

УДК 581.5*631.41

ИЗМЕНЕНИЕ СОСТАВА ПРИРОДНЫХ ВОД В СИСТЕМЕ «АТМОСФЕРНЫЕ ОСАДКИ — ПОЧВЕННЫЕ РАСТВОРЫ — ПОЧВЕННО-ГРУНТОВЫЕ ВОДЫ — ПОВЕРХНОСТНЫЕ ВОДЫ» НА ПРИМЕРЕ ЛАНДШАФТОВ р. КЛЯЗЬМЫ

Н. И. Жилин, Л. Г. Богатырев, А. И. Бенедиктова, Д. В. Ладонин, М. М. Карпухин,
Ф. И. Земсков, В. М. Телеснина, А. Н. Вартанов, Д. Д. Госсе, В. В. Демин

МГУ имени М.В. Ломоносова, факультет почвоведения, 119991, Россия, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 12

* E-mail: zhilinnik@yandex.ru

В пределах ландшафтов верхнего течения р. Клязьмы изучен многолетний компонентный состав природных вод в системе *снеговые воды — почвенные растворы — почвенно-грунтовые воды — поверхностные воды*. Установлено, что закономерное превышение содержания основных макро- и микроэлементов в почвенных растворах по сравнению со снеговыми водами на последующих этапах вначале сменяется увеличением концентрации компонентов в почвенно-грунтовых водах, с последующим снижением содержания в поверхностных водах — ручьях и речных водах. Показано, что относительно высокая подвижность натрия, магния, калия и кальция, а из анионов хлорид- и нитрат-ионов сопровождается существенным уменьшением подвижности элементов семейства железа, меди и цинка на переходе от почвенно-грунтовых вод к поверхностным водам. Это объясняет широкое распространение сегрегированных форм, представленных в виде ортштейнов в почвах полугидроморфных ландшафтов, вплоть до ортзандов, а в заболоченных условиях притеррасных понижений на границе с супераквальным ландшафтом — формирование типичных болотных руд. Таким образом, анализ состава природных вод и его изменения служит не только хорошим, но и необходимым инструментом для объяснения особенностей миграции элементов в системе «почвы — природные воды» и выявления механизма формирования почвенных новообразований.

Ключевые слова: снеговые воды, макроэлементы, микроэлементы, новообразования, миграция, почвы.

Введение

В настоящее время составу поверхностных вод уделяется пристальное внимание, что обусловлено как изучением природных процессов, так и задачами в области мониторинга окружающей среды. В современной научной литературе детально рассматриваются вопросы параметризации качества природных вод [2], типы распределения микроэлементов в устьевых областях рек [14], проблемы биоиндикации природных вод [15]. Обобщения последних лет касаются распределения микроэлементов в поверхностных водах суши [10] и в водах малых озер [6]. Широко представлена география исследований природных вод — от зоны эффузионно-осадочного литогенеза [1] до водных объектов южно-таежной зоны Русской равнины [7, 12, 13, 16], включая характер сопряжения гидродинамического и химического равновесия [19]. Анализируются механизмы естественного и антропогенного влияния на характер миграции элементов [22]. Интерес представляют публикации, рассматривающие поведение микроэлементов в речных водах, включая вопросы моделирования и прогнозирования [18].

Исследование почвенных растворов проводится в различных направлениях, включая методику извлечения почвенных растворов [17, 21], использование микродиализа [20], анализа поведения тяжелых металлов [24]. Только в некоторых работах проводят сопоставление грунтовых и поверхностных вод [23].

Вместе с тем на этом богатом информационном фоне явно отсутствуют работы, посвященные изменению состава природных вод в системе «атмосферные осадки — почвенные растворы — почвенно-грунтовые воды — поверхностные воды». Между тем эти исследования позволяют оценить роль почв как биогеохимических барьеров на пути миграции макро- и микроэлементов в ряду сопряженных геохимических ландшафтов. В связи с этим настоящая работа посвящена изучению особенностей изменения природных вод в системе «снеговые воды — почвенные растворы — почвенно-грунтовые воды — поверхностные воды» для условий типичных геохимических ландшафтов зоны хвойно-широколиственных лесов в пределах верхнего течения р. Клязьмы. В основу настоящей статьи положены результаты многолетних исследований химического состава природных вод.

Материалы и методы

Объектами послужили ландшафты в пределах верхнего течения р. Клязьмы, географически расположенные в пределах Солнечногорского района Московской области на территории Учебно-опытного почвенно-экологического центра (УОПЭЦ) «Чашниково» и относящиеся к зоне распространения покровных суглинков, подстилаемых моренной. Для изучаемой территории характерен волнисто-холмистый рельеф [8]. Особенность супераквальных ландшафтов заключается в том, что пойма Клязьмы представляет собой древнюю ледниковую ложбину со специфическими озерными расширениями. Повышенные элементы поймы заняты обычными аллювиальными почвами, тогда как на пониженных участках близко к поверхности залегают древние торфяники, а в притеррасной части диагностируются вторично отложенные карбонаты [5]. Катена «Клязьма», представляющая собой гетеролитную катену, характеризуется системой элювиальных и транзитных ландшафтов, сложенных покровными суглинками, подстилаемых моренной, которые в супераквальных позициях сменяются аллювиальными отложениями (рис. 1). Изменение растительного покрова в пределах катены заключается в смене лесной или суходольно-луговой растительности автономных ландшафтов на луговую растительность подчиненных ландшафтов, представленных поймой.

Для элювиального ландшафта (разрез 1) характерна суходольно-луговая растительность, образованная на месте выведенной из использования пашни [9]. В травостое преобладают виды, типичные для суходольных лугов, характерные для луговой стадии демулационной сукцессии. Помимо чисто луговых видов — овсяница луговая (*Festuca pratense* Huds), тимофеевка луговая (*Phleum pratense* L.), клевер луговой (*Trifolium pratense* L.), встречаются сорно-рудеральные — бодяк полевой (*Cirsium*

arvense L.), пикульник красивый (*Galeopsis speciosa* Mill.). Почвы здесь развиваются по элювиально-иллювиальному типу и представлены обычными дерново-подзолистыми старопашотными почвами и глубоким залеганием почвенно-грунтовых вод (более 1,5 м).

