4 ± 0.1 |
| Sr | 31 ± 1 | 41 ± 2 | 68 ± 3 | 63 ± 2 | 51 ± 2 | 60 ± 2 |
| Ti | 15 ± 2 | 15 ± 2 | 17 ± 2 | 7 ± 1 | 8 ± 1 | 9 ± 1 |
| Y | 1.4 ± 0.11 | 0.3 ± 0.02 | 0.5 ± 0.04 | Н.о. ² | 0.4 ± 0.03 | Н.о. |
| Zn | 26 ± 1 | 19 ± 1 | 27 ± 1 | 22 ± 1 | 20 ± 1 | 22 ± 1 |
| Zr | 3.3 ± 2.0 | 7.8 ± 4.7 | 3.7 ± 2.2 | 1.3 ± 0.8 | 16.0 ± 9.6 | 1.1 ± 0.7 |
| Сумма макроэлементов (K + Ca) | 17 | 16 | 21 | 25 | 24 | 24 |
| Сумма микроэлементов | 658 | 484 | 487 | 383 | 538 | 372 |

¹ Среднее значение ± стандартное отклонение.

² Н.о. – концентрация элемента ниже предела обнаружения (0.1 мг/кг).

Так, наибольшее содержание Mn, Ni и Y обнаружено в листьях пятилистника кустарникового из аномальной зоны; у жимолости синей, напротив, эти же элементы в максимальных концентрациях отмечены на контрольном участке 1. Такая же картина наблюдается и в случае с наименьшим накоплением элементов – минимум Ca, Cu и Sr в листьях *P. fruticosa* установлен в аномальной зоне, у *L. caerulea* – на контрольном участке 1.

Ранее отмечалось, что содержание меди в растениях пятилистника кустарникового, произрастающего в Горном Алтае, повышается по мере увеличения высоты над уровнем моря (Храмова и др., 2000). Из полученных данных видно, что концентрация Cu в листьях *P. fruticosa* из участков, расположенных на разной высоте над уровнем моря, изменяется нелинейно. Наибольшее содержание меди (4.3 мг/кг) обнаружено в листьях *P. fruticosa* из контрольного участка 1 (2070 м над ур. м.), наименьшее (3.6 мг/кг) – в аномаль-

ной зоне, которая находится выше по сравнению с контролем 2 (2020 и 1994 м над ур. м. соответственно).

Концентрация цинка в листьях пятилистника кустарникового с повышением высоты местообитания снижается, а у жимолости синей находится практически на одном уровне.

Содержание стронция в листьях *P. fruticosa* минимально (31 мг/кг) в аномальной зоне и, напротив, максимально – у *L. caerulea* (63 мг/кг) по сравнению с контрольными участками.

Определенный интерес вызывает содержание Rb в растениях. В листьях *P. fruticosa* и *L. caerulea* из аномальной зоны оно практически равнозначно контролю 1 (7.8 и 7.5 мг/кг; 6.4 и 6.8 мг/кг соответственно), тогда как в контроле 2 у пятилистника кустарникового его концентрация возрастает в 1.7 раза; у жимолости синей, напротив, падает в 2.7 раза.

Наилучшим образом, на наш взгляд, о неблагоприятных условиях произрастания растений свиде-

тельствуют сдвиги в соотношениях между элементами (Кабата-Пендиас А., Пендиас Х., 1989; Ильин, Сысо, 2001; Larsson, Helmisaari, 1998; Blum et al., 2000).

Известно, что Fe и Mn взаимосвязаны в метаболических процессах, происходящих в растениях, а отношение между ними имеет важное физиологическое значение (Кабата-Пендиас А., Пендиас Х., 1989; Ильин, Сысо, 2001). Для нормального развития растений его значение должно быть в пределах 1.5–2.5 (Кабата-Пендиас А., Пендиас Х., 1989). По нашим результатам, в листьях *P. fruticosa* контрольных участков 1 и 2 значение Fe/Mn равно 1.2 и 2.6 соответственно, тогда как в аномальной зоне – 0.5, что свидетельствует о нарушении в поступлении Fe в листья растения. Скорее всего, сдвиг в соотношении Fe/Mn в пользу марганца в листьях пятилистника кустарникового связан с его повышенным содержанием в почве аномального участка, а также с режимом увлажнения на исследуемом участке. Для жимолости синей вне зависимости от места обитания величина соотношения Fe/Mn составила 0.4–0.5, что также говорит о нарушении поступления железа в растение.

Взаимодействие между Sr и Ca весьма сложно: эти элементы могут конкурировать между собой, но Sr обычно не может замещать Ca в его биохимических функциях (Кабата-Пендиас А., Пендиас Х., 1989). Отношение Ca/Sr является довольно постоянной величиной, но имеет тенденцию к повышению при пере-

ходе к более высокому уровню биогеохимической пищевой цепи, например, почва–растение (Blum et al., 2000). По нашим данным следует, что отношение Ca/Sr в почве аномального участка составляет 75, в листьях пятилистника кустарникового – 215, жимолости синей – 191. В почве из контрольных участков 1 и 2 величина отношения Ca/Sr равняется 61 и 70 соответственно, в листьях растений *P. fruticosa* – 198 и 153, *L. caerulea* – 221 и 210. Отмечено, что в аномальной зоне значение соотношения Ca/Sr максимально для пятилистника кустарникового и минимально для жимолости синей.

Из литературных данных известно, что для древесных растений из более загрязненной местности величина отношения K/Rb в 2 раза больше и остается постоянной для отдельной особи (Larsson, Helmisaari, 1998). Из наших результатов следует, что для пятилистника кустарникового из аномальной зоны значение отношения K/Rb в 1.2–1.6 раза выше по сравнению с контрольными участками 1 и 2 соответственно. Для жимолости синей из аномального участка, напротив, величина отношения K/Rb в 2,5 раза ниже по сравнению с контролем 2.

Наблюдается снижение отношения Cu/Zn в листьях аномальных растений *P. fruticosa* в 2 раза по сравнению с контролем 1, что также может быть интерпретировано как следствие неблагоприятных условий произрастания.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате исследования получены достоверные данные о содержании элементов у растений *Pentaphylloides fruticosa* и *Lonicera caerulea*, совместно произрастающих на микроучастке в зоне геологической неоднородности.

Обнаружено, что в геологически активной зоне в растениях пятилистника кустарникового возрастает общее содержание микроэлементов по сравнению с контрольными, отмечено увеличение концентрации Mn и Y и уменьшение Ca, Cu и Sr в образцах из ано-

мальной зоны. У жимолости синей наблюдается обратная зависимость.

Установлена связь между условиями произрастания двух видов кустарников и отношениями содержания элементов Fe/Mn, Ca/Sr, Cu/Zn и K/Rb, что может быть использовано как фитоиндикатор изменения геохимических и геофизических характеристик среды.

Показано на примере *P. fruticosa* и *L. caerulea*, что ответная реакция на изменение геохимических и геофизических характеристик среды у разных видов кустарника различна.

ЛИТЕРАТУРА

- Арнаутов Н.А. Стандартные образцы химического состава природных минеральных веществ: Метод. рекомендации. Новосибирск, 1990. 220 с.
- Ильин В.Б., Сысо А.И. Микроэлементы и тяжелые металлы в почвах и растениях Новосибирской области. Новосибирск, 2001. 228 с.
- Кабата-Пендиас А., Пендиас Х. Микроэлементы в почвах и растениях. М., 1989. 439 с.
- Рустамбекова С.А., Барабошкина Т.А. Микроэлементозы и факторы экологического риска. М., 2006. 109 с.
- Трифонов В.Г. Активная тектоника и геоэкология // Проблемы геодинамики литосферы. М., 1999. С. 44–62.
- Храмова Е.П., Куценогий К.П., Шкель Н.М., Ковальская Г.А., Чанкина О.В. Элементный состав *Pentaphylloides fruticosa* (L.) O. Schwarz, произрастающего в Горном Алтае // Раст. ресурсы. 2000. Вып. 4. С. 59–67.
- Baryshev V.B., Kulipanov G.N., Scrinский A.N. Handbook of Synchrotron Radiation. Amsterdam, 1991. V. 3. P. 639.
- Blum J.D., Taliaferro E.H., Weisse M.T., Holmes R.T. Changes in Sr/Ca, Ba/Ca and ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr ratios between trophic levels in two forest ecosystems in the northeastern U.S.A. // Biogeochemistry. 2000. V. 49. P. 87–101.
- Boyarskikh I.G., Shitov A.V. Intraspecific Variability of Plants: The Impact of Active Local Faults // Man. and the Geosphere. N.Y., 2010. P. 145–167.
- Larsson C., Helmisaari H.S. Accumulation of elements in the annual rings of Scots pine trees in the vicinity of a copper-nickel smelter measured by scanning EDXRF // X-ray Spectrometry. 1998. V. 27. P. 133–139.