

РЕГИОНАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

УДК 911.2:550.4

И.А. Авессаломова¹**БИОГЕОХИМИЧЕСКАЯ СПЕЦИАЛИЗАЦИЯ РАСТЕНИЙ ПОЛЕССКИХ ЛАНДШАФТОВ ОЗЕРНОЙ МЕЩЕРЫ**

Использован подход, раскрывающий гетерогенность внутриландшафтного пространства. Она проявляется в соседстве катен с разным набором элементарных ландшафтов. Установление их биогеохимического разнообразия требует выявления особенностей биологического поглощения элементов растениями разных систематических групп. При их обосновании необходим учет происхождения видов и их связей с эколого-геохимическими условиями эдафотопов. Для изучения биогеохимической специализации растений были выбраны южнотаежные полесские ландшафты Озерной Мещеры. Геохимическое опробование проводилось по катенам. При интерпретации аналитических данных использован комплекс специальных показателей – зольность растений и интенсивность биологического поглощения элементов. На их основании проведена группировка растений по зольности и активности накопления микроэлементов. Выделены виды с пониженной зольностью: бореальные кустарнички и мхи. Низкая зольность архегонияльных видов согласуется с их обнаружением в лесах с консервативным типом биологического круговорота, существовавшем в палеофите и мезофите. Приуроченность ели к богатым местообитаниям отражается на росте зольности ее хвои по сравнению с сосной. Среди покрытосеменных выявлено увеличение разнообразия видов по способности к накоплению зольных элементов. По активности поглощения микроэлементов установлено, что большинство растений полесских ландшафтов имеет катионофильную специализацию. Показана их связь с центрами видообразования в гумидных ландшафтах юрских и третичных лесов. К их числу относятся деревья – доминанты хвойных лесов, кустарнички семейства вересковых, бореальное мелко-травье, папоротники и хвощи. В полесских ландшафтах они преобладают в верхних звеньях катен. Сглаживание различий в накоплении катионогенных и анионогенных элементов наблюдается у представителей древних (мхи) и молодых (злаки и частично осоки) флор. В нижних звеньях катен они доминируют в супераквальных луговых и болотных ландшафтах. Установлено, что в зависимости от видового состава меняется биогеохимическая специализация фитоценозов, их отдельных ярусов и барьерные функции. В сосновых кустарничково-зеленомошных лесах зафиксирована единая катионогенная специализация древесного и кустарничкового ярусов. Она обеспечивает закрепление биогенных элементов (Mn, Zn и др.) на фитобарьере и снижает их потерю при кислом выщелачивании. Специализация мохового покрова состоит в накоплении V, Cr, Ti. Изменение ассоциации накапливающих элементов в лугах и болотах способствует увеличению неоднородности и контрастности катен.

Ключевые слова: филогенетическая специализация растений, видовой состав фитоценозов, катионогенные и анионогенные элементы, ряды биологического поглощения, биогеохимическая активность видов, фитобарьеры

Введение. К числу фундаментальных понятий, связанных с функционированием геосистем, относятся представления об их когерентности и самоорганизации. Основным механизмом самоорганизации является биологический круговорот (БИК), обеспечивающий целостность природных ландшафтов и характер межкомпонентных отношений [Перельман, 1995; Перельман, Касимов, 1999]. Среди факторов, курирующих степень самоорганизации, ведущую роль играют автотрофный и гетеротрофный биогенез, их интенсивность и соотношение. Это позволило сформулировать теоретическое положение о биогеохимической организованности и неоднородности внутриландшафтного пространства [Глазовская, 1992]. В его пределах в соответствии с эколого-геохими-

ческими градиентами [Fortescue, 1980] сменяются природные комплексы с различной биогеохимической структурой, которая связана со строением, продуктивностью и флористическим богатством фитоценозов. Ее своеобразие во многом зависит от типов химизма БИКа и интенсивности биологического поглощения микроэлементов растениями, которое определяется их филогенетической специализацией и экологическими условиями местообитаний. Поскольку рост активности автотрофного биогенеза и видового разнообразия способствуют увеличению самоорганизации ландшафта, биогеохимическая структура может рассматриваться как один из факторов его устойчивости, что важно учитывать при оценке последствий антропогенного воздействия.

¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, кафедра физической географии и ландшафтоведения, доцент, канд. геогр. н.; e-mail: aiageo@yandex.ru

Постановка проблемы. Одним из проявлений внутренней гетерогенности ландшафта является соседство разнотипных элементарных ландшафтов (ЭЛ), обеспечивающих биогеохимическую неоднородность катен. Ее обоснование требует выявления направленности биологического поглощения элементов растениями разных систематических групп и их комбинаторики в составе фитоценозов, что определяет своеобразие формирующегося биогеохимического поля в разных звеньях катен. Его континуальность обеспечивается сходством растительных сообществ в сопряженных ЭЛ, но нарушается при смене фитоценозов, отличающихся по интенсивности вовлечения элементов в БИК. Концепция о различиях биогеохимической активности растений к накоплению элементов базируется на представлении о филогенетической специализации видов, сформировавшейся в зависимости от их происхождения и эволюции [Кист, 1987; Кабата-Пендиас, Пендиас, 1989; Баргалы, 2005; Bowen, 1966; Kabata-Pendias, 2011] и др. Выделены парагенезисы микроэлементов в растениях разных зон и виды с катионофильной и анионофильной специализацией, центры видообразования которых связаны соответственно с гумидными или аридными ландшафтами [Айвазян, Касимов, 1979; Касимов и др., 2019]. В зависимости от их сочетания и доминирования в структуре растительных сообществ, очевидно, можно говорить не только о биогеохимической специализации отдельных видов, но и о специализации фитоценозов или их отдельных ярусов.

Другая группа вопросов связана с выявлением биогеохимического разнообразия сопряженных ЭЛ, его связей с эколого-геохимической контрастностью катен и с формированием барьерных зон [Avessalomo et al., 2016]. Основываясь на подходах к классификации барьеров [Глазовская, 2012], при систематике биогеохимических барьерных зон предполагается учет их происхождения (фитобарьер и др.), режима функционирования, пространственной локализации, ёмкости и специализации, которая фиксируется по парагенным ассоциациям накапливающихся в биоте элементов.