Для относительно ненарушенных транзитных ландшафтов (разрез 2) характерны ельники-кисличники с подростом из клена (*Acer platanoides* L.) и подлеском с преобладанием лещины обыкновенной (*Corylus avellana* (L.) H. Karst). В травяном ярусе преобладают как бореальные виды (*Oxalis acetosella* L.), так и неморальные — зеленчук желтый (*Galeobdolon luteum* L.), звездчатка жестколистная (*Stellaria holostae* L.). Показательно наличие сорно-рудеральных видов, что связано с близким расположением сельскохозяйственных угодий: крапива двудомная (*Urtica dioica* L.), пикульник красивый, а также видов нитрофильных теневых свит [11], например, селезеночник очереднолистный (*Chrysosplenium alternifolium* L.). Обычно здесь развиваются дерново-подзолистые почвы, но с близким залеганием морены в силу приуроченности к транзитным условиям. Уровень почвенно-грунтовых вод в пределах этого элементарного ландшафта нередко варьирует — от 1,5 м в обычных условиях и до 1 м в пониженных элементах микрорельефа.

В супераквальном ландшафте развита растительность, свойственная пойменным территориям с характерной дифференциацией, обусловленной историей развития поймы. Так, для условий притеррасного понижения типичен пойменный луг с характерной для него высокой продуктивностью травостоя. Как надземная, так и подземная фитомасса довольно высока по сравнению с суходольным лугом. Состав травостоя представлен таволгой вязолистной (*Filipendula ulmaria* (L.) Maxim), иван-чаем узколистным (*Chamaenerion angustifolium* L.), крапивой двудомной. Основной особенностью генезиса почв, развивающихся в этих условиях

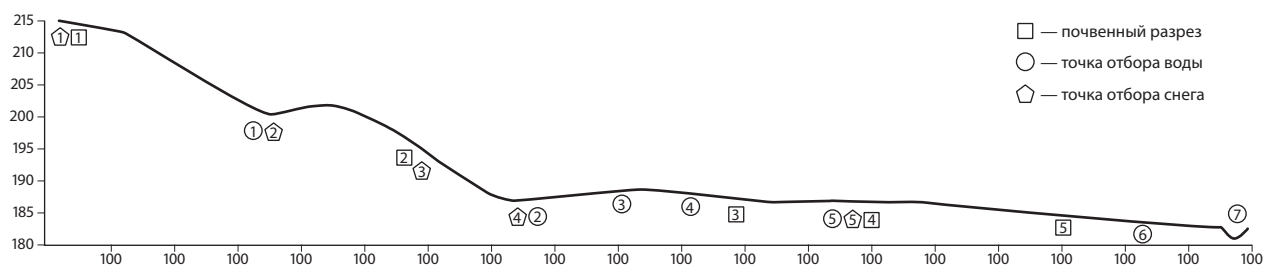


Рис. 1. Почвенно-геохимическая катена «Клязьма». Указаны точки отбора образцов почвы, воды и снега

Почвенные разрезы:

- Разрез 1. Дерново-подзолистая глубокопахотная.
- Разрез 2. Дерново-подзолистая среднесуглинистая.
- Разрез 3. Лугово-болотная окарбонатная.
- Разрез 4. Аллювиально-луговая освоенная.
- Разрез 5. Аллювиально-луговая на погребенных торфах.

Точки отбора снега.

- 1. Элювиальный ландшафт.
- 2. Транзитно-аккумулятивный.
- 3. Транзитный ландшафт.
- 4. Транзитно-аккумулятивный.
- 5. Супераквальный ландшафт.

Точки отбора воды:

- 1. Ольгин пруд.
- 2. Общекарбонатный ручей.
- 3. Карбонатный родник.
- 4. Карбонатный ручей.
- 5. Торфяной пруд.
- 6. Бобровый ручей.
- 7. Река Клязьма.

(разрез 3), следует назвать формирование здесь почв лугово-болотного ряда с характерной высокой окарбоначенностью профиля и соответствующим вскипанием самых верхних горизонтов и уровнем почвенно-грунтовых вод в пределах 1 м.

Для центральных участков поймы характерны луга, в травостое которых преобладают крапива двудомная, лисохвост луговой (*Alopecurus pratensis* L.), пырей ползучий (*Elytrigia repens* (L.) Desv. Ex Nevski), герань луговая (*Geranium pratense* L.) — виды, соответствующие оптимальным условиям увлажнения и трофности. Продуктивность травостоя несколько меньше, чем в притеррасной пойме, но выше, чем на суходольном лугу. В соответствии с условиями здесь развиваются аллювиальные почвы (разрез 5), характеризующиеся интенсивным накоплением гумуса и, как правило, развивающиеся на аллювиальных отложениях, нередко облегченного гранулометрического состава и при глубоком залегании почвенно-грунтовых вод (более 1,3 м) с обычным варьированием в зависимости от условий года.

Для пониженных элементов поймы характерна луговая растительность, но отличающаяся от других элементов центральной части поймы в силу постоянного повышенного увлажнения. В травостое появляются валериана лекарственная (*Valeriana officinalis* L.), тростник обыкновенный (*Phragmites communis* (Cav.) Trin ex Steud). Для почвенного профиля (разрез 6) характерно близкое залегание почвенно-грунтовых вод в пределах 1 м и подстиание в пределах этой же глубины древними торфяниками.

Таким образом, почвенный покров в пределах катены закономерно изменяется от дерново-подзолистых почв в условиях элювиальных и транзитных ландшафтов до аллювиальных почв, приуроченных к супераквальному ландшафту. На фоне морфологической близости строения почв элювиальных и транзитных ландшафтов, для условий супераквального ландшафта, напротив, обнаруживается пространственная дифференциация почвенного покрова. Первая причина обусловлена более чем 60-летним по времени выходом поймы из поемного режима. Вторая причина носит геохимический характер и обусловлена выносом растворимых бикарбонатов из пределов автоморфных ландшафтов и последующим их осаждением в притеррасной части поймы, что сопровождается формированием в профиле почвы карбонатных и ожелезненных прослоек. В то же время почвенный покров поймы продолжает оставаться в полугидроморфной стадии развития, вследствие слабого врезания р. Клязьмы. Это подтверждается близким залеганием к поверхности почвенно-грунтовых вод для условий притеррасья, где развиваются лугово-болотные окарбоначенные почвы, и в понижениях центральной части поймы, причем в обоих случаях верховодка обнаруживается в пределах метровой толщи. Уровень гидромор-

физма супераквального ландшафта был бы более значительным, если бы отсутствовала сеть осушительных канав и ручьев, относительно дренирующих в настоящее время пойму.

Методика исследований. Снеговой покров изучался в течение 2014–2018 гг. в границах описанной выше катены «Клязьма». В каждом из элементарных ландшафтов измерение высоты снегового покрова сочеталось с последовательным отбором снега для изучения содержания основных компонентов [4]. В работе использовали средние многолетние данные по химическому составу водного эквивалента снежного покрова (ВЭСП). Для характеристики почвенных растворов в летний период в пределах катены (см. рис. 1) закладывались полнопрофильные разрезы с отбором образцов из каждого генетического горизонта и последующим приготовлением почвенной вытяжки из свежих образцов. Среднее содержание компонентов в водных вытяжках, условно принятых за почвенные растворы, рассчитывалось с учетом концентраций элементов в каждом почвенном горизонте. Почвенно-грунтовые воды отбирались в условиях элювиального и супераквального ландшафта катены «Клязьма». В последнем ландшафте почвенно-грунтовые воды охарактеризованы для притеррасной, центральной и пониженной частей поймы. Поверхностные воды — ручьи, пруды — изучали также в пределах катены. В качестве объектов были выбраны два пруда. Первый (Ольгин пруд) был приурочен ко второй террасе, тогда как второй (Торфяной пруд) располагался на границе первой террасы и поймы. В супераквальном ландшафте анализировались ручьи, дренирующие пойму и р. Клязьму с ее притоком Бобровый ручей.

Лабораторные методы исследования. Образцы снега в лаборатории фильтровали и затем анализировали. Почвенные вытяжки анализировались по стандартной методике [3]. Анализ катионов в снеговых водах, почвенных вытяжках, почвенно-грунтовых водах и природных водах проводился на базе использования атомно-абсорбционного спектрофотометра contrAA 300 фирмы «AnalytikJena», а анионов — на основе спектрометра с индуктивно связанной плазмой Agilent ICPMS 7500a. Полученные результаты были обработаны методами статистики на основе программы Statistica. Расчеты доверительных границ среднего арифметического позволили оценить степень варьирования содержания важнейших компонентов.

Результаты

Химический состав снеговых вод характеризуется низкой минерализацией при преобладании катиона кальция и следующих за ним натрия и магния. В составе анионов равновеликая роль принадлежит хлорид- и нитрат-иону при несколько меньшей концентрации сульфат-иона. Низкие величины характерны для содержания углерода.

Среди микроэлементов обращают на себя внимание цинк и стронций, чье содержание несколько выше по сравнению с другими микроэлементами. Отмечается низкое, по сравнению с почвенными растворами, содержание железа и марганца.

Химический состав почвенных растворов в почвах катены «Клязьма». Сопоставление состава почвенных растворов разреза 1 и разреза 2, характеризующих соответственно элювиальный и транзитный ландшафт, показало, что содержание макро- и микроэлементов в почвах сравниваемых ландшафтов одного порядка. Более высокое содержание углерода в почвенных растворах почв транзитного ландшафта (разрез 2) объясняется их формированием в условиях лесного биогеоценоза, характеризующегося повышенной трофностью, хорошо сформированной подстилкой и высокой гумусированностью почвенного профиля в отличие от почвы элювиального ландшафта (табл. 1). Данные, приводимые в таблице 1, позволяют оценить степень варьирования содержания того или иного компонента.

В притеррасной части поймы (разрез 3), с ее высокой окарбоначенностью почвенного профиля, в почвенных растворах обнаруживается относитель-

но высокое содержание кальция, магния и калия по сравнению со всеми другими почвами изучаемого геохимического ландшафта. Высокое содержание кальция обуславливает осаждение значительной части микроэлементов, в том числе железа, что морфологически приводит к чередованию в профиле карбонатных и ожелезненных прослоек, как правило, охристых тонов. Отметим, что в отличие от железа среднее содержание марганца в почвенных растворах здесь сопоставимо с растворами, выделенными из почв аллювиально-луговой почвы, развивающейся на погребенных торфах.

Снижение содержания большинства катионов и анионов обнаруживается в почвенных растворах почвы (разрез 4), развивающейся на приподнятой части центральной поймы, которая уже вступила в автоморфную стадию развития. Об этом, в частности, свидетельствует поселение здесь молодых елей. Снижение активного участия в процессах почвообразования почвенно-грунтовых вод не могло не оказать влияние на современный состав почвенных растворов. Обращает на себя внимание высокое варьирование содержания кальция, железа, стронция и меди.

Таблица 1

Среднее (по генетическим горизонтам, при $p = 0,05$) содержание макро- и микроэлементов в водных вытяжках почв почвенно-геохимической катены «Клязьма» ($n = 31$), 20 июля 2016 г.

