

Сера в листьях 7 видов растений в окрестностях медно-никелевого предприятия, Кольский полуостров

Кашулина Г.М., Литвинова Т.И., Коробейникова Н.М.

Полярно-альпийский ботанический сад-институт КНЦ РАН, Апатиты, galina.kashulina@gmail.com

Аннотация. В статье анализируются результаты определения серы в листьях 7 видов растений: черники (*Vaccinium myrtillus*), брусники (*Vaccinium vitis-idaea*), вороники (*Empetrum hermaphroditum*), березы (*Betula sp.*), ивы (*Salix sp.*), сосны (*Pinus friesiana*) и ели (*Picea obovata*), произрастающих около крупнейшего на Севере Европы источника выбросов SO₂ и тяжелых металлов. Исследования показали, что, несмотря на стресс и избыток серы в окружающей среде, ее концентрации в листьях в большинстве образцов всех видов растений около источника выбросов остаются в пределах естественного варьирования. Однако сравнительный анализ частотного распределения свидетельствуют о том, что концентрации S в золе листьев растений около источника выбросов могут быть, как незначительно повышены (ель, береза, ива, сосна), так и понижены (вороника, брусника, черника) относительно фона. При этом направленность и степень изменения являются вид специфичными и зависят не только от уровня загрязнения, но и уровня плодородия почв экотопа.

Ключевые слова: листья растений, зольный анализ, сера, экстремальное загрязнение, медно-никелевое предприятие.

Sulphur in leaves of 7 plant species in surroundings of the copper-nickel industrial complex, Kola Peninsula

Kashulina G., Litvinova T., Korobeinikova N.

Polar-Alpine Botanical Garden-Institute KSC RAS, Apatity, galina.kashulina@gmail.com

Abstract. The paper studies results of estimated sulphur concentrations in leaves of 7 plant species: birch – *Betula sp.*, willow – *Salix sp.*, spruce – *Picea obovata*, pine – *Pinus friesiana*, blueberry – *Vaccinium myrtillus*, crowberry – *Empetrum hermaphroditum* and cowberry – *Vaccinium vitis-idaea* nearby the Northern Europe's largest SO₂ and heavy metals emission source. The study has shown that, in spite of stress and sulphur excess in the environment, S concentrations in leaves in most samples of all plant species near the source of emissions remain within a natural variation range. However, the comparative analysis of frequency distribution suggests that the concentration of S in ash of plants leaves around the emission source may be both slightly higher (birch, willow, spruce and pine) and lower (blueberry, cowberry and crowberry) regarding the background. The reaction depends on plant species, level of pollution, and soil fertility.

Key words: plant leaves, ash analysis, sulphur, extreme pollution, copper-nickel industrial complex.

Введение

Как и все живые организмы, растения в процессе жизнедеятельности активно регулируют свой химический состав. Потребление элементов растениями является вид специфичным и генетически обусловленным. Однако конкретные условия произрастания – климат местности, плодородие почв, увлажнение и метеорологические особенности вегетационного сезона также способны оказывать влияние на химический состав растений, обуславливая довольно широкое варьирование концентраций элементов в растениях в естественных условиях. Выбросы промышленных предприятий могут значительно изменить условия произрастания растения. Так, в результате длительного воздействия выбросов медно-никелевого комбината «Североникель» – крупнейшего на севере Европы источника выбросов SO₂ и тяжелых металлов – условия для роста растений в его окрестностях стали экстремальными: в атмосфере значительно повышены концентрации SO₂ и техногенной пыли с высоким содержанием тяжелых металлов (Kashulina et al., 2014), концентрации основных металлов загрязнителей Ni и Cu в почвах в тысячу и более раз превысили фоновые значения (Reimann et al., 2001; Кашулина, 2018). Изучение растений, произрастающих в локальной зоне (ЛЗ) воздействия выбросов этого предприятия, предоставляет уникальную возможность выявить особенности формирования химического состава растений в экстремальных условиях.