Анализ литературных источников выявил особенности биологического поглощения элементов растениями бореальных ландшафтов Восточно-Европейской равнины. На основании данных для средней тайги Карелии установлено, что, несмотря на значительную вариацию концентраций микроэлементов в золе доминантов древесного (ель европейская) и кустарничкового (черника) ярусов, биогеохимическая специализация отдельных видов и их морфологических органов проявляется весьма отчетливо. Показано, что мхи лучше накапливают микроэлементы (Ti, Zr), слабо поглощаемые деревьями и кустарничками [Добровольский, 2003]. Для южнотаежных полесских ландшафтов озерно-аллювиальных равнин (бассейн р. Гусь) зафиксирована возможность иммобилизации тяжелых металлов (ТМ) в хвое основных доминантов древесного яруса, а также у представителей кустарничкового, тра-

вяного и мохового ярусов сосновых и сосново-еловых лесов. Показана тенденция к базипетальному распределению ТМ и их сезонная динамика в фотосинтезирующих органах деревьев, а также способность мелколиственных пород к одновременному концентрированию Zn и Pb, несмотря на антагонизм между этими элементами. Важен вывод о том, что в фоновых условиях барьерные механизмы не предотвращают миграцию Pb в фотосинтезирующие органы [Кривцов и др., 2011]. Выявлена возможность увеличения активности биологического поглощения микроэлементов в условиях бедных песчаных почв, что было ранее отмечено для полесских ландшафтов Белоруссии и Мещеры как адаптивная реакция растений, противостоящих кислому выщелачиванию [Авессаломова, Микляева, 1997].

Попытка выявления роли растений при оценке биогеохимической неоднородности катен предпринята для полесских ландшафтов Озерной Мещеры. Это предполагало установление вещественного состава растений, занимающих разное систематическое положение. Сопоставление их способности к поглощению минеральных веществ является одним из критериев, позволяющих обосновать различия или общность геохимической структуры и специализацию фитоценозов сопряженных комплексов.

Материалы и методы исследований. Основной объект исследований – южнотаежные полесские ландшафты в бассейне р. Пра. Они приурочены к озерно-зандровым низменным равнинам московского и валдайского возраста, сложенным мономинеральными олигомиктовыми обедненными основаниями кварцевыми песками [Кривцов и др., 2011]. Преобладают лесо-болотные и лесо-лугово-болотные катены, включающие автономные пермацидные ЭЛ Н-класса с зеленомошными, кустарничково-зеленомошными и орляковыми сосновыми лесами, сопрягающиеся с супераквальными ЭЛ Н-Fe-класса с травяно-долгомошными елово-сосновыми лесами и травяными осоковыми низинными болотами, окаймляемыми полосой разнотравно-осоково-злаковых лугов. При наличии прямых водных связей биогеохимическая неоднородность и контрастность катен обусловлена увеличением в нижних звеньях гидроморфности и трофности эдафотопов, что сопровождается изменением обстановки водной миграции, ослаблением гуматогенеза и усилением детритогенеза. Краевая зона болот, к которой приурочены сырые и болотистые луга, в связи с колебаниями уровня грунтовых вод занимает экотонное положение в катенах. Она отличается нестабильными значениями гидротермических и геохимических параметров, увеличением флористического разнообразия и формированием кольцеобразных барьерных зон, включающих физико-химические и биогеохимические барьеры [Авессаломова, 2012].

Биогеохимическое опробование проходило по катенам с заложением точек в автономных и подчиненных ЭЛ и включало отбор укусов с площадок 50×50 см и проб отдельных растений, относящихся к различным ценогенетическим комплексам, с уче-

том их требований к влажности и богатству почв. Всего опробовано 36 видов растений разных систематических групп (330 проб) и проведен разбор укосов по фракциям травянистой фитомассы лугов разного уровня (90 проб). Зольность образцов (сырая зола) определена в аналитической лаборатории кафедры физической географии и ландшафтоведения географического факультета МГУ, микроэлементный состав зол растений – в Бронницкой геолого-геохимической экспедиции ФГУП «ИМГРЭ» методом приближенного количественного спектрального анализа (ПКСА). Расчет кларков концентрации микроэлементов (КК) и общей биогеохимической активности видов ($BXA = \sum KК$ для 18 микроэлементов) проведен по отношению к кларкам литосферы [Виноградов, 1962]. Для каждого из растений рассчитана суммарная степень накопления катионогенных ($\Sigma k = \sum KК$ Mn, Ba, Zn, Cu) и анионогенных ($\Sigma a = \sum KК$ Mo, V, Cr, Ti) элементов, соотношение между ними ($\Sigma k / \Sigma a$) и отдельно между $KК_{Mn} / KК_{Mo}$, что использовано при выявлении биогеохимической специализации видов.

Результаты исследований и их обсуждение.

Накопление минеральных веществ в растениях. Участие различных видов растений в автотрофном биогенезе определяется не только их фитомассой, но и способностью к накоплению минеральных веществ. К числу информативных экстенсивных параметров биологического поглощения относится зольность, которая различается в фотосинтезирующих зеленых частях растений от 1,4 до 12,5% (рис. 1).

Группа видов с пониженной зольностью включает хвойные деревья-доминанты полесских ландшафтов, бореальные кустарнички – черника (*Vaccinium myrtillus*) и брусника (*Vaccinium vitis-idaea*), а также мхи. Низкое содержание минеральных веществ у архегониальных видов хорошо согласуется с консервативным типом БИКа лесных ландшафтов палеофита и мезофита, с которыми связано их происхождение. Зольность хвои сосны (*Pinus sylvestris* – 1,8%) ниже, чем у ели (*Picea abies* – 3,1%), занимающей более богатые местообитания в катенах. В связи с этим в елово-сосновых лесах суперактивных ЭЛ на единицу продуцируемой фитомассы расходуются больше элементов, что способствует увеличению емкости фитобарьера в древесном ярусе по сравнению с сосняками автономных ЭЛ. Невысокой зольностью характеризуются олиготрофные бореальные кустарнички семейства вересковых (черника, брусника – 2,6–3,0%) в отличие от линнеи северной (*Linnaea borealis* – 5,7%) из семейства жимолостных, а также от плауновых, например, плауна булавовидного (*Lycopodium clavatum* – 4%). Среди мхов зольность выше у видов, связанных с минеральным субстратом, в частности, у плеурозия Шребера (*Pleurozium Schreberi*) и дикрана многожогового (*Dicranum polysetum*) составляет 2,9–3,0%, а снижается у сфагновых мхов и кукушкина льна (*Polytrichum commune*) – 1,4–2,1%.

Другую группу составляют мезофитные злаки белоус торчащий (*Nardus stricta*), душистый коло-

сок (*Anthoxanthum odoratum*), тимopheевка луговая (*Phleum pratense*), гигромезофитный злак щучка дернистая (*Deschampsia caespitosa*), а также низинно-болотные осоки и ситники (4,4–6,8%). Среди злаков выделяется тростник обыкновенный (*Phragmites australis* 7,8%) – низинно-болотный гигрофит, приуроченный к эвтрофным местообитаниям.