Компоненты	Элювиальный		Транзитный		Супераккумулятивный					
	разрез 1 (<i>n</i> = 7)		разрез 2 (<i>n</i> = 7)		разрез 3 (<i>n</i> = 6)		разрез 4, (<i>n</i> =6)		разрез 5 (<i>n</i> = 5)	
					притеррасное понижение		центральная часть поймы		понижение в пойме	
	Название почвы									
	Дерново-подзолистая глубокопахотная		Дерново-подзолистая среднесуглинистая		Лугово-болотная окарбоначенная		Аллювиально- луговая освоенная		Аллювиально-луговая на погребенных торфах	
	<i>M</i>	<i>tm</i>	<i>M</i>	<i>tm</i>	<i>M</i>	<i>tm</i>	<i>M</i>	<i>tm</i>	<i>M</i>	<i>tm</i>
мг/л										
Na	3,7	0,6	3,9	0,3	5,5	5,9	3,9	1,1	9,6	8,7
Mg	0,7	0,2	0,9	0,3	4,0	4,8	1,0	0,9	2,8	5,3
K	0,4	0,3	0,7	0,2	1,6	0,9	1,2	0,9	0,6	0,2
Ca	1,3	0,4	2,4	1,4	14,7	16,1	2,5	1,7	9,2	20,8
Cl ⁻	0,5	0,1	0,5	0,1	1,1	1,6	0,6	0,5	1,4	1,7
NO ₃ ⁻	0,1	0,3	0,3	0,1	1,3	0,4	0,1	0,02	4,2	3,3
PO ₄ ²⁻	Сл.	Сл.	0,001	0,003	Сл.	Сл.	0,04	Сл.	Сл.	Сл.
SO ₄ ²⁻	0,7	0,4	0,7	0,1	2,5	3,9	0,3	0,2	4,7	5,6
C	4,6	1,8	7,1	5,3	8,1	6,7	6,3	1,2	36,6	51,1
мкг/л										
Mn	17,2	8,3	21,5	6,6	40,8	52,0	25,3	9,4	42,7	41,7
Fe	651,2	484,8	328,4	266,3	645,0	1182,9	1509,3	810,0	1765,9	1616,7
Cr	2,6	1,6	1,8	1,8	1,2	0,8	2,3	1,7	4,7	8,2
Cu	5,9	1,2	7,3	3,1	10,7	11,1	8,0	1,9	15,6	10,8
Zn	28,9	9,7	33,4	6,1	88,5	42,5	34,2	7,3	148,5	33,2
Sr	10,6	4,5	11,6	5,5	47,3	56,2	16,4	6,1	133,3	227,2

Обозначения: *M* — среднее арифметическое; *t* — критерий Стьюдента при $p = 0,05$; *tm* — ошибка среднего арифметического; Сл. — следовое содержание компонента.

Существенное увеличение ряда макроэлементов, включая содержание натрия и железа, хлорида, а среди микроэлементов — хрома, меди, цинка и стронция, характеризует почвенные растворы элювиально-луговых почв на погребенных торфах. Это объясняется близким залеганием (1 м) почвенно-грунтовых вод и погребенного торфяника, что обеспечивает постоянное поступление в почвенный профиль важнейших макро- и микроэлементов, включая углерод. Высокие величины надземной биомассы разнотравья и злаков обеспечивают ежегодное поступление биофильных элементов. Этим же объясняется хорошая оструктуренность верхнего гумусового горизонта, вплоть до зернистой структуры, в сочетании с высоким содержанием гумуса.

Таким образом, в пределах катены основные закономерности изменения состава почвенных растворов сводятся к увеличению концентраций элементов от почв элювиальных и транзитных ландшафтов к последующему увеличению щелочных и щелочно-земельных элементов в условиях супе-

раквального ландшафта. Снижение концентраций элементов в почвенных растворах почв приподнятых участков супераквального ландшафта сопровождается характерным для этих условий снижением уровня гидроморфизма. Возрастание концентрации элементов в почвенных растворах почв обнаруживается в условиях пониженных полугидроморфных участков супераквального ландшафта. Если первое возрастание содержания макро- и микроэлементов в условиях лугово-болотных окарбонированных почв совпадает с выклинивающимися здесь карбонатными водами и частично с поступлением элементов, не удерживаемых в биологическом круговороте в элювиальных и транзитных ландшафтах, то второе диагностируемое увеличение, обнаруживаемое для пониженных элементов поймы, обусловлено повышенным гидроморфизмом. Следовательно, пространственная контрастность элементарных ландшафтов геохимического ландшафта в отношении важнейших макро- и микроэлементов, содержащихся в почвенных растворах почв, объясняется не только их последовательной геохимической под-

Таблица 2

Характеристика почвенно-грунтовых вод в летний период, среднее за 2015–2016 гг. ($n = 12$)

Компоненты	Почвенно-геохимическая катена «Клязьма»			
	Элювиальный ландшафт	Супераквальный ландшафт		
	Водораздел	Пойма		
		Притеррасная часть	Центральная часть	
			повышенная	пониженная
	Дерново-подзолистые	Лугово-болотные окарбонированные	Аллювиально-луговые	Аллювиально-луговые на торфах
pH	6,8	7,4	6,9	7,4
σ , мСм/см	0,5	0,7	0,6	0,3
Мутность, ЕМФ	52,6	344,9	327,1	107,4
Цветность, градусы	172,6	106,3	549,2	903,6
Сух. ост., мг/л	н/д	340,4	259,2	382,1
Макроэлементы, мг/л				
Na	4,9	4,7	4,6	5
Mg	11,8	13,3	15,5	9
K	8	0,9	0,8	1,2
Ca	54,6	120,1	90,4	47,3
C	13	4,7	41,1	67,7
Cl ⁻	4	19,5	6,5	3,7
NO ³⁻	0,4	3,9	7,9	0,04
SO ₄ ²⁻	27,8	36	11,8	2,7
Микроэлементы, мкг/л				
Mn	725,7	49,4	84,3	33,4
Fe	452,8	391,2	878,9	2323,3
Cr	н/д	0,5	3,9	3,8
Cu	8,3	1,7	7,9	13,1
Zn	Сл.	0,9	Сл.	13,9
Sr	н/д	230,5	383,1	277,8

чиненностью, но и двумя геохимическими барьерами. Притеррасная часть поймы характеризуется карбонатным барьером, тогда как второй — био-геохимический барьер — в условиях понижений центральной поймы определяется высоким современным накоплением органического вещества в сочетании с близким залеганием древних торфяников в условиях высокого уровня грунтовых вод.

Сформулированные выше закономерности, описывающие изменение состава почвенных растворов в системе почв сопряженных ландшафтов, основываются на анализе средних величин. Между тем для каждой почвы в пределах элементарного ландшафта характерно высокое варьирование основных компонентов в почвенных растворах, подчас не позволяющее сделать заключение о достоверных различиях средних арифметических со смежными почвами (табл. 1).

С одной стороны, это закономерно, так как говорит о принадлежности почв всей геохимической катены к одной геохимической общности, нарушаемой карбонатностью, присущей в максимальной степени притеррасной части поймы. Но это отнюдь не означает заключения об интегральной направленности в изменении концентрации компонентов в почвенных растворах почв в системе сопряженных элементарных ландшафтов. Более значительная контрастность была бы присуща в случае резкого различия геохимической специфики в системе почв сопряженного геохимического ландшафта.

О составе почвенно-грунтовых вод. Наиболее общей тенденцией изменения среднегодового состава почвенно-грунтовых вод в сопряженном геохимическом ландшафте является закономерное возрастание степени минерализации от элювиального к супераквальному ландшафту, за исключением довольно незначительного изменения в содержании таких катионов, как натрий и магний (табл. 2).

Максимальное содержание кальция, а среди анионов — хлорид- и сульфат-ионов обнаруживается в почвенно-грунтовых водах притеррасной части супераквального ландшафта с лугово-болотными окисленными почвами. Отмечается существенное увеличение содержания железа, меди и цинка в почвенно-грунтовых водах пониженных элементов центральной части поймы. Поведение углерода сводится к его заметному увеличению в почвенно-грунтовых водах центральной части поймы и понижениях супераквального ландшафта при относительно низких величинах, диагностируемых в почвенно-грунтовых водах элювиальных ландшафтов.

Таким образом, состав почвенно-грунтовых вод детерминирован положением почв, развивающихся в пределах сопряженных элементарных ландшафтов, и следует за особенностями сформированных биогеохимических барьеров, представленных в пределах супераквального ландшафта карбонатным барьером в притеррасной части поймы и барьером, обусловленным близким залеганием торфянистой толщи, в пониженной части центральной поймы.

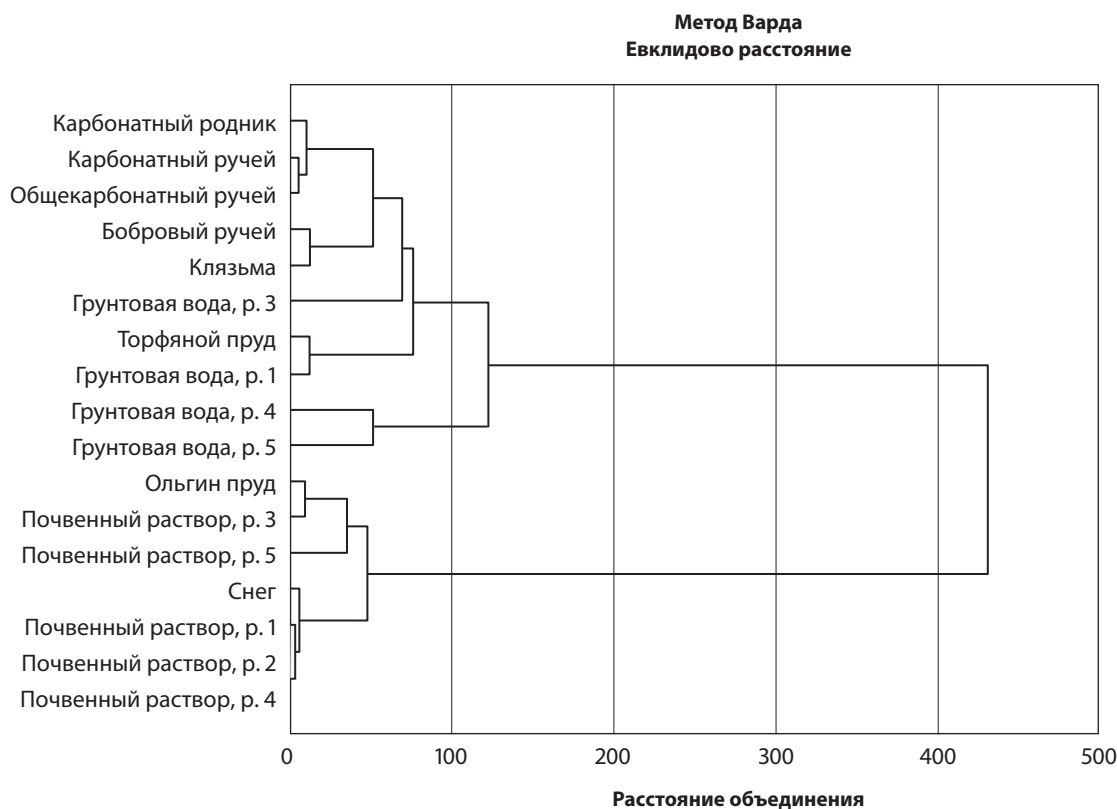


Рис. 2. Результаты кластерного анализа химического состава снеговых вод ($n = 45$), почвенных растворов ($n = 31$), почвенно-грунтовых вод ($n = 19$) и вод открытых водоемов ($n = 300$)

Таблица 3

Средний химический состав снеговых вод, почвенно-грунтовых и поверхностных вод ландшафтов УОПЭЦ «Чашниково» в 2011–2016 гг.

Компоненты	Снег, $n = 45$		Почвенные растворы, $n = 31$		Почвенно-грунтовые воды, $n = 19$		Поверхностные воды, $n = 300$	
	M	tm	M	tm	M	tm	M	tm
мг/л								
Na	1,1	0,2	4,9	1,3	4,2	0,7	13,7	4,8
Mg	0,5	0,1	1,8	0,9	10,6	2,3	14,6	2,2
K	0,9	0,4	0,9	0,3	3,3	1,9	4,1	1,5
Ca	2,2	0,5	5,5	3,2	69,7	21,1	64,4	9,1
C	3,2	1,7	11,4	6,6	51,8	32,1	6,3	1,4
Cl ⁻	2,3	0,4	0,8	0,3	6,8	3,2	28,2	8,6
NO ³⁻	2,0	0,3	1,0	0,7	2,2	1,7	5,2	1,8
SO ₄ ²⁻	1,4	0,4	1,6	0,9	19,9	7,1	25,3	4,6
мкг/л								
Cr	4,3	6,2	2,4	1,0	2,4	1,6	0,5	0,2
Mn	7,9	5,3	28,4	8,7	332,3	366,6	21,1	6,9
Fe	6,9	3,2	894,9	338,5	1067,0	679,8	92,9	21,0
Cu	1,6	0,5	9,1	2,2	8,5	3,8	1,8	0,7
Zn	30,5	9,6	61,8	27,5	77,5	111,4	15,6	14,8
Sr	15,3	6,6	38,8	28,3	198,6	44,7	169,4	22,7

Поверхностные воды. Интегральной характеристикой поверхностных вод является отнесение их к гидрокарбонатно-кальциевому классу (табл. 3).

Минимальная величина сухого остатка при соответствующих низких величинах содержания макро- и микроэлементов установлена для вод крайнего пруда (Ольгин пруд), расположенного в пределах понижения второй террасы, чье питание исключительно осуществляется за счет внутреннего и поверхностного стоков, поступающих из системы элювиальных и транзитных ландшафтов, занятых дерново-подзолистыми почвами различной степени смывности (табл. 3). Напротив, поверхностные воды супераквальных ландшафтов катены «Клязьма» характеризуются более высокими концентрациями макро- и микроэлементов. Это обусловлено не только принадлежностью ландшафтов к супераквальной позиции, но и общей высокой окисленностью почв, что в наиболее яркой форме проявляется в пределах узкой полосы на стыке притеррасной части ландшафта и поймы. Причина повышенной карбонатности супераквального ландшафта заключается в том, что в пойму выклиниваются родники и ручьи, часть из которых непосредственно дренирует карбонатные отложения.

Обсуждение

Основные закономерности изменения состава природных вод в системе «снег — почвенные растворы — почвенно-грунтовые воды — поверхностные воды». В первую очередь была выполнена оценка степени группировки изученных

вод на основе кластерного анализа. Оказалось, что в интегральном плане изученные природные воды разделяются на несколько групп (рис. 2). Закономерно объединение по составу поверхностных вод супераквального ландшафта, в которое включается грунтовая вода, характеризующая лугово-болотную окисленную почву (разрез 3). Химический состав Торфяного пруда, чье питание осуществляется преимущественно из пределов элювиальных и транзитных ландшафтов с дерново-подзолистыми почвами, объединяется с грунтовой водой разреза 1, характеризующего элювиальный ландшафт. Состав низкоминерализованных снеговых вод вполне обоснованно объединяется с составом почвенных растворов почв элювиального и транзитного ландшафтов, в пределах которых развиваются дерново-подзолистые почвы. Не случайно объединены грунтовые воды почвенных разрезов 4 и 5, принадлежащих супераквальному ландшафту, но расположенных вне зоны активного окисления, которое характерно для притеррасной части поймы (разрез 3). Следовательно, кластеризация химического состава природных вод довольно неплохо коррелирует с происхождением природных вод, включая положение в системе сопряженных элементарных ландшафтов и генезис почв.

Оценка изменения соотношений концентрации катионов и анионов в последовательной системе «снеговые воды — почвенные растворы — почвенно-грунтовые воды — поверхностные воды» показала (табл. 3), что ожидаемое превышение содержания компонентов в почвенных растворах по сравнению

со снеговыми водами сменяется на закономерное превалирование содержания катионов и анионов в почвенно-грунтовых водах по сравнению с почвенными растворами.

Изменение состава поверхностных вод по сравнению с почвенно-грунтовыми водами интересно тем, что значительная часть катионов, за исключением натрия, изменяется недостоверно. Это закономерно, если учесть, что речь идет о магнии, калии и кальции, которые характеризуются хорошей потенциальной миграционной способностью. Достоверное увеличение в поверхностных водах, по сравнению с почвенно-грунтовыми водами, основанное на сравнении доверительных границ среднего арифметического, касается натрия, а среди анионов — хлорид-иона. На этом же фоне происходит достоверное уменьшение концентрации содержания углерода. Достоверное уменьшение в поверхностных водах по сравнению с почвенно-грунтовыми водами характерно для таких элементов, как марганец, железо, медь и цинк. Теоретически это означает, что в почвенной сфере возрастает вероятность осаждения соединений железа, марганца, меди, цинка и углерода. Это положение подтверждает расчет соотношений содержания компонентов в системе «снеговые воды — почвенные растворы — почвенно-грунтовые воды — поверхностные воды» (табл. 4).

В морфологическом отношении это ярко проявляется в формировании ортштейнов, которые обычно диагностируются в элювиальных горизонтах дерново-подзолистых и в большей степени в бо-

Таблица 4

Соотношения содержаний компонентов в системе «снеговые воды — почвенные растворы — почвенно-грунтовые воды — поверхностные воды»

Компоненты	Почвенные растворы / снег	Почвенно-грунтовые воды / почвенные растворы	Поверхностные воды / почвенно-грунтовые воды
Na	4,5	0,9	3,3
Mg	3,6	5,9	1,4
K	1,0	3,7	1,2
Ca	2,5	12,7	0,9
C	3,6	4,5	0,1
Cl ⁻	0,3	8,5	4,1
NO ³⁻	0,5	2,2	2,4
SO ⁴²⁻	1,1	12,4	1,3
Cr	0,6	1,0	0,2
Mn	3,6	11,7	0,1
Fe	129,7	1,2	0,1
Cu	5,7	0,9	0,2
Zn	2,0	1,3	0,2
Sr	2,5	5,1	0,9

лотно-подзолистых почвах, приуроченных к транзитным и транзитно-аккумулятивным ландшафтам. Результаты определения валового содержания основных элементов (табл. 5) в новообразованиях показывают, что преобладающими элементами являются железо и марганец. Среди микроэлементов

Таблица 5

Среднее содержание микроэлементов в различных новообразованиях в почвах катены «Клязьма», мг/кг

Новообразования	Элементы																
	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	As	Sr	Mo	Ag	Cd	Sb	Hg	Tl	Pb
Катена «Клязьма»																	
Транзитно-аккумулятивный ландшафт (заболоченный лес)																	
Болотная руда	8,6	11,5	3581,9	127049,8	1,1	2,5	0,9	3,1	1,5	4,8	0,5	0,0	0,1	2,7	0,2	0,0	2,6
«Ржавец» Железного родника	10,0	7,3	3854,0	271060,0	3,8	6,6	4,6	70,1	242,1	180,8	1,2	0,3	0,1	0,4	0,4	0,1	3,2
Супераквальный ландшафт (пойма, притеррасье)																	
Карбонатная зона аллювиально-луговой болотной окarbonаченной почвы	0,8	0,8	356,9	7615,5	1,2	15,6	5,3	68,1	3,6	215,7	0,2	0,1	0,1	0,1	0,2	0,0	1,0
Центральная часть поймы супераквального ландшафта																	
Магнитные ортштейны аллювиально-луговой почвы	46,2	19,1	20259,3	193756,7	15,4	10,7	6,2	22,4	4,4	11,9	1,2	0,1	0,6	7,1	0,3	0,2	10,4
Немагнитные ортштейны аллювиально-луговой почвы	83,9	21,2	12555,2	88610,2	16,2	11,8	8,8	17,1	2,5	8,6	0,7	0,1	0,4	1,7	0,2	0,3	20,3
Крупные ортштейны аллювиально-луговой почвы	50,9	15,3	1610,3	118094,7	5,3	7,2	2,0	7,3	1,5	9,6	0,1	0,0	0,2	2,5	0,2	0,1	8,5
Среднее	60,3	18,5	11474,9	133487,2	12,3	9,9	5,7	15,6	2,8	10,1	0,7	0,1	0,4	3,8	0,2	0,2	13,1

тов обращают на себя внимание высокие величины содержания цинка, ванадия и кобальта при незначительных отличиях содержания этих элементов в элювиальном горизонте и переходном элювиально-иллювиальном горизонте. Среди тяжелых металлов первое место по уровню накопления принадлежит свинцу, тогда как содержание других элементов меньше, чем 1 мг/кг. В условиях транзитно-аккумулятивного заболоченного ландшафта, обычно приуроченного к контактной зоне нижней третьей части первой террасы и супераквального ландшафта р. Клязьмы, под незначительным по мощности торфянистым горизонтом диагностируются типичные болотные руды, характеризующиеся более высокой концентрацией железа и мышьяка по сравнению с ортштейнами болотно-подзолистых почв, но меньшим содержанием ванадия, марганца и стронция. Отметим (табл. 5), что по составу близкий уровень концентрирования элементов обнаружен для «ржавца», представляющего собой результат выпадения в осадок гидроокислов железа в пределах выхода родника, приуроченного к контактной зоне супераквального ландшафта и первой террасы р. Клязьмы. Для новообразований аллювиально-луговых почв супераквального ландшафта характерен однотипный уровень накопления железа с болотными рудами, при несколько большем содержании марганца. Близкий уровень накопления с болотными рудами в ортштейнах установлен для хрома и преобладающей части тяжелых металлов, за исключением свинца. Для зоны выпавших карбонатов в профиле аллювиально-лугово-болотных окарбонированных почв притеррасья обнаруживается резкое снижение большинства элементов, за исключением стронция и цинка, по сравнению с «ржавцом», приуроченным к роднику.

Заключение

Последовательное изучение закономерностей трансформации состава природных вод в системе «*снеговые воды — почвенные растворы — почвенно-грунтовые воды — поверхностные воды*» позволяет сделать заключение, что уменьшение концентраций значительного числа важнейших элементов на границе почвенно-грунтовых и поверхностных вод, за исключением таких активных мигрантов, как натрий, магний и калий, является важным аргументом в пользу трактовки почвы как биогеохимического барьера на пути миграции элементов семейства железа и марганца. Результатом этого процесса является образование стяжений различного генезиса — от обычных ортштейнов, диагностируемых в пределах профиля дерново-болотно-подзолистых почв, до болотной руды, формирование которой приурочено к контактной зоне притеррасного понижения и супераквального ландшафта. Одновременно это сопровождается существенным изменением состава природных вод.

Результаты исследования показали, что состав снега, почвенных растворов, почвенно-грунтовых и поверхностных вод является взаимодействующей системой, и основные тенденции в ее изменении хорошо соотносятся с положением водоемов в системе сопряженных геохимических ландшафтов, с характером биогеохимических барьеров и со спецификой почвенных новообразований.

Информация о финансировании работы

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № 121040800321-4 «Индикаторы трансформации биогеохимических циклов биогенных элементов в природных и антропогенных экосистемах»), а также в рамках Программы развития Междисциплинарной научно-образовательной школы Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова «Будущее планеты и глобальные изменения окружающей среды».

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Авессаломова И.А., Иванов А.Н., Савенко А.В. Водная миграция химических элементов в ландшафтах вулканических островов Центральных Курил (на примере о. Матуа) // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. География. 2018. № 1.
2. Алексеевский Н.И., Заславская М.Б., Гончаров А.В. Методические подходы к изучению и параметризации качества воды // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. География. 2016. № 2.
3. Аринушкина Е.В. Руководство по химическому анализу почв. М., 1970.
4. Богатырев Л.Г., Жилин Н.И., Самсонова В.П. и др. Многолетний мониторинг снежного покрова в условиях природных и урбанизированных ландшафтов Москвы и Подмосковья // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. География. 2018. № 2.
5. Васильевская В.Д., Зборищук Ю.Н., Ульянова Т.Ю. Почвы и почвенный покров УОПЭЦ «Чашниково» // Развитие почвенно-экологических исследований. М., 1999.
6. Гашикина Н.А. Пространственно-временная изменчивость химического состава вод малых озер в современных условиях изменения окружающей среды: Автореф. дис. ... докт. геогр. наук. СПб., 2014.
7. Ефимова Л.Е., Повалишников Е.С., Терская Е.В. и др. Гидрохимическое состояние водных объектов национального парка Валдайский // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. География. 2016. № 1.
8. Кириллова Н.П., Силёва Т.М., Ульянова Т.Ю. и др. Цифровая почвенная карта УОПЭЦ Чашниково МГУ им. М.В. Ломоносова // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 17. Почвоведение. 2015. № 2.
9. Люри Д.И., Горячкин С.В., Караваева Н.А. и др. Динамика сельскохозяйственных земель России в XX веке и

постагрогенное восстановление растительности и почв. М., 2010.

10. Моисеенко Т.И., Гашкина Н.А. Распределение микроэлементов в поверхностных водах суши и особенности их водной миграции // Водные ресурсы. 2007. Т. 34, № 4.

11. Ниценко А.А. Об изучении экологической структуры растительного покрова // Бот. журн. 1969. Т. 54, № 7.

12. Пузаченко Ю.Г., Хрусталева М.А. Химический состав вод весеннего половодья в лесных ландшафтах центра Русской равнины // География и природные ресурсы. 1999. № 2.

13. Решетняк О.С., Лямперт Н.А., Гришианова Ю.С. Пространственная изменчивость химического состава и качества воды р. Ока // Материалы науч. конф. с междунар. участием «Современные проблемы гидрохимии и мониторинга качества поверхностных вод». Ростов-на-Дону, 2015.