Самые общие черты изменения химического состава листьев растений в ближайших окрестностях предприятия на основе комплексного почвенно-геоботанического мониторинга уже были обсуждены в предыдущей публикации (Кашулина и др., 2018). В данной статье более подробно анализируется распределение концентраций S в золе листьев растений. Особый интерес к этому элементу обусловлен тем обстоятельством, что с одной стороны этот элемент является важным для питания растений элементом, а с другой, – основным компонентом выбросов комбината «Североникель», концентрации соединений которой, как в атмосфере, так и в атмосферных осадках (Kashulina et al., 2014) ЛЗ значительно повышены.

Материалы и методы исследований

Площадки мониторинга располагались на разных элементах ландшафта на расстоянии 1–17 км от комбината «Североникель» (Кашулина, 2018; Кашулина и др., 2018). Смешанные образцы ассимилирующих органов 7 наиболее распространенных видов растений — черники (*Vaccinium myrtillus*), брусники (*Vaccinium vitis-idaea*), вороники (*Empetrum hermaphroditum*), березы (*Betula* sp.), ивы (*Salix* sp.), сосны (*Pinus friesiana*) и ели (*Picea obovata*) отбирались в конце вегетационного периода в 20-х числах августа 2002, 2005–2014 гг. У листопадных растений (береза, ива, черника) отбирались листья, у сосны и ели — хвоя второго года жизни, у вечнозеленых кустарничков (брусника, вороника) — листья с 2–3-летних побегов.

Содержание S в растениях были определены по методике А.А. Поповцевой (1974). Этим методом извлекаются только элементы, входящие в состав органического вещества растений. В качестве фоновых значений использовались компилированные данные предшествующих исследований в нарушенных экосистемах Кольского полуострова и Карелии (Кашулина и др., 2018). Значимость различий по содержанию S в ассимилирующих органах растений на мониторинговых площадках и фоновых условиях оценивали с помощью U-критерия Манна — Уитни (http://www.psychol_ok.ru/statistics/mann_whitney).

Результаты и их обсуждение

В отличие от основных металлов-загрязнителей – Ni и Cu, а также таких важных питательных элемента как Ca и Mn, влияние загрязнения на содержание S в листьях растений ЛЗ воздействия комбината «Североникель» не является столь очевидным. Это обусловлено тем, что различные виды растений именно по S значительно различаются по реакции на стресс и избыток серы в окружающей среде ЛЗ. Так, согласно соотношениям ЛЗ/Фон (табл. 1), уровни концентраций S в листьях березы, в целом, остаются на фоновом уровне. Об отсутствии значительных изменений концентраций S в листьях березы ЛЗ свидетельствует и распределение величин по квартилям: величины достаточно равномерно представляют все диапазоны естественного варьирования концентраций. Расчеты U-критерия Манна-Уитни для всего набора данных, представляющих ЛЗ, также подтвердили отсутствие значимых различий по концентрациям S в листьях березы между ЛЗ и фоном.

Соотношение ЛЗ/Фон для сосны и особенно ели, наоборот, свидетельствует о том, что концентрации S в хвое этих растений в ЛЗ повышены относительно фона. О повышении концентраций S в хвое сосны и ели свидетельствуют и распределение величин по квартилям. Например, для сосны большая часть величин (62 %) располагается в диапазоне между медианой и Q3, т.е., в области высоких значений, свойственных фоновым условиям. А в одном образце хвои сосны концентрация S даже превышает фоновый максимум. Для ели у 66.6 % образцов концентрации находятся в диапазоне между медианой и максимумом фона, а в 4-ех образцах (26.7 %) превышают фоновый максимум.

Согласно соотношениям ЛЗ/Фон у вороники и особенно у брусники концентрации S в листьях в ЛЗ снижены относительно фона. Распределение величин по квартилям также свидетельствует о снижении концентраций S в листьях вороники: повышается доля образцов (до 55 %) в диапазоне между минимумом и Q1 и снижена до 14 % в области высоких значений между Q3 и максимумом фона. Вместе с тем, в одном образце листьев вороники концентрация S превышает фоновый максимум. Это означает, что концентрация S в листьях вороники ЛЗ может не только снижаться, но и повышаться.