Еще одну группу видов образуют представители разнотравья и бобовых, отражающие тенденцию к увеличению разнообразия покрытосеменных по способности к накоплению зольных элементов (5,5–10,9%). Сюда вошли голарктические виды разных семейств и ценогенетических комплексов. Из бореального мелкотравья (зольность 7,6–10%) это майник двулистный (*Majanthemum bifolium*, семейство Liliaceae), кислица обыкновенная (*Oxalis acetosella*, семейство Oxalidaceae), седмичник европейский (*Trientalis europaea*, семейство Primulaceae). Из боровых и лугово-лесных видов – ястребинка волосистая (*Hieracium pilosella*, семейство Asteraceae), лапчатка прямостоящая (*Potentilla erecta*, семейство Rosaceae), марьянник лесной (*Melampyrum pratense*, семейство Scrophulariaceae) – зольность 6,1–9,1% и боровой предбореальный вид – ландыш майский (*Convallaria majalis*, семейство Liliaceae – 8,3%). Из видов, характерных для суперактивных ЭЛ, в нее включены низинно-болотные гигрофиты (зольность 5,6–10,9%) частуха подорожниковая (*Alisma plantago-aquatica*, семейство Alismataceae), фиалка болотная (*Viola palustris*, семейство Violaceae), сабельник болотный (*Comarum palustre*, семейство Rosaceae). Особое место занимают архегониальные голарктические виды, отличающиеся максимальной зольностью, в том числе хвощ лесной (*Equisetum sylvaticum* – 12,5%), и циркумбореальные папоротниковидные. Несмотря на близкие значения зольности, прослеживается снижение накопления минеральных веществ у такого олиготрофа, как орляк обыкновенный (*Pteridium aquilinum* – 7,1%) в автономных ЭЛ с папоротниковыми сосняками, по сравнению со страусником обыкновенным (*Matteuccia struthiopteris* – 7,5%) в тенистых эдафотопях по днищам ложбинообразных понижений. Страусник предпочитает хороший дренаж и проточные почвенно-грунтовые воды, богатые минеральными солями [Биологическая флора ..., 1993]. Это согласуется с увеличением его активности к поглощению зольных элементов, способствует перехвату биогенов, мигрирующих с потоком грунтовых вод, и увеличению емкости латерального фитобарьера в травяном ярусе суперактивных ЭЛ.

Биогеохимическая специализация растений разных систематических групп. Наряду с общей тенденцией увеличения зольности от архегониальных (кроме хвощей) видов к покрытосеменным в процессе эволюции формировались различия вещественного состава растений разных систематических групп. В отношении макроэлементов это проявилось, например, в активном поглощении Si мхами, папоротниками, хвощами, некоторыми хвойными

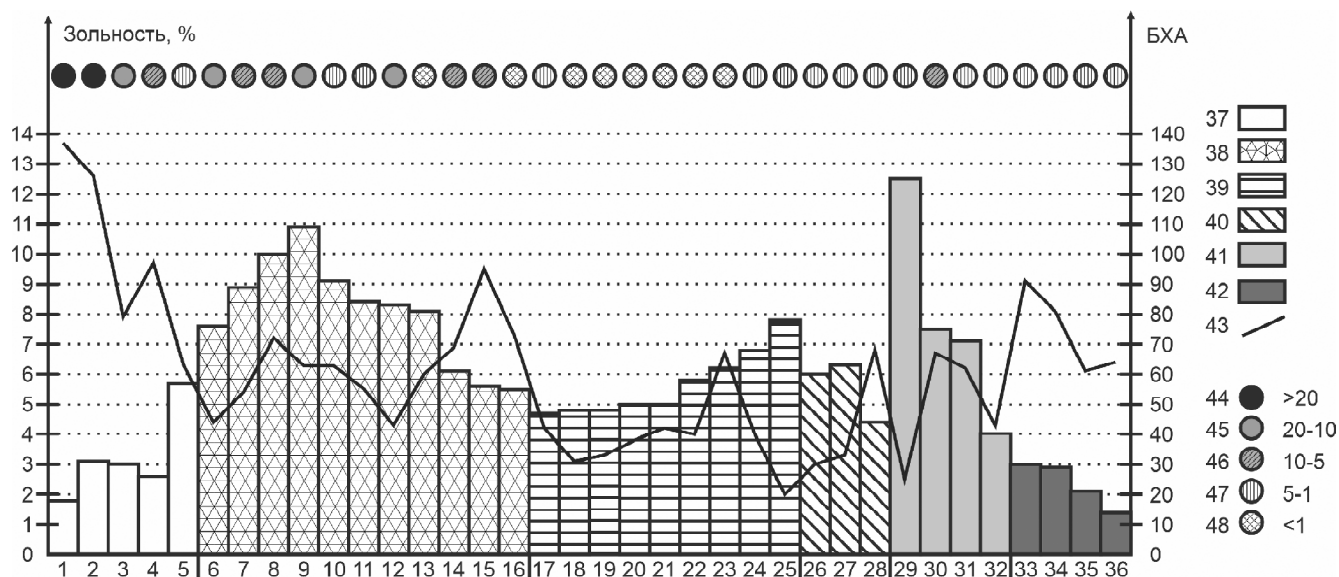


Рис. 1. Зольность и биогеохимическая активность растений полесских ландшафтов Озерной Мещеры.

Деревья и кустарнички: 1 – сосна обыкновенная (*Pinus sylvestris*, хвоя), 2 – ель европейская (*Picea abies*, хвоя), 3 – черника (*Vaccinium myrtillus*), 4 – брусника (*Vaccinium vitis-idaea*), 5 – линнея северная (*Linnaea borealis*). Разнотравье: 6 – седмичник европейский (*Trientalis europaea*), 7 – майник двулистный (*Maianthemum bifolium*), 8 – кислица обыкновенная (*Oxalis acetosella*), 9 – частуха подорожниковая (*Alisma plantago-aquatica*), 10 – марьянник луговой (*Melampyrum pratense*), 11 – фиалка болотная (*Viola palustris*), 12 – ландыш майский (*Convallaria majalis*), 13 – ястребинка волосистая (*Hieracium pilosella*), 14 – лапчатка прямостоячая (*Potentilla erecta*), 15 – сабельник болотный (*Comarum palustre*). Бобовые: 16 – горошек мышиный (*Vicia cracca*). Злаки: 17 – душистый колосок (*Anthoxanthum odoratum*), 18 – тимopheвка луговая (*Phleum pratense*), 19 – пырей ползучий (*Agropyron repens*), 20 – овсяница луговая (*Festuca pratensis*), 21 – молиния голубая (*Molinia caerulea*), 22 – щучка дернистая (*Deschampsia caespitosa*), 23 – полевица побегообразующая (*Agrostis stolonifera*), 24 – белоус торчащий (*Nardus stricta*), 25 – тростник обыкновенный (*Phragmites australis*). Осоки и ситники: 26 – осока вздутая (*Carex rostrata*), 27 – осока пузырчатая (*Carex vesicaria*), 28 – ситник нитевидный (*Juncus filiformis*). Папоротники, хвощи, плауны: 29 – хвощ лесной (*Equisetum sylvaticum*), 30 – страусник обыкновенный (*Matteuccia struthiopteris*), 31 – орляк обыкновенный (*Pteridium aquilinum*), 32 – плаун булавовидный (*Lycopodium clavatum*). Мхи: 33 – плеврозий Шребера (*Pleurozium Schreberi*), 34 – дикран многоокожковый (*Dicranum polysetum*), 35 – кукушкин лен (*Polytrichum commune*), 36 – сфагн (*Sphagnum* sp.). Биогеохимические параметры (по средним значениям из 8–15 проб для вида). Зольность (%): 37 – деревья и кустарнички, 38 – разнотравье, 39 – злаки, 40 – осоки и ситники, 41 – папоротники, хвощи, плауны, 42 – мхи. Биогеохимическая активность к накоплению микроэлементов (БХА) – 43. Соотношение степени накопления Mn и Mo (KK_{Mn}/KK_{Mo}): 44 – более 20, 45 – 20–10, 46 – 10–5, 47 – 5–1, 48 – менее 1

Fig. 1. Ash content and the biogeochemical activity of plants in Polesye landscapes of the Meschera lakeland.

Trees and shrubs: 1 – Scots pine (*Pinus sylvestris*, needles), 2 – European spruce (*Picea abies*, needles), 3 – Bilberry (*Vaccinium myrtillus*), 4 – Lingonberry (*Vaccinium vitis-idaea*), 5 – Northern linnea (*Linnaea borealis*). Forbs: 6 – arctic starflower (*Trientalis europaea*), 7 – false lily of the valley (*Maianthemum bifolium*), 8 – common oxalis (*Oxalis acetosella*), 9 – European water-plantain (*Alisma plantago-aquatica*), 10 – common cow-wheat (*Melampyrum pratense*), 11 – marsh violet (*Viola palustris*), 12 – may lily of the valley (*Convallaria majalis*), 13 – mouse-ear hawkweed (*Hieracium pilosella*), 14 – tormentil (*Potentilla erecta*), 15 – marsh cinquefoil (*Comarum palustre*). Legumes: 16 – mouse peas (*Vicia cracca*). Grasses: 17 – sweet vernal grass (*Anthoxanthum odoratum*), 18 – Timothy grass (*Phleum pratense*), 19 – couch grass (*Agropyron repens*), 20 – meadow fescue (*Festuca pratensis*), 21 – purple moor-grass (*Molinia caerulea*), 22 – tussock grass (*Deschampsia caespitosa*), 23 – creeping bentgrass (*Agrostis stolonifera*), 24 – matgrass (*Nardus stricta*), 25 – common reed (*Phragmites australis*). Sedges and rushes: 26 – bloated sedge (*Carex rostrata*), 27 – bladder sedge (*Carex vesicaria*), 28 – filamentous rush (*Juncus filiformis*). Ferns, horsetails, ground-pines: 29 – wood horsetail (*Equisetum sylvaticum*), 30 – ostrich fern (*Matteuccia struthiopteris*), 31 – eagle fern (*Pteridium aquilinum*), 32 – common club moss (*Lycopodium clavatum*). Mosses: 33 – Schreber's big red stem moss (*Pleurozium Schreberi*), 34 – wind-blown mosses (*Dicranum polysetum*), 35 – common haircap (*Polytrichum commune*), 36 – Sphagnum (*Sphagnum* sp.) Biogeochemical parameters (based on average values from 8 to 15 samples per each species). Ash content (%): 37 – trees and shrubs; 38 – forbs; 39 – grasses; 40 – sedges and rushes; 41 – ferns, horsetails, ground-pines; 42 – mosses. Biogeochemical activity of the accumulation of trace elements (BCA) – 43. Ratio of the degree of Mn and Mo accumulation (KK_{Mn}/KK_{Mo}): 44 – more than 20, 45 – 20–10, 46 – 10–5, 47 – 5–1, 48 – less than 1

деревьями (хвоя ели) и злаками с кремниевым скелетом; Fe – вересковыми, P – бобовыми и лилейными; в преобладании K над Ca в составе большинства трав [Авессаломова, 2007; Добровольский, 2003; Перельман, Касимов, 1999; Kabata-Pendias, 2011]. Важным систематическим признаком отдельных видов растений является микроэлементный состав, отражающий своеобразие их филогенетической специализации.

Биогеохимическая активность видов к накоплению микроэлементов отличается высокой вариабельностью (БХА от 20 до 137) и не всегда согласуется с их общей способностью к поглощению минеральных веществ (см. рис. 1). Особенно контрастно это проявляется у доминантов древесного яруса, когда низкзольная хвоя отличается наиболее высоким уровнем накопления микроэлементов (БХА 126–137). Бореальные кустарнички автоном-

ных ландшафтов Н-класса малотребовательны к богатству почв (особенно брусника) и являются олиготрофами, однако корневое питание осуществляется с помощью микоризы [Биологическая флора ..., 1980], что, очевидно, оказывает влияние на их достаточно высокую биогеохимическую активность (БХА 79–97). Ее снижение зафиксировано у линнеи северной (БХА = 63).

Среди разнотравья встречаются виды с разной активностью биопоглощения микроэлементов, но в целом она ниже, чем у деревьев и кустарничков (БХА 43–63 и более). На этом общем фоне выделяются виды с повышенной БХА, относящиеся к разным семействам. Из бореального мелкотравья к их числу относится кислица обыкновенная (БХА=72), способность которой активно поглощать элементы минерального питания в условиях небогатых местообитаний препятствует их выносу при кислотном выщелачивании. Повышенная активность лапчатки прямостоящей (БХА = 70) может быть связана с ее филогенетической специализацией, сформировавшейся при эволюции рода *Potentilla* от древесных форм к травянистым. Наиболее высокой БХА отличается сабельник болотный (БХА=95), характерный для сырых лугов супераквальных ЭЛ Н-Fe-класса. Повышенное накопление микроэлементов выявлено у бобовых (БХА=73).

Наиболее низкой биогеохимической активностью отличаются злаки и осоки (БХА 20–40), что в первую очередь связано со значительным уменьшением потребления В по сравнению с двудольными растениями. Снижение потребности в этом элементе у злаков объясняется их физиологическими особенностями и способностью не накапливать фенолы при формировании вегетативных органов [Школьник, 1974]. В рядах биологического поглощения злаков и осок В не относится к элементам энергического накопления, что отражает специфику их филогенетической специализации.

Археогониальные виды располагаются в ряд по увеличению БХА: хвощи (25), плауны и папоротники (43–67), мхи (61–90). У мхов биогеохимическая активность, как и зольность, выше у видов, связанных с минеральным субстратом. Она увеличивается за счет захвата микроэлементов, мало вовлекаемых в БИК покрытосеменными растениями. Сходные тенденции в соотношении зольности и БХА зафиксированы для папоротников, что видно по увеличению значений этих показателей у страусника по сравнению с орляком.

Особенности филогенетической специализации растений выявляются при сопоставлении рядов биологического поглощения и ассоциаций катионогенных (Mn, Ba, Zn, Cu) и анионогенных (Mo, V, Cr, Ti) элементов, суммарная степень накопления которых (Σk и Σa) рассчитана с учетом их КК. Профилирующую роль в парагенных ассоциациях играют Mn и Mo. С использованием критериев, отражающих изменение соотношений между выбранными информативными показателями (Σk , Σa , $\Sigma k/\Sigma a$, KK_{Mn}/KK_{Mo}), растения полесских ландшаф-

тов разделены на три группы (рис. 2). В первую вошли сосна и ель, в хвое которых накопление катионогенных элементов в 17–27 раз выше, чем анионогенных. По сравнению с другими видами для них отмечена максимальная активность накопления катионогенных элементов ($\Sigma k=50$ при Σa менее 3) и Mn (КК=30), у которого она в 20–30 раз выше, чем у Mo (см. рис. 1). Предки этих голосеменных из семейства сосновых были характерны для лесных ландшафтов юры, формирующихся в условиях влажного умеренного климата и кислого выщелачивания.

Вторая группа выделяется по снижению накопления катионогенных элементов при сохранении низкой активности к поглощению анионогенных (Σa до 2,5). Она отличается высоким разнообразием и объединяет виды, у которых в рядах биологического поглощения Mn относится к элементам сильного накопления (КК от 6 до 10), что в 5–20 раз выше, чем Mo. В нее вошли бореальные кустарнички се-

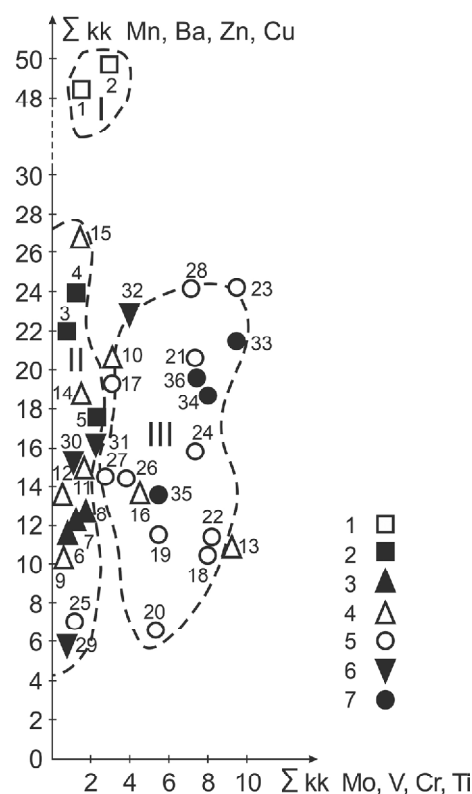


Рис. 2. Соотношение степени накопления катионогенных и анионогенных элементов в растениях полесских ландшафтов Озерной Мещеры. Названия растений: 1 – деревья, 2 – бореальные кустарнички, 3 – бореальное мелкотравье, 4 – разнотравье и бобовые, 5 – злаки, осоки, ситники, 6 – папоротники, хвощи, плауны, 7 – мхи.

Примечание: номера у значков соответствуют названиям видов растений на рис. 1.

Fig. 2. Correlation of the degree of accumulation of cationic and anionic elements by the plants of Polesye landscapes of the Meschera lakeland. Symbols. Names of plants: 1 – trees, 2 – boreal shrubs, 3 – boreal small grasses, 4 – forbs and legumes, 5 – grasses, sedges, rushes, 6 – ferns, horsetails, ground-pines, 7 – mosses. Note: numbers at the signs correspond to the names of plant species in Fig. 1.

мейства вересковых (Σk 22–24), распространявшиеся на европейскую часть России из северной Сибири. Предположительно центры их видообразования связаны с гумидными ландшафтами третичных тургайских листопадных лесов, где в условиях кислой среды увеличивалась доступность катионогенных элементов. Их накопление у черники и брусники значительно превышает биологическое поглощение анионогенных ($\Sigma k/\Sigma a$ от 15 до 20). У брусники и других вересковых, произошедших от вечнозеленого подлеска третичных лесов, эта способность при уменьшении их размеров сохранилась и в более сухих гумидных условиях ландшафтов Н-класса.

Кроме кустарничков в эту группу попадает бореальное мелкотравье, папоротники и хвощи ($\Sigma k/\Sigma a$ от 9 до 14). Эти виды могут быть отнесены к гумидокатным растениям, катионофильная специализация которых формировалась в гумидных условиях. Так, установлена связь орляка обыкновенного с лесами третичного времени, его выживание в периоды четвертичных оледенений и последующее широкое расселение в лесных ландшафтах Северного полушария. Центры видообразования майника двулистного также связаны со смешанными третичными лесами, а в настоящее время он хорошо приспособился к кислым почвам бореальных таежных лесов. К числу древних видов, существовавших в доледниковый период, относится и седмичник европейский, встречающийся в ассоциациях совместно с кислицей и майником [Биологическая флора ..., 1990]. Активность к поглощению катионогенных элементов проявляют также гигрофиты и мезофиты болотного и лугового разнотравья супераквальных ЭЛ Н-Fe-класса: $\Sigma k/\Sigma a$ от 22 до 25 у сабельника болотного, частухи подорожниковой и от 9 до 12 у фиалки болотной, лапчатки прямостоящей и др.

Виды третьей группы отличаются снижением различий в поглощении катионогенных и анионогенных элементов ($\Sigma k/\Sigma a$ от 1 до 3), что происходит за счет увеличения активности накопления анионогенных (Σa более 2,5) и отличает их от растений первой и второй групп. Это наблюдается как у представителей древних (мхи), так и более молодых флор (злаки и осоки). Хотя древнейшие злаки были обнаружены в травяном ярусе верхнемеловых и третичных лесов, их дальнейшая эволюция в четвертичном периоде происходила в условиях прогрессирующего похолодания и аридизации климата. К их числу относится, например, такой третичный реликт, как белоус торчащий, центр видообразования которого связан с горными районами Центральной Европы, откуда распространился этот вид, а также щучка дернистая – голаркто-альпийский вид, возникший в доледниковую эпоху [Биологическая флора ..., 1980 и др.].

