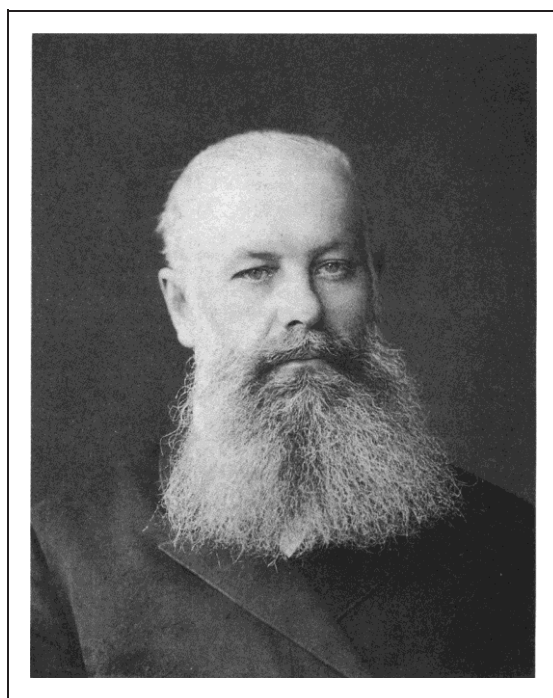


САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
КАФЕДРА ПОЧВОВЕДЕНИЯ И ЭКОЛОГИИ ПОЧВ  
ЦЕНТРАЛЬНЫЙ МУЗЕЙ ПОЧВОВЕДЕНИЯ ИМ. В.В. ДОКУЧАЕВА

# МАТЕРИАЛЫ ПО ИЗУЧЕНИЮ РУССКИХ ПОЧВ

ВЫПУСК 13 (40)

Издание основано в 1885 г.  
А.В. Советовым и В.В. Докучаевым



Санкт-Петербург  
2021

УДК 631.4  
ББК 40.3  
М34

Редакционная коллегия: *Б.Ф. Апарин (председатель), К.А. Бахматова, М.И. Герасимова, Г.А. Касаткина, Н.Е. Орлова, Е.В. Пятина, А.И. Попов, О.В. Романов, А.В. Русаков, А.Г. Рюмин, Е.Ю. Сухачева, М.А. Федорова, И.В. Штангеева, К.Л. Якконен*

Рецензенты:

д.с.-х.н., профессор Б.В. Бабилов, Санкт-Петербургский  
государственный лесотехнический университет  
д.с.-х.н., член корр. РАН, профессор В.А. Рожков, Почвенный институт  
им. В.В. Докучаева

**Материалы по изучению русских почв. Вып. 13 (40):** Сб. науч. докл. / Под ред.  
М34 Б.Ф. Апарина.– СПб, 2021. – 116 с.

В тринадцатом выпуске «Материалы по изучению русских почв» (вып. 12 (39) вышел в 2020 г.) представлены доклады участников XXIII Докучаевских молодежных чтений «Почва в условиях глобального изменения климата» (2020 г., СПб).

В материалах рассматриваются вопросы изменения свойств и процессов в почвах, их элементного и минералогического состава под влиянием различных форм антропогенного воздействия и изменения климата. Обсуждаются агроэкологический потенциал почв, применение и влияние биоугля в сельском хозяйстве, геохимические потоки и загрязнение тяжелыми металлами почв.

Работы представляют интерес для студентов, специалистов и ученых, работающих в сфере наук о Земле, почвоведения, экологии, агрохимии, биологии и сельского хозяйства.

**ББК 40.3**

Материалы опубликованы при поддержке  
Автономной некоммерческой организации сохранения  
и развития научного наследия В.В. Докучаева «Почва – жизнь»

© Санкт-Петербургский  
государственный университет  
© Центральный  
музей почвоведения  
им. В.В. Докучаева – Филиал  
ФГБНУ ФИЦ «Почвенный  
институт им. В.В. Докучаева», 2021

РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ В ПОЧВАХ ЦЕНТРАЛЬНО-ЛЕСНОГО  
ГОСУДАРСТВЕННОГО БИОСФЕРНОГО ЗАПОВЕДНИКА  
И ИХ СВЯЗЬ С СОЕДИНЕНИЯМИ ЖЕЛЕЗА И МАРГАНЦА

С.А. Антонова, Д.В. Ладонин

Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова

В данной статье изучено распределение фракции редкоземельных элементов (РЗЭ), связанных с оксалаторастворимыми формами железа и марганца в трех профилях почв Центрально-Лесного государственного биосферного заповедника. В ходе исследования было показано, что данная фракция РЗЭ оказывает существенное влияние на перераспределение тяжелых лантаноидов и церия, а также обуславливает развитие положительной цериевой аномалии в некоторых горизонтах. Сильные корреляции между содержанием оксалаторастворимых форм железа и марганца и содержанием экстрагируемых вытяжкой Тамма РЗЭ найдены не во всех почвах.