Из-за небольшого числа образцов (табл. 1) заключение о влиянии загрязнения на концентрации S в листьях брусники и черники могут рассматриваться как самые предварительные. Как и для листьев вороники, для листьев брусники соотношение концентраций S в ЛЗ к фону составляет ниже единицы. В большей части образцов (в 3 из 5) концентрации S в листьях вороники приходится на самый низкий диапазон фоновых концентраций – между минимумом и Q1, но в 1 образце – превышает фоновый максимум. Т.е., также как и для вороники, концентрации S в золе листьев брусники в ЛЗ могут быть не только понижены, но и повышены.

Таблица 1. Минимум, первый квартиль (Q1), медиана, третий квартиль (Q3) и максимум концентраций (мг/кг, сухих листьев) S в золе листьев растений в локальной зоне (ЛЗ) воздействия медно-никелевого комбината «Североникель» и фоновых условиях (Фон), а также соотношения минимума и максимума и ЛЗ/Фон.

Table 1. Minimum, the first quartile (Q1), median, the third quartile (Q3) and maximum of S concentrations (mg/kg of dry leaves) in the ash of plant leaves near the «Severonikel» industrial complex and in the background area, as well as max/min and local zone/background ratios.

	N	Минимум	Q1	Медиана	Q3	Максимум	Макс/Мин	ЛЗ/Фон
<i>Береза</i>								
ЛЗ	48	276	439	634	858	1720	6.2	1.09
Фон	21	40	460	580	775	1300	32.5	
<i>Ива</i>								
ЛЗ	26	972	1341	1966	2310	3668	3.8	–
ФОН	3	400	400	690	740	740	–	–
<i>Сосна</i>								
ЛЗ	47	160	272	360	436	1148	7.2	1.20
ФОН	29	100	200	300	500	900	9	
<i>Ель</i>								
ЛЗ	15	536	648	860	1140	1376	2.6	1.59
ФОН	35	200	370	540	710	1100	5.5	
<i>Вороника</i>								
ЛЗ	36	192	354	496	675	1720	9.0	0.79
ФОН	12	200	592.5	630	722.5	940	4.7	
<i>Брусника</i>								
ЛЗ	5	428	478	640	1574	2112	4.9	0.52
ФОН	19	400	1000	1230	1470	1900	4.8	
<i>Черника</i>								
ЛЗ	6	596	761	1080	1389	1500	2.5	0.94
ФОН	16	400	1005	1155	1435	1700	4.3	

Судя по соотношению ЛЗ/Фон, концентрации S в листьях черники остаются на близком к фону уровне. О некотором ее снижении свидетельствует распределение величин по квартилям: 50 % значений (3 из 6) располагаются между минимумом и Q1 фона. Некоторое снижение концентраций S в листьях кустарничков в ЛЗ могут быть обусловлены их более сильно угнетенным состоянием. В отличие от древесных растений, обилие кустарничков на площадках мониторинга продолжает сокращаться, несмотря на снижение объемов выбросов загрязняющих веществ предприятием.

Расчёты U-критерия Манна-Уитни, однако, для всего набора данных, не выявили значимых изменений концентраций S в листьях всех видов растений по сравнению с фоном. Т.е., отмеченные выше изменения не являются существенными, а носят характер лишь небольшого сдвига концентраций в ту или иную сторону в зависимости от вида растений.

Дополнительную информацию о направленности изменений содержаний S в растениях ЛЗ может дать анализ распределения ее концентраций по площадкам мониторинга, которые значительно различаются, как по природным условиям (плодородию почв и увлажнению), так и по уровню загрязнения (Kashulina et al., 2014; Кашулина, 2018).

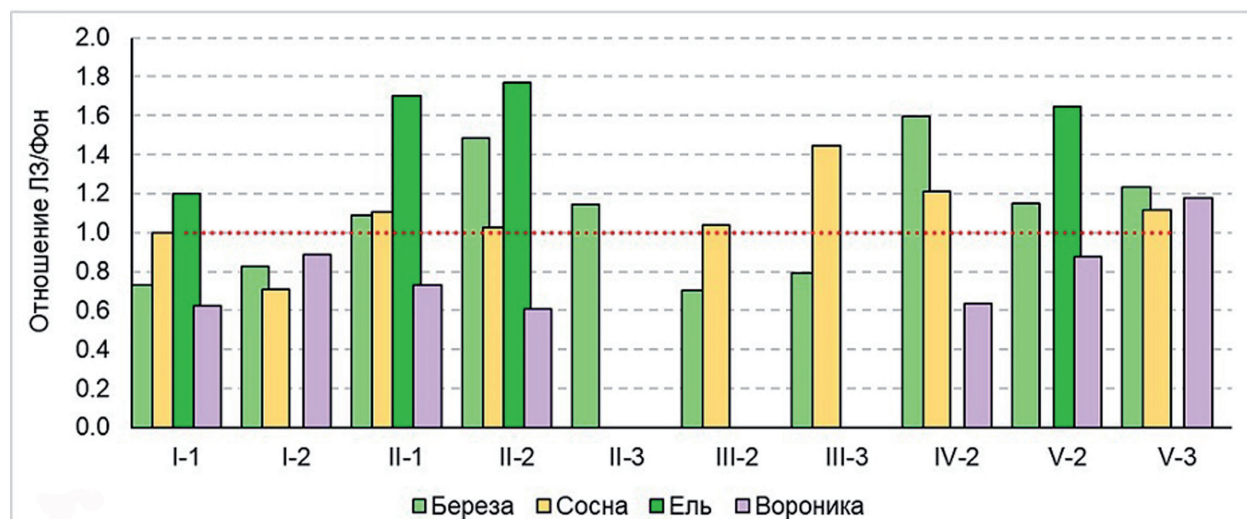


Рис. 1. Отношения медиан концентраций S в листьях растений на площадках мониторинга в локальной зоне (ЛЗ) воздействия комбината «Североникель» и в фоновых условиях (Фон).

Fig. 1. The ratio of median concentrations of S in plant leaves at monitoring plots near the «Severonikel» industrial complex to background values.

Как видно на рис. 1, величины отношения медиан концентраций S в растениях на отдельных площадках мониторинга к фону зависят от вида растений и площадки. Для листьев березы в зависимости от площадки наблюдается, как незначительное обеднение, так и повышение концентрации относительно фона. Ниже фоновых концентраций S в листьях березы были обнаружены на самых удаленных площадках I-1 и I-2 (17 км от источника выбросов), а также пл. III-2 и III-3 (8 км на ССЗ от источника). Наиболее значительное повышение концентраций S в листьях березы пришлось на самую загрязнённую пл. IV-2 (3 км от источника выбросов). Единственное превышающее фоновый максимум значение (1720 мг/кг) было обнаружено как раз на этой площадке в 2011 году. На удалении 8 км на север концентрации S были незначительно повышены только на пл. II-2. На всех наиболее загрязнённых площадках – IV-2, II-1 и II-2 некоторые листья в конце вегетационного периода имели следы ожога SO₂.

Однако объяснить такое распределение концентраций S в листьях березы между площадками мониторинга только за счет различий по уровню загрязнения было бы не совсем корректно. Если бы распределение концентраций S в листьях березы было бы связано только с загрязнением, то на наиболее удаленных пл. I-1, I-2, III-2 и III-3 следовало бы ожидать близкие к фону концентрации. Снижение концентраций ниже фона на этих площадках, возможно, обусловлены низким естественным плодородием почв и сухостью местообитания и их ухудшением под воздействием техногенного фактора. Более близкие к фону концентрации S пришлось на пл. V-2 и V-3, которые характеризуются средним уровнем загрязнения и высоким естественным плодородием почв и хорошим увлажнением. Об отсутствии четкой связи концентраций S в растениях с загрязнением свидетельствуют и близкие к фону концентрации на второй по уровню загрязнения пл. II-1. Расчеты U-критерия Манна-Уитни выявили значимое увеличение концентрации S в листьях березы только для самой загрязнённой площадки IV-2. Для остальных площадок, ни снижение, ни повышение относительно фона не было значимым.

Для сосны на большинстве площадок концентрация S в хвое была близка к фону. Незначительное снижение было отмечено на самой удаленной площадке I-2, где дополнительным стресс-фактором могло быть сезонное избыточное увлажнение. На самой загрязнённой площадке IV-2 было отмечено лишь незначительное повышение. U-критерий Манна-Уитни не выявил значимых различий концентраций S в хвое сосны от фона ни для одной площадки мониторинга, независимо от уровня ее загрязнения.

Концентрация S в хвое ели на всех площадках была выше, чем в фоновых условиях. Расчеты *U*-критерия Манна-Уитни выявили значимое увеличение относительно фона только для площадки V-2, характеризующейся сочетанием среднего уровня загрязнения, высоким плодородием почв и хорошим увлажнением. Ель на этой площадке характеризовалась лучшим по сравнению с остальными площадками жизненным состоянием.

Наоборот, концентрации S в листьях вороники снижены на всех площадках, кроме площадки V-3. При этом одинаковое снижение было отмечено и на самой удаленной площадке I-1, и на самой загрязненной площадке IV-2. На обеих этих площадках жизненное состояние вороники оценивается как очень угнетенное. Некоторое повышение концентрации S в воронике на площадке V-3, наоборот, соответствуют ее лучшему здесь состоянию. *U*-критерий Манна-Уитни не выявил значимых изменений концентраций S в листьях вороники относительно фона ни для одной площадки, независимо от уровня ее загрязнения и жизненного состояния вороники.

Заключение

Исследования показали, что, несмотря на стресс и избыток серы в окружающей среде, концентрации S в листьях в большинстве образцов всех видов растений в окрестностях медно-никелевого предприятия остаются в пределах естественного варьирования, свойственного ненарушенным экосистемам в регионе. Однако сравнительный анализ частотного распределения концентраций S свидетельствует о том, что концентрации S в листьях растений около источника выбросов могут быть, как незначительно повышены (ель, береза, ива, сосна), так и понижены (вороника, брусника, черника) относительно фона. При этом направленность и степень изменения являются вид специфичными и зависят не только от уровня загрязнения, но и от условий увлажнения и плодородия почв в месте произрастания.

Литература

1. Кашулина Г.М. Мониторинг загрязнения почв тяжелыми металлами в окрестностях медно-никелевого предприятия на Кольском полуострове // Почвоведение. 2018. №4. С. 493–505.
2. Кашулина Г.М., Литвинова Т.И., Коробейникова Н.М. Особенности формирования химического состава ассимилирующих органов растений в условиях экстремального загрязнения выбросами медно-никелевого предприятия // Вестник Кольского научного центра РАН. 2018. № 4 (10). С. 19–24.
3. Поповцева А.А. Методическое руководство по ускоренному анализу золы растений. Сыктывкар: Изд-во: Коми филиала АН СССР. 1974. 83 с.
4. Kashulina G., de Caritat P., Reimann C. Snow and rain chemistry around the «Severonikel» industrial complex, NW Russia: Current status and retrospective analysis // Atmospheric Environment. 2014. V. 89. P. 672–682.
5. Reimann, C., Koller, F., Kashulina, G., Niskavaara, H. and Englmaier, P. Influence of extreme pollution on the inorganic chemical composition of some plants // Environmental Pollution. 2001. V. 115. P. 239–252.