У многих мезофитных голарктических злаков, таких как тимopheевка луговая, пырей ползучий (*Agropyron repens*), овсяница луговая (*Festuca pratensis*) и др., отмечено снижение интенсивности поглощения Mn (КК от 0,5 до 1,7) и Ba (КК 0,2–0,3) при сохранении активности накопления Zn и Cu и

увеличении Mo (KK_{Mn}/KK_{Mo} от 0,1 до 0,9), который в рядах биологического поглощения опережает Mn (см. рис. 1). Для злаков, имеющих кремниевый скелет, это может быть связано с антагонистическим влиянием Si на поглощение Mn и стимулирование поглощения Mo [Kabata-Pendias, 2011]. В то же время для таких видов со слабовыраженной базифилией, как тимopheевка луговая и овсяница луговая ($KK_{Mn}/KK_{Mo}=0,2$), на формирование их филогенетической специализации могла оказать влияние связь с эфтрофными местообитаниями, где увеличивается доступность Mo в условиях слабощелочной среды. У мхов рост активности захвата анионогенных элементов ($\Sigma k/\Sigma a=2$) происходит в связи с тем, что они (в отличие от покрытосеменных) являются концентраторами Ti, Cr, V. В рядах биологического поглощения они относятся к элементам среднего накопления и сильного захвата (КК от 0,4 до 2,5).

Биогеохимическая неоднородность катен.

Контрастность эколого-геохимических условий и соседство ЭЛ с разной структурой и видовым составом фитоценозов оказывают влияние на изменение активности вовлечения микроэлементов в БИК при автотрофном биогенезе и создают предпосылки для усиления внутренней гетерогенности катен. Она проявляется в связи с различиями биогеохимической специализации различных фитоценозов (радиальная неоднородность) и при смене специализации фитоценозов в ряду сопряженных ЭЛ (латеральная неоднородность). Для полесских ландшафтов это прослеживается на примере лесо-лугово-болотных катен (табл.).

В автономных ЭЛ Н-класса с сосновыми кустарничково-мелкотравно-зеленомошными лесами основные функции по вовлечению микроэлементов в БИК выполняют древесный и кустарничковый (черника, брусника) ярусы. Их доминанты относятся к гумидокатным видам, что обеспечивает активное поглощение Mn, Ba, Zn. Несмотря на снижение БХА, у бореального мелкотравья сохраняется единая катионофильная специализация с верхними ярусами, что свидетельствует об общем преобладании растений, центры видообразования которых находились в гумидных регионах. Своеобразие специализации мохового яруса (зеленые мхи) связано с вовлечением в БИК не только катионогенных элементов, но и V, Cr, Ti, мало доступных растениям других ярусов. В целом, сосновые леса с участием вечнозеленых видов обеспечивают закрепление типично катионогенных элементов на фитобарьере, постоянное функционирование которого сокращает в автономных ЭЛ Н-класса их потерю при кислом выщелачивании. В орляковых сосняках на вершинах песчаных гряд сохраняется катионофильная специализация при снижении емкости радиального фитобарьера в связи с упрощением структуры растительного сообщества.

В нижних звеньях катен появляются супераквальные луговые и болотные ЭЛ Н-Fe-класса. Для фракционной структуры фитомассы влажных и сырых лугов среднего уровня характерно преобладание злаков (сухая фитомасса 10 ц/га, запас зольных

Т а б л и ц а

Биогеохимическая специализация фитоценозов в разных звеньях лесо-лугово-болотных катен

Элементарный ландшафт	Ярусы и видовой состав фитоценозов	Число проб	БХА	Кларки концентрации микроэлементов		
				10 и более	9–5	5–1
Автономный лесной Н-класса	Древесный (сосна, хвоя)	20	137	B, Mn, Zn	Cu	Ba, Mo
	Кустарничковый (черника, брусника)	36	79–97	B, Mn	Ba, Zn	Cu, Sr
	Травяной (бореальное мелкотравье)	36	42–72	B	Mn	Ba, Zn
	Моховой (зеленые мхи)	21	81–91	Mn	Zn, Cu, B	Mo, V, Cr, Ti
Супераквальный луговой Н-Fe-класса (влажные и сырые луга среднего уровня)	Травяной – злаки (щучка дернистая и др.)	34	40–67	–	Mo, Mn, Zn	Cu, Ba, B
	Травяной – разнотравье (сабельник болотный и др.)	30	55–95	B, Mn	Ba, Zn	Cu, Mo
Супераквальный болотный Н-Fe-класса	Травяной (осоки пузырчатая и вздутая)	22	30–33	(Zn)	Mn, Zn, Cu	Ba, Mo, B
	Моховой (сфагн)	16	61–64	Mn	Zn	Mo, Cu, V, B

элементов 0,5–0,6 ц/га) по сравнению с разнотравьем (соответственно, 5–7 ц/га и 0,4 ц/га) [Авессаломова, Микляева, 1997]. В условиях кислого оглеения, увеличения гидроморфности и трофности местообитаний, представители разнотравья (сабельник болотный, фиалка болотная, лапчатка прямостоящая) активно поглощают Mn, Ba, Zn, что способствует их перехвату из водных потоков со стороны автономных ЭЛ. Биогеохимическая специализация доминирующих злаков, среди которых полевица побегообразующая (*Agrostis stolonifera*), белоус торчащий, щучка дернистая, молиния голубая (*Molinia caerulea*), наоборот, отличается снижением активности поглощения этих элементов, а также В, при увеличении накопления Мо. Это приводит к усложнению парагенных ассоциаций элементов, аккумулятирующихся на латеральном кольцеобразном фитобарьере в краевой зоне болот. Его функционирование имеет сезонный характер, но оказывает влияние на своеобразие биогеохимического поля, формирующегося при гетеротрофном биогенезе в органогенных горизонтах дерново-глеяных почв.

Конечным звеном неполных геохимических сопряжений являются травяные болота с доминированием осок пузырчатой (*Carex vesicaria*) и вздутой (*Carex rostrata*), которые определяют достаточно высокую активность биопродукционного процесса (сухая фитомасса 28–30 ц/га, запас зольных элементов 1 ц/га). Они отличаются невысокой биогеохимической активностью (БХА 30–33) при большей способности к поглощению катионогенных элементов, чем анионогенных. Сходная тенденция отмечена для низинных сфагнов, хотя они проявляют некоторую активность к захвату Мо и V. Выявленные различия флористического состава и биогеохимической специализации лугов и болот усиливают дифференциацию гетерономных звеньев катен.