*Ключевые слова:* РЗЭ в почвах, цериевые аномалии, фракционирование РЗЭ.

## ВВЕДЕНИЕ

Редкоземельные элементы (РЗЭ) – группа элементов, которая включает в себя скандий, иттрий, лантан и лантаноиды (Ln). Один из методов определения уровня антропогенной нагрузки почв – сравнение с фоновыми значениями, полученными для ненарушенных почв. К сожалению, литературных данных о содержании РЗЭ в почвах южной тайги недостаточно. Для определения поведения РЗЭ в почвах, необходимо оценить вклад различных почвенных компонентов в их связывании и распределении по почвенному профилю, в том числе роль несиликатных форм железа и марганца.

Многие исследователи отмечали, что поведение РЗЭ в почвах зависит от содержания в них оксидов железа, марганца и алюминия [9], которые признаны одними из важнейших фазоносителей РЗЭ [7], [1], влияющих на процесс их фракционирования в почвах. Доказана поверхностная сорбция РЗЭ несиликатными формами железа и марганца [10], [8]. Тем не менее, механизмы фракционирования РЗЭ в почвах до сих пор недостаточно изучены. В данном исследовании было изучено распределение РЗЭ во фракции, связанной с несиликатными формами железа и марганца в трех ненарушенных почвах Центрально-Лесной государственной биосферной заповедник (ЦЛГБЗ).

## ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Объектами исследования служили образцы основных горизонтов из трех разрезов почв, профили которых были вскрыты в период с 2008 по 2019 год на территории ЦЛГБЗ. Изучаемым почвам были даны названия по «Классификации и диагностики почв России» и WRB [4].

В разрезе № 3-2019 были диагностированы горизонты: L, F, H, AEL, ELf, ПВД. По классификации и диагностики почв 2004 года почва названа как: палево-подзолистая легкосуглинистая глубокоподзолистая на покровных суглинках, подстилаемых смесью опесчаненных флювиогляциальных отложений и красно-бурой тяжелосуглинистой морены. Классификационное название по WRB (2014): Dystric Albic Retisol. Разрез № 2-2008 включал горизонты: T1, T2, H, ELh<sub>i,g</sub>, EL, ПЕL<sub>nn,g</sub>, ПВДG. Название почвы по классификации 2004 года: торфяно-подзолисто-глеевая легкосуглинистая конкреционная мелкоторфянистая профильно-оглееная сверхглубокоподзолистая на покровном суглинке, подстилаемом мореной, по WRB: Folic Albic Retisols Raptic. Данные почвы сформированы на двучленных отложениях. Профиль разреза № 1-2019 состоит из следующих горизонтов: O, AY, AYB, BMg. Название почвы по классификации 2004 года: серо-гумусовая среднесуглинистая глееватая маломощная, по WRB: Gleyic Umbrisols.

Химические анализы, такие как рН<sub>н2о</sub> и содержание органического углерода для минеральных горизонтов, выполняли общепринятыми методами [2]. Для извлечения фракции РЗЭ, связанных с оксалаторастворимыми формами железа и марганца, использовали раствор

Тамма (раствор  $\text{H}_2\text{C}_2\text{O}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  и  $(\text{NH}_4)_2\text{C}_2\text{O}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$  с pH 3.3). Навеску почвы заливали раствором в соотношении почва: раствор равном 1:50. Колбы закрывали и взбалтывали в течение 1 часа, затем фильтровали. Фильтрат переносили в пластмассовые пробирки и исследовали в нем содержание РЗЭ методом ИСП-МС на приборе Agilent 7500a ICP-MS.

Все полученные результаты были статистически обработаны в программе MS Excel.

Отметим, что нормирование содержаний форм РЗЭ, связанных с оксалаторастворимыми формами железа и марганца, было проведено по концентрации данных элементов в глине Русской платформы [3]. Европиевые и цериевые аномалий рассчитывали по формулам:  $\text{Ce}_{\text{ан}} = [3\text{Ce}_{\text{н}} / (2\text{La}_{\text{н}} + \text{Nd}_{\text{н}})]$  и  $\text{Eu}_{\text{ан}} = [\text{Eu}_{\text{н}} / (\text{Sm}_{\text{н}} + \text{Gd}_{\text{н}})^{1/2}]$  [6].

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЯ

Результаты извлечения фракции РЗЭ, связанной с оксалаторастворимыми формами железа и марганца представлены в табл. 1.

В торфяно-подзолисто-глеевой почве содержание соединений лантана, иттрия и лантаноидов, связанных с оксалаторастворимыми формами железа и марганца, уменьшается в ряду горизонтов: ПВДГ, ПