

СОДЕРЖАНИЕ И РАСПРЕДЕЛЕНИЕ БОРА В ПОЧВАХ И РАСТЕНИЯХ ГЕОХИМИЧЕСКИ СОПРЯЖЕННЫХ ЛАНДШАФТОВ ЛЕСОСТЕПИ ИШИМ-ИРТЫШСКОГО МЕЖДУРЕЧЬЯ

Азаренко Ю.А.

ФГБОУ ВО Омский ГАУ, Омск, e-mail: azarenko.omgau@mail.ru

Представлены данные о содержании подвижного бора и легкорастворимых солей в почвах геохимически сопряженных ландшафтов гривно-приболотного комплекса лесостепи Ишим-Иртышской равнины Омской области. Лугово-черноземные почвы элювиальных и трансэлювиальных ландшафтов характеризовались отсутствием засоления и нормальным содержанием бора (1,0–2,1 мг/кг в гумусовых горизонтах). В почвах трансаккумулятивных ландшафтов (луговой карбонатной, солонце черноземно-луговом, лугово-болотной перегнойной) содержание солей возрастало до средней степени засоления, концентрации бора достигали избыточного для растений уровня: от 4,1–10 мг/кг в верхних горизонтах до 11,1–14,3 мг/кг в срединных и нижних горизонтах. Установлена корреляционная зависимость между содержанием в почвах подвижного бора и легкорастворимых солей ($r = 0,56 \pm 0,14$, $n = 26$) и pH ($0,69 \pm 0,13$). Содержание бора в растениях зависело от их биологических особенностей. Концентрации элемента в растениях семейств *Fabaceae*, *Asteraceae*, *Scrophulariaceae*, *Rubiaceae* составляли 39–47,8 мг/кг, *Poaceae* – 0,35–6,9 мг/кг. Концентрации элемента в растениях в фазу цветения, колошения на почвах с борным засолением не превышали ориентировочно допустимый уровень бора в растительном корме. Соотношение Ca:B в растениях не достигали токсического уровня и составляли 381–2000 в органах культур семейства мятликовые и 171,8–318,3 в растениях других семейств.

Ключевые слова: бор, почвы, растения, легкорастворимые соли, геохимически сопряженные ландшафты.

CONTENT AND DISTRIBUTION OF BORON IN SOILS AND PLANTS OF GEOCHEMICALLY CONNECTED LANDSCAPES OF FOREST-STEPPE ISHIM-IRTYSH INTERFLUVE

Azarenko Yu.A.

Omsk State Agrarian University named after P.A. Stolypin (Omsk SAU), Omsk, e-mail: azarenko.omgau@mail.ru

Data on the content of mobile boron and readily soluble salts in soils of geochemically connected landscapes of the complex of the forest-steppe Ishim-Irtysh plain of the Omsk Region are presented. Meadow-chnozem soils of eluvial and trans-eluvial landscapes were characterized by a lack of salinity and a normal boron content (1,0–2,1 mg/kg in humus horizons). In soils of trans-accumulative landscapes (meadow carbonate, solonetz chernozem-meadow, meadow-marsh humus), the salt content increased to an average degree of salinity, the boron concentration reached an excess level for plants: from 4,1–10 mg/kg in the upper horizons, to 11, 1–14,3 mg /kg in the middle and lower horizons. Correlation dependence between the content of mobile boron and readily soluble salts ($r = 0,56 \pm 0,14$, $n = 26$) and pH ($0,69 \pm 0,13$) was established in the soils. The content of boron in plants depended on their biological characteristics. Element concentrations in the plants of families of *Fabaceae*, *Asteraceae*, *Scrophulariaceae*, *Rubiaceae* were 39–47,8 mg/kg, *Poaceae* – 0,35–6,9 mg/kg. The concentrations of the element in the plants during the flowering phase, the earings on soils with boric salinity did not exceed the estimated allowable level of boron in the plant food. The ratio of Ca: B in plants did not reach the toxic level and amounted to 381–2000 in the organs of the family *Poaceae* and 171,8–318,3 in the plants of other families.

Keywords: boron, soils, plants, easily soluble salts, geochemically connected landscapes.

Химический элемент бор относится к числу жизненно необходимых микроэлементов, участвующих в выполнении важных физиологических функций в организме растений, животных и человека. Источником поступления бора в пищевые цепи является почва. Как дефицит, так и избыток элемента в ней оказывает неблагоприятное влияние на живые организмы. При этом содержание бора в почвенном покрове разных регионов очень

контрастное, что связано с геохимическими особенностями элемента, в первую очередь с довольно высокой растворимостью ряда его соединений [1-4].

Юг Западной Сибири представляет территорию с высоким содержанием бора в почвах и других компонентах ландшафта [5,6]. Наиболее высокие концентрации подвижной формы элемента (4,7–34 мг/кг) находятся в засоленных и солонцовых почвах, широко распространенных в почвенном покрове региона [7,8]. Это создает опасность повышенного поступления бора в растения, проявления эндемических заболеваний животных, снижения урожая и качества сельскохозяйственных культур. В связи с актуальностью проблемы борного засоления почв на юге Западной Сибири возникает необходимость более детального изучения содержания и распределения элемента в компонентах типичных ландшафтов, связанных в единую геохимическую систему.

Целью наших исследований явилось установление закономерностей распределения концентраций бора в почвах и растениях геохимически сопряженных ландшафтов ключевого участка Ишим-Иртышского междуречья.

Объекты и методы исследования

Исследования проводили на территории Малиновского стационара (с. Малиновка Тюкалинского района Омской области), расположенного в центральной лесостепи Ишим-Иртышской неогеновой озерно-аллювиальной равнины. Объектом исследования являлись почвы сопряженных элементарных геохимических ландшафтов (ЭГЛ), расположенных по линии профиля от вершины гривного повышения через ее склон до приболотного понижения и болота.

Почвенно-геохимическая катена в пределах элементов рельефа грива – склон гривы – приболотное понижение включала сопряженный ряд почв разной степени гидроморфности, засоления и осолонцевания. На плоской поверхности гривы (элювиальный ЭГЛ) сформировалась лугово-черноземная маломощная среднегумусовая почва. Трансэлювиальные позиции ландшафта также заняты лугово-черноземными почвами: среднемощной среднегумусовой в верхней части и солонцеватой маломощной среднегумусовой в средней части склона. Нижнюю треть склона занимают черноземно-луговая карбонатная среднемощная почва и солонец черноземно-луговой сульфатно-содовый натриевый слабозасоленный мелкий малонатриевый столбчатый (трансаккумулятивный ЭГЛ). Супераккумулятивный ЭГЛ, расположенный в приболотном понижении, представлен лугово-болотной перегнойной почвой. Все почвы имели тяжелосуглинистый гранулометрический состав. Лугово-черноземные почвы и черноземно-луговая почва склона гривы были распаханы, остальные почвы находились в целинном состоянии.

На перечисленных формах рельефа закладывали разрезы, полуямы и прикопки, из которых отбирали образцы по генетическим горизонтам почв. Одновременно отбирали пробы растений, а также грунтовых вод из скважин. В почвенных образцах определяли солевой состав водной вытяжки, рН водной суспензии потенциометрическим методом, подвижный бор по Бергеру и Труогу в модификации ЦИНАО колориметрическим методом с азометином-Н. В растительных образцах бор определяли аналогично после сухого озоления при температуре 550 °С, кальций трилонометрическим методом с флуорексоном.

Результаты исследований и их обсуждение

В результате исследований было установлено, что рельеф играет существенную роль в формировании почв ключевого участка стационара, в частности, влияет на распределение солей и бора в почвах. Почвы, расположенные в разных ЭГЛ, имели неодинаковые свойства и режимы. Содержание гумуса изменялось от 6,99–8,30 % в лугово-черноземных почвах до 4,82 % в черноземно-луговой. В лугово-болотной перегнойной почве содержание углерода органического вещества составляло 17,37 %.

Лугово-черноземная почва элювиального ЭГЛ имела нейтральную или близкую к нейтральной реакцию среды в верхних горизонтах, изменяющуюся в карбонатных срединных горизонтах и почвообразующей породе на щелочную. Весь почвенный профиль характеризовался отсутствием засоления легкорастворимыми солями (табл. 1). Содержание подвижного бора в верхнем гумусово-аккумулятивном горизонте почвы высокое (1,7–1,9 мг/кг) и в целом не отличалось от черноземных почв юга Западной Сибири [5,8]. В нижней части почвенного профиля аккумуляция соединений микроэлемента усиливалась, концентрация его достигала уровня борного засоления. Распределение подвижного бора по профилю почвы контрастное, коэффициент радиальной дифференциации R, рассчитанный как отношение содержания элемента в генетическом горизонте к содержанию его в почвообразующей породе, изменяется в пределах от 0,22–0,25 в верхних горизонтах до 0,52–0,55 в нижней части горизонтов В.

Профиль пахотных лугово-черноземных почв трансэлювиальных ЭГЛ отличался отсутствием солей до горизонтов В₁, В₂. Уровень содержания бора в почвах различался. В лугово-черноземной почве верхней трети склона гривы при содержании элемента в пахотном горизонте, близком к почве элювиального ЭГЛ, отмечалось снижение концентраций элемента в горизонтах АВ и В в 1,6–2,1 раза за счет процессов элювиального выноса, а также латерального переноса вещества вниз по склону. В лугово-черноземной почве нижней трети склона, напротив, проявлялись процессы аккумуляции соединений элемента, в результате чего концентрация бора с верхнего горизонта значительно увеличивалась.

Таблица 1

Содержание легкорастворимых солей и подвижного бора в почвах геохимически сопряженных ландшафтов Малиновского стационара Тюкалинского района Омской области

Горизонт	Глубина, см	pH	Сумма солей, %	Тип и степень засоления	Бор, мг/кг
Лугово-черноземная почва (элювиальный ЭГЛ)					
A	0-15	6,75	0,057	не засолен	1,90
AB	15-25	7,05	0,068	не засолен	1,70
B ₁	25-48	7,10	0,070	не засолен	2,70
B _{2к}	48-66	8,25	0,115	не засолен	2,40
B _{3к}	66-83	8,54	0,177	не засолен	4,00
B _{4к}	83-109	9,21	0,171	не засолен	4,20
C _к	109-140	8,70	0,168	не засолен	7,60
Лугово-черноземная почва (трансэлювиальный ЭГЛ)					
A _{пах}	0-22	6,35	0,061	не засолен	2,10
AB	22-47	6,80	0,071	не засолен	1,00
B ₁	47-67	6,20	0,140	не засолен	1,30
B _{2к}	67-85	8,39	0,128	не засолен	3,10
Лугово-черноземная солонцеватая почва (трансэлювиальный ЭГЛ)					
A _{пах}	0-15	6,70	0,063	не засолен	3,80
AB	15-28	6,95	0,068	не засолен	3,40
B ₁	28-45	7,90	0,119	не засолен	4,10
Солонец черноземно-луговой мелкий (трансаккумулятивный ЭГЛ)					
A ₁	0-10	8,22	0,206	содово-сульфатное слабое	4,10
B ₁	10-21	8,00	0,306	содово-сульфатное среднее	9,30
B _{2к}	21-32	7,40	0,312	содово-сульфатное среднее	11,1
B _{3к}	32-52	8,20	0,345	содово-сульфатное среднее	11,7
B _{4к}	52-70	8,90	0,396	содово-сульфатное среднее	14,3
C _{кг}	70-175	8,80	0,842	сульфатное сильное	11,9
Черноземно-луговая карбонатная почва (трансаккумулятивный ЭГЛ)					
A _{пах}	0-15	7,35	0,146	хлоридно-гидрокарбонатное слабое	6,70
AB _к	15-26	7,95	0,178	сульфатно-гидрокарбонатное слабое	10,0
B _{1к}	26-50	8,50	0,155	хлоридно-содовое слабое	9,70
B _{2к}	50-72	9,05	0,304	содово-сульфатное среднее	6,70
Лугово-болотная перегнойная почва (супераккумулятивный ЭГЛ)					
A _г	0-14	6,55	0,427	хлоридно-сульфатное среднее	7,30
B _г	14-40	7,95	0,256	не засолен	2,20

В гидроморфных трансаккумулятивных ландшафтах приболотного пояса почвенно-геохимическая обстановка существенно изменяется. В условиях непромывного и выпотного водного режима при постоянной связи с почвенно-грунтовыми водами в понижении рельефа усиливается аккумуляция легкорастворимых солей и подвижных соединений бора до избыточного для растений уровня (более 5 мг/кг).

Максимальное содержание солей находилось в профиле солонца мелкого. Степень засоления изменялась от слабой и средней в верхней и срединной частях профиля до сильной в почвообразующей породе. Одновременно с накоплением солей происходило значительное

возрастание содержания бора. Радиальное распределение соединений элемента по профилю солонца неравномерное. Минимальное содержание его находится в гумусово-элювиальном надсолонцовом горизонте ($R = 0,34$), максимум концентраций элемента приходится на иллювиальные подсолонцовые горизонты ($R = 1,2$), играющие роль физико-химического и механического барьеров.

Избыточные концентрации подвижного бора находились в профиле черноземно-луговой карбонатной почвы. В лугово-болотной почве приболотного понижения легкорастворимые соли и соединения бора накапливались с поверхностным и внутрипочвенным стоком в верхнем горизонте Ag. Однако высокое содержание микроэлемента в нем, по-видимому, связано не только с накоплением его за счет переноса с повышенных позиций рельефа, но и с высоким содержанием борорганических соединений в составе перегнойно-гумусового горизонта.

Таким образом, в почвах геохимически сопряженных ландшафтов гривно-приболотных комплексов Ишим-Иртышского междуречья выявлена взаимосвязь миграции легкорастворимых солей и бора. Между содержанием подвижного бора и легкорастворимых солей выявлена существенная корреляционная зависимость ($r = 0,56 \pm 0,14$, $n = 26$), однако она была средней, что объясняется различиями миграционной и сорбционной способности сульфатов, гидрокарбонатов и боратов. Кроме количества солей, значительное влияние на уровень концентраций микроэлемента в почвах оказывала реакция среды ($r = 0,69 \pm 0,13$), так как увеличение щелочности приводит к усилению растворимости его соединений.

Значительную роль в почвообразовании рассматриваемой территории играют грунтовые воды, расположенные под лугово-черноземными почвами на глубине 3–3,5 м, под луговой почвой и солонцом на глубине 2,4–2,6 м. Анализ данных показал, что с продвижением от вершины гривы к приболотному понижению одновременно возрастала концентрация бора в грунтовых водах от 0,12–0,14 под лугово-черноземной почвой до 0,16–0,35 под луговой и 0,44–0,62 мг/л под солонцом. Рассчитанные значения коэффициента водной миграции (КВМ) элемента в грунтовых водах составляли 1,09 для солонца, 2,39 для лугово-черноземных почв, 5,59 – черноземно-луговой почвы и характеризовали его как легкоподвижный водный мигрант, что соответствует общим представлениям о геохимии бора.

Бор является элементом с высоким потенциалом поступления в растения. Поэтому на почвах с борным засолением существует опасность повышенного поступления элемента в биомассу растений и, соответственно, в пищевые цепи. На избыточное содержание бора в естественной растительности сенокосов и пастбищ Барабинской равнины, особенно межгривных понижений, сообщалось в работах [5,6]. Значения ПДК для бора в растительных

кормах не установлены. По Ковальскому В.В. (1974), содержание бора в рационе выше 60 мг/кг является избыточным и может вызвать борные энтериты у животных. Согласно данным Башкина В.Н. и др. (1993), нормальное содержание элемента в растительной массе составляет 1–30 мг/кг (цит. по [8]). Следует, однако, отметить, что данная величина является ориентировочной и многие растения на почвах с нормальным содержанием бора в почве имеют высокий уровень содержания элемента в силу физиологических потребностей.

В исследованных нами растениях предел экологической нормы, по Ковальскому В.В., превышен не был. Концентрации элемента в растениях в первую очередь зависели от их биологических особенностей. Наиболее высокие концентрации бора (39–47,8 мг/кг) находились в растениях семейств бобовые (*Fabaceae*), сложноцветные (*Asteraceae*), норичниковые (*Scrophulariaceae*), мареновые (*Rubiaceae*). Значительно меньше микроэлемента находилось в биомассе растений семейства мятликовые (*Poaceae*). Среди них больше элемента находилось в надземной массе костреца безостого (6,9 мг/кг), наиболее низкие концентрации обнаружены в пшенице (табл. 2).

Таблица 2

Содержание бора и кальция в растениях
на почвах геохимически сопряженных ландшафтов

Растение	Бор, мг/кг	Са, %	Са: В
Лугово-черноземная почва, элювиальный ЭГЛ			
Льнянка обыкновенная (<i>Linaria vulgaris</i>)	41,5	0,75	180,7
Подмаренник желтый (<i>Galium verum</i>)	37,7	1,20	318,3
Чина луговая (<i>Lathyrus pratensis</i>)	43,0	1,30	302,3
Чина гороховидная (<i>Lathyrus pisiiformis</i>)	47,8	1,20	251,1
Полынь селитряная (<i>Artemisia nitrosa</i>)	39,0	0,67	171,8
Кострец безостый (<i>Bromopsis inermis</i>)	6,9	0,34	492,8
Лугово-черноземная солонцеватая почва, трансэлювиальный ЭГЛ			
Пшеница (<i>Triticum aestivum</i>), стебли	1,4	0,08	571,4
Пшеница, колосья	1,0	0,07	700,0
Черноземно-луговая карбонатная почва, трансаккумулятивный ЭГЛ			
Пшеница, стебли	1,4	0,06	428,6
Пшеница, колосья	0,35	0,07	2000,0
Солонец черноземно-луговой мелкий, трансаккумулятивный ЭГЛ			
Пшеница, стебли	2,1	0,08	381
Пшеница, колосья	0,4	0,07	1750

Примечание. Растения отбирали в фазу цветения, пшеницу – в фазу колошения.

Аналогичные закономерности содержания бора в растениях разных семейств установлены для других регионов [1,6,9]. Распределение бора по органам пшеницы неравномерное: содержание его в стеблях в 1,4–5,3 раза выше, чем в колосьях, что свидетельствует о проявлении барьерного типа поглощения элемента, для которого характерно накопление его в вегетативных органах в более высоких концентрациях, чем в

генеративных. Аналогичный тип распределения бора в пшенице отмечен для условий Западного Забайкалья [10]. Содержание бора в растениях слабо зависело от концентрации его подвижной формы в почве. Отмечено лишь небольшое увеличение содержания микроэлемента в стеблях пшеницы на солонце. Однако, в целом, уровень содержания бора в культуре был очень низким, несмотря на высокие концентрации подвижных соединений элемента в почвах. В то же время имеются данные о том, что содержание бора в органах культуры при борном засолении или загрязнении почв может достигать очень высоких уровней. Так, в опытах Орловой Э.Д. содержание микроэлемента в надземной массе пшеницы в возрасте 30 дней при внесении в почву доз бора 5–15 мг/кг возрастало до 211–510 мг/кг [11]. При орошении пшеницы водой с содержанием элемента 5 мг/л содержание его в тканях культуры достигало 701 мг/кг [4]. По нашему мнению, причиной низкого уровня содержания микроэлемента в растениях пшеницы на засоленных бором почвах является антагонизм с ионами легкорастворимых солей, присутствующих в почвенном растворе засоленных почв, что подтверждено нами в вегетационных опытах [8].

Потребность в боре и уровень его содержания в тканях растений зависит от концентрации в них Са. Известно, что нормальное развитие растений происходит при определенном соотношении этих элементов. В условиях избытка бора в среде отношение Са:В в органах растений снижается, что является одним из признаков проявления борного токсикоза. Исследованиями, проведенными нами ранее, установлено, что урожайность мятликовых культур в фазе колошения существенно снижалась при величине соотношения Са:В в надземной массе ячменя < 40, в костреце безостом < 210 [8]. Судя по этим данным, можно сделать ориентировочный вывод о том, что соотношение элементов в надземной массе исследованных мятликовых растений не выходит за пределы нормальных значений.

Заключение

Таким образом, в почвах геохимически сопряженных ландшафтов гривно-приболотного комплекса лесостепи Ишим-Иртышской равнины наблюдается четкая дифференциация содержания бора и легкорастворимых солей. Почвы элювиальных и трансэлювиальных ЭГЛ характеризуются отсутствием засоления и нормальным содержанием бора. С продвижением от гривного повышения к приболотному понижению наблюдается возрастание содержания в почвах солей и бора. В трансаккумулятивном и супераккумулятивном ЭГЛ степень засоления увеличивается до средней, в почвообразующей породе солонца до сильной. Почвам данных ЭГЛ присущи признаки борного засоления. Перераспределение содержания легкорастворимых солей и подвижных соединений микроэлемента происходит за счет их радиальной внутрипрофильной и латеральной миграции. Установлена существенная связь концентраций подвижного бора,

легкорастворимых солей и величины рН в почвах. Уровень содержания бора в растениях, произрастающих на почвах геохимически сопряженных ЭГЛ, в первую очередь определялся их физиологическими потребностями и слабо зависел от концентрации подвижного бора в почве. В условиях борного засоления почв содержание микроэлемента в растениях в фазе цветения-колошения не достигало токсического для животных уровня. Соотношение Са:В в надземной массе растений не выходило за пределы нормы.

Список литературы

1. Kabata-Pendias A. Trace Elements in Soils and Plants. 4th Edition. / A. Kabata-Pendias. – Boca Raton, FL: CRC Press, 2010. – 548 p.
2. Nielsen F.H. Boron in human and animal nutrition / F. H. Nielsen // Plant and Soil. – 1997. – Vol. 193. – P. 199-208.
3. Shaaban M.M. Role of boron in plant nutrition and human health / M.M. Shaaban // American Journal of Plant Physiology. – 2010. – № 5(5). – P. 224-240.
4. Boron toxicity / R.O. Nable, G.S. Banuelos, J. G. Paull // Plant and Soil. – 1997. – Vol. 193. – P. 181-198.
5. Сысо А.И. Закономерности распределения химических элементов в почвообразующих породах и почвах Западной Сибири / А.И. Сысо. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2007. – 277с.
6. Ильин В.Б. О некоторых вопросах биогеохимии на юге Западной Сибири / В.Б. Ильин, А.И. Сысо, Г.А. Конарбаева, Ю.В. Ермолов // Сибирский экологический журнал. – 2007. – №5. – С. 753-763.
7. Азаренко Ю.А. Содержание бора в почвах солонцовых комплексов Омского Прииртышья и бороустойчивость растений / Ю.А. Азаренко // Почвоведение. – 2007. – № 5. – С. 562-573.
8. Азаренко Ю.А. Закономерности содержания, распределения, взаимосвязей микроэлементов в системе почва-растение в условиях юга Западной Сибири: монография / Ю.А. Азаренко. – Омск: Вариант-Омск, 2013. – 232 с.
9. Кашин В.К. Бор в почвах и растениях Забайкалья / В.К. Кашин // Почвоведение. – 2012. – № 4. – С. 421-428.
10. Кашин В.К. Особенности накопления микроэлементов в зерне пшеницы в Западном Забайкалье / В.К. Кашин, Л.Л. Убугунов // Агрохимия. – 2012. – № 4. – С. 68-76.

11. Орлова Э.Д. Влияние повышенных концентраций бора на продуктивность и химический состав растений / Э.Д. Орлова, А.А. Неупокоев // Агрохимия. – 1990. – № 12. – С. 44-52.