Выводы:

– внутренняя неоднородность монолитных катен озерно-зандровых равнин Озерной Мещеры обусловлена особенностями их миграционной структуры и нисходящими латеральными водными потоками. Они создают предпосылки для увеличения гидроморфности, трофности местообитаний в нижних звеньях и появления элементарных ландшафтов с разной биогеохимической специализацией фитоценозов, которая меняется в зависимости от сочетания видов, отличающихся по активности биологического поглощения элементов. Это отражается на трансформации состава парагенных ассоциаций в фитомассе и нарушает континуальность биогеохимического поля, формирующегося в растительном покрове верхних звеньев катен;

– большинство растений характеризуется повышенной способностью к поглощению катионогенных элементов по сравнению с анионогенными, хотя соотношение степеней их накопления различается у видов разных систематических групп. К числу гумидокатных относятся доминанты древесного и кустарничкового ярусов. При низкой зольности кустарнички семейства вересковых и хвоя деревьев выделяются высокой общей активностью к поглощению микроэлементов, в 15–25 раз интенсивнее накапливая катионогенные элементы. Сходная ситуация зафиксирована у бореального мелкотравья, папоротников и хвощей, которые отличаются повышенной зольностью и поглощением катионогенных элементов. Центры видообразования многих из названных видов связаны с гумидными ландшафтами юрских и третичных лесов, что определило их катионофильную филогенетическую специализацию. В полесских ландшафтах они доминируют в фитоценозах автономных (Н-класс) и супераквальных (Н-Fe-класс) элементарных ландшафтах с сосновыми и елово-сосновыми лесами;

– появление лугов в супераквальных ландшафтах Н-Fe-класса сопровождается трансформацией биогеохимической структуры фитоценозов в связи с сочетанием катионофильных видов из разнотравья и переходной группы видов из злаковых, отличающихся увеличением захвата анионогенных элементов. Тенденция изменения биогеохимической специализации фитоценозов в гетерономных звеньях катен не является однонаправленной, так как при росте гидроморфности и появлении осоковых болот профилирующая роль в парагенной ассоциации фитомассы опять переходит к катионогенным элементам;

– различия структурно-функциональной организации фитоценозов и филогенетическая специализация растений оказывают влияние на своеобразие фитобарьеров в полесских ландшафтах. В верхних звеньях катен четко выражена катионофильная спе-

циализация фитобарьера, вклад в формирование которого вносят все ярусы сосновых лесов автономных комплексов Н-класса. Относительная однородность их биогеохимического поля нарушается в переходной зоне от лесных элементарных ландшафтов к болотным Н-Fe-класса, где появляется латеральный барьер, связанный с полосой влажных и сырых лугов. Его роль заключается в перехвате и включении в БИК не только типично катионогенных (Mn, Ba, Zn), но и анионогенных (Mo) элементов. Емкость фитобарьера травяных низинных болот повышается в связи с увеличением биопродукции и запаса зольных элементов, что ограничивает потерю вещества в неполных сопряжениях. Пространственное соседство фитоценозов с различной биогеохимической специализацией, появление латеральных барьерных зон отражают роль биогенной миграции в усилении контрастности и гетерогенности катен.

Благодарности. Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ (проект № 1505-06468).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Авессаломова И.А.* Катенарная геохимическая организация таежных ландшафтов Восточно-Европейской равнины // Геохимия ландшафтов и география почв. М.: АПР, 2012. С. 97–117.
- Авессаломова И.А.* Биогеохимия ландшафтов. М.: Географический факультет МГУ, 2007. 162 с.
- Авессаломова И.А., Микляева И.М.* Структурно-функциональные особенности лугов и болот в ландшафтах Центральной Мещеры // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. Геогр. 1997. № 1. С. 43–48.
- Айвазян А.Д., Касимов Н.С.* О геохимической специализации растений // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. Геогр. 1979. № 3. С. 42–474.
- Баргальи Р.* Биогеохимия наземных растений. М.: ГЕОС, 2005. 457 с.
- Биологическая флора Московской области. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1980. Вып. 5. 192 с.
- Биологическая флора Московской области. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1990. Вып. 8. 272 с.
- Биологическая флора Московской области. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1993. Вып. 9. Часть 1. 112 с.
- Виноградов А.П.* Среднее содержание химических элементов в главных типах изверженных горных пород земной коры // Геохимия. 1962. № 7. С. 555–571.
- Глазовская М.А.* Биогеохимическая организованность экологического пространства в природных и антропогенных ландшафтах как критерий их устойчивости // Известия РАН. Сер. географическая. 1992. № 5. С. 5–12.
- Глазовская М.А.* Геохимические барьеры в почвах: типология, функциональные особенности и экологическое значение // Геохимия ландшафтов и география почв. М.: АПР, 2012. С. 26–44.
- Добровольский В.В.* Основы биогеохимии. М.: Изд. Центр «Академия», 2003. 342 с.
- Кабата-Пендиас А., Пендиас Х.* Микроэлементы в почвах и растениях. М.: Мир, 1989. 439 с.
- Касимов Н.С., Лычагин М.Ю., Чалов С.Р., Шинкарева Г.Л.* Парагенетические ассоциации элементов в ландшафтах // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. Геогр. 2019. № 6. С. 20–28.
- Кист А.А.* Феноменология биогеохимии и бионеорганической химии. Ташкент: ФАН, 1987. 236 с.
- Кривцов В.А., Тобратов С.А., Водорезов А.В. и др.* Природный потенциал ландшафтов Рязанской области. Рязань: Изд-во Ряз. гос. ун-та имени С.А. Есенина, 2011. 768 с.
- Перельман А.И.* Геохимический ландшафт как самоорганизующаяся система // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. Геогр. 1995. № 4. С. 10–16.
- Перельман А.И., Касимов Н.С.* Геохимия ландшафта. М.: Астрель – 2000, 1999. 768 с.
- Школьник М.Я.* Микроэлементы в жизни растений. Л.: Наука, 1974. 324 с.
- Avessalomova I.A., Khoroshev A.V., Savenko A.V.* Barrier function of floodplain and riparian landscapes in river runoff formation. Pokrovsky O.S. (ed.). *Riparian zones. Characteristics, management practices, and ecological impacts.* New York, Nova Science Publishers, 2016, p. 181–210.
- Bowen H.J.M.* Trace elements in biochemistry. London; New York, Academic Press, 1966, 256 p.
- Fortescue J.A.C.* Environmental Geochemistry. A Holistic Approach. New York–Heidelberg–Berlin: Springer Verlag, 1980, 347 p.
- Kabata-Pendias A.* Trace elements in soils and plants. L., N.-Y.: CRC Press, 2011, 505 p.