14. Савенко А.В. Типы распределения растворенных форм химических элементов в устьевых областях рек // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. География. 2018. № 2.

15. Семенченко В.П. Принципы и системы биоиндикации текучих вод. Минск, 2004.

16. Трофимов С.Я., Караванова Е.И., Белянина Л.А. Состав поверхностных вод Центрального государственного природного биосферного заповедника // Почвоведение. 2009. № 1.

17. Chambers O., Sešek A., Tasič J.F., Trontelj J. Fertilised soil solution study using a drop distribution pattern // Computers and Electronics in Agriculture. 2019. Vol. 163. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2019.05.042>

18. Gaillardet J., Viers J., Dupré B. Trace elements in rivers waters // Treatise on Geochemistry. 2nd ed. Elsevier Science, 2014. Vol. 7.

19. Garneau C., Sauvage S., Sánchez-Pérez J.-M. et al. Modelling trace metal transfer in large rivers under dynamic hydrology: A coupled hydrodynamic and chemical equilibrium model // Environmental Modelling & Software. 2017. Vol. 89. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2016.11.018>

20. Humphrey O.S., Young S.D., Bailey E.H. et al. Investigating the use of microdialysis and SEC-UV-ICP-MS to assess iodine interactions in soil solution // Chemosphere. 2019. Vol. 229. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.04.215>

21. Lozano J.C., Blanco P.R., Tomé F.V. et al. A system for obtaining soil solution extracts and soil water retention curves using a bench centrifuge with fixed angle rotors // Geoderma. 2020. Vol. 361. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.114063>

22. Qin T., Yang P., Groves C. et al. Natural and anthropogenic factors affecting geochemistry of the Jialing and Yangtze Rivers in urban Chongqing, SW China // Applied Geochemistry. 2018. Vol. 98. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2018.10.009>

23. Yang J., Zhongbo Yu., Yi P., Frape Sh.K. et al. Evaluation of surface water and groundwater interactions in the upstream of Kuiriver and Yunlong lake, Xuzhou, China // Journal of Hydrology. 2020. Vol. 583. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.124549>

24. Zia A., van den Berg L., Ahmad M.N. et al. Controls on accumulation and soil solution partitioning of heavy metals across upland sites in United Kingdom (UK) // Journal of Environmental Management. 2018. Vol. 222. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.05.076>

Поступила в редакцию 20.03.2021

После доработки 22.11.2021

Принята к публикации 07.12.2021

CHANGES IN THE COMPOSITION OF NATURAL WATERS IN THE SYSTEM “ATMOSPHERIC PRECIPITATION — SOIL SOLUTIONS — SOIL-GROUND WATERS — SURFACE WATERS” (THE CASE STUDY OF KLYAZMA RIVER LANDSKAPES)

N. I. Zhilin, L. G. Bogatyrev, A. I. Benediktova, D. V. Ladonin, M. M. Karpukhin, Ph. I. Zemskov, V. M. Telesnina, A. N. Vartanov, D. D. Gosse, V. V. Demin

Within the landscapes of the upper reaches of the Klyazma River, the long-term component composition of natural waters in the system has been studied: snow waters — soil solutions — soil-ground waters — surface waters. It has been determined that the regular excess of the content of the main macro- and microelements in soil solutions in comparison with snow waters at subsequent stages is first replaced by an increase in the concentration of components in soil-ground water, followed by a decrease in the content in surface waters — streams and river waters. It is shown that the relatively high mobility of sodium, magnesium, potassium and calcium, and of the anions chloride and nitrate ions, is accompanied by a significant decrease in the mobility of elements of the family of iron, copper and zinc at the transition from groundwater to surface water. This explains the wide distribution of segregated forms, presented in the form of nodules in soils of semi-hydromorphic landscapes, up to ortosands, and in the boggy conditions of near-terrace depressions on the border with the super-aquatic landscape, the formation of typical bog ores. Thus, the composition of natural waters and its change serves not only as a good, but also a necessary tool for explaining the features of migration of elements in the soil — natural water system.

Key words: snow waters, macroelements, microelements, neoplasm.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Жилин Николай Ильич, инженер каф. общего почвоведения
ф-та почвоведения МГУ имени М.В. Ломоносова,
e-mail: zhilinnik@yandex.ru

Богатырев Лев Георгиевич, канд. биол. наук, доцент каф. общего почвоведения
ф-та почвоведения МГУ имени М.В. Ломоносова,
e-mail: bogatyrev.l.g@yandex.ru

Бенедиктова Анна Игоревна, канд. биол. наук, науч. сотр. каф. общего почвоведения
ф-та почвоведения МГУ имени М.В. Ломоносова,
e-mail: beneanna@yandex.ru

Ладонин Дмитрий Вадимович, докт. биол. наук, проф. каф. химии почв
ф-та почвоведения МГУ имени М.В. Ломоносова,
e-mail: ladonin@inbox.ru

Карпухин Михаил Михайлович, канд. биол. наук, науч. сотр. каф. химии почв
ф-та почвоведения МГУ имени М.В. Ломоносова,
e-mail: kmm82@yandex.ru

Земсков Филипп Иванович, инженер каф. общего почвоведения
ф-та почвоведения МГУ имени М.В. Ломоносова,
e-mail: philzemskov@mail.ru

Телеснина Валерия Михайловна, канд. биол. наук, ст. науч. сотр. каф. общего почвоведения
ф-та почвоведения МГУ имени М.В. Ломоносова,
e-mail: vtelesnina@mail.ru

Вартанов Александр Николаевич, аспирант каф. общего почвоведения
ф-та почвоведения МГУ имени М.В. Ломоносова,
e-mail: anvbox93@mail.ru

Госсе Дмитрий Дмитриевич, канд. биол. наук, ст. науч. сотр. каф. агрохимии
и биохимии растений ф-та почвоведения МГУ имени М.В. Ломоносова,
e-mail: d9151054555@gmail.com

Демин Владимир Владимирович, канд. биол. наук, вед. науч. сотр. каф. географии почв
ф-та почвоведения МГУ имени М.В. Ломоносова,
e-mail: vvdmsu@gmail.ru