Поступила в редакцию 05.03.2020

После доработки 16.05.2020

Принята к публикации 06.07.2020

I.A. Avessalomova¹

BIOGEOCHEMICAL SPECIALIZATION OF PLANTS IN POLESYE LANDSCAPES OF THE MESCHERA LAKELAND

We employ an approach that reveals the heterogeneity of the inner landscape space which manifests itself by different sets of elementary landscapes in neighboring catenas. The assessment of biogeochemical diversity requires analyzing the absorption of chemical elements by plants of various systematic groups, considering the origin of the species and their relations with the ecological and geochemical conditions of edaphotopes. The biogeochemical specialization of plants was studied in the southern taiga Polesye landscapes of the Meshchera lakeland. Geochemical sampling was carried out by catenas. The analytical data were interpreted using a complex of special indicators, i. e. the ash content in the plants and the intensity of biological absorption of elements, with resulting classification of the plants under study. Lower ash content is typical of boreal dwarf shrubs and mosses. The low ash content in the archegonial species agree well with their occurrence in the forests with a conservative type of biological cycle that existed in the paleophyte and mesophyte. The spruce is found in rich habitats and shows the higher ash content in its needles compared to pine ones. An increase in the species diversity in line with the ability to accumulate ash elements was revealed for angiosperms. As judged by the activity of absorption of trace elements most of the plants of the Polesye landscapes have a cationophilic specialization. These include the dominant trees of coniferous forests, heather dwarf shrubs, boreal small grasses, ferns, and horsetails. Their relation with the Jurassic and Tertiary centers of speciation in humid forest landscapes is shown. They prevail in the upper sections of catenas in Polesye landscapes. Representatives of ancient (mosses) and young (grasses and some sedges) floras show less pronounced differences in the accumulation of cationogenic and anionogenic elements. They dominate super-aquatic meadow and bog landscapes in the lower sections of catenas. The biogeochemical specialization of phytocenoses and their particular layers, as well as their barrier functions vary with their species composition. Common cationogenic specialization of tree and dwarf shrub layers was revealed for the pine dwarf shrub-green moss forests. It ensures fixation of biogenic elements (Mn, Zn etc.) on the phytobarrier and reduces their loss under the acid leaching. The moss cover specializes in the accumulation of V, Cr and Ti. The association of accumulated elements is somewhat different in meadows and swamps, thus increasing the heterogeneity and contrast of the catenas.

Key words: phylogenic specialization of plants, species composition of phytocenoses, cationogenic and anionogenic elements, biologic uptake series, biogeochemical activity of species, phytobarriers

Acknowledgements. The study was financially supported by the Russian Foundation for Basic Research (project no. 1505-06468).

REFERENCES

- Ajvazjan A.D., Kasimov N.S. O geohimicheskoy specializatsii rastenij [On geochemical specialization of plants]. *Vestn. Mosk. un-ta, Ser. 5, Geogr.*, 1979, no. 3, p. 42–47. (In Russian)
- Avessalomova I.A. *Biogeokhimiya landshafta* [Landscape biogeochemistry]. Moscow, MSU Faculty of Geography Publ., 2007, 162 p. (In Russian)
- Avessalomova I.A. Catenary geochemical organization of taiga landscapes in the East European Plain. *Geohimiya landshaftov i geografiya pochv* [Landscape geochemistry and soil geography]. Moscow, APR, 2012, p. 97–117.
- Avessalomova I.A., Khoroshev A.V., Savenko A.V. Barrier function of floodplain and riparian landscapes in river runoff formation // Pokrovsky O.S. (ed.). *Riparian zones. Characteristics, management practices, and ecological impacts*. Nova Science Publishers, New York, 2016, p. 181–210.
- Avessalomova I.A., Mikljaeva I.M. Strukturno-funkcional'nye osobennosti lugov i bolot v landshaftah Central'noj Meshchery [Structural and functional features of meadows and swamps in the landscapes of Central Meschera]. *Vestn. Mosk. un-ta, Ser. 5, Geogr.*, 1997, no. 1, p. 43–48. (In Russian)
- Bargagli R. *Biogeohimija nazemnyh rastenij*. [Biogeochemistry of terrestrial plants]. Moscow, GEOS, 2005, 457 p. (In Russian)
- Biologicheskaja flora Moskovskoj oblasti* [Biological flora of the Moscow region]. Moscow University Publ., 1980, iss. 5, 192 p. (In Russian)
- Biologicheskaja flora Moskovskoj oblasti* [Biological flora of the Moscow region]. Moscow University Publ., 1990, iss. 8, 272 p. (In Russian)
- Biologicheskaja flora Moskovskoj oblasti* [Biological flora of the Moscow region]. Moscow University Publ., 1993, iss. 9, chast. 1, 112 p. (In Russian)
- Bowen H.J.M. *Trace elements in biochemistry*. London; New York, Academic Press, 1966, 256 p.
- Dobrovol'skiy V.V. *Osnovy biogeokhimii*. [Fundamentals of biochemistry]. Moscow, Publishing center «Akademija», 2003, 342 p. (In Russian)
- Fortescue J.A.C. *Environmental Geochemistry. A Holistic Approach*. New York-Heidelberg-Berlin: Springer Verlag, 1980, 347 p.
- Glazovskaja M.A. [Geochemical barriers in soils: taxonomy, functioning, and significance for the environment] *Geohimija landshaftov i geografiya pochv* [Landscape geochemistry and soil geography]. Moscow, APR, 2012, p. 26–44. (In Russian)
- Glazovskaja M.A. Biogeohimicheskaja organizovannost' ekologicheskogo prostranstva v prirodnyh i antropogennyh

¹ Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Department of Physical Geography and Landscape Science, Associate Professor, PhD. in Geography; e-mail: aiageo@yandex.ru

landshaftah kak kriterij ih ustojchivosti [Biogeochemical organization of ecological space in natural and anthropogenic landscapes as an indicator of their resistance]. *Izv. RAN, Ser. Geograficheskaya*, 1992, no. 5, p. 5–12. (In Russian)

Kabata-Pendias A. Trace elements in soils and plants. L, N.-Y., CRC Press, 2011, 505 p.

Kasimov N.S., Lychagin M.Yu., Chalov S.R., Shinkareva G.L. Parageneticheskie assotsiatsii elementov v landshaftakh [Paragenetic associations of chemical elements in landscapes]. *Vestn. Mosk. un-ta, Ser. 5, Geogr.*, 2019, no. 6, p. 20–28. (In Russian)

Kist A.A. Fenomenologija biogeohimii i bioneorganicheskoy himii [Phenomenology of biogeochemistry and bioinorganic chemistry]. Tashkent, FAN, 1987, 236 p. (In Russian)

Krivicov V.A., Tobratov S.A., Vodoretzov A.V. et al. Prirodnyj potencial landshaftov Rjazanskoj oblasti [Natural potential of

landscapes of the Ryazan region]. S.A. Esenin Ryazan State Univ. Publ., 2011, 768 p. (In Russian)

Perel'man A.I. Geohimicheskij landschaft kak samoorganizujushchajasja sistema [Geochemical landscape as a self-organizing system]. *Vestn. Mosk. un-ta, Ser. 5, Geogr.*, 1995, no. 4, p. 10–16. (In Russian)

Perel'man A.I., Kasimov N.S. Geohimija landshafta [Landscape geochemistry]. Moscow, «Astreja – 2000», 1999, 768 p. (In Russian)

Shkol'nik M.Ya. Mikroelementy v zhizni rastenij [Trace elements in plants' life]. Leningrad, Nauka Publ., 1974, 324 p. (In Russian)

Vinogradov A.P. Srednee sodержanie himicheskikh elementov v glavnyh tipah izverzhennyh gornyh porod zemnoj kory [Mean concentrations of chemical elements in the principal types of igneous rocks of the Earth's crust]. *Geohimiya*, 1962, no. 7, p. 555–571. (In Russian)

Received 05.03.2020

Revised 16.05.2020

Accepted 06.07.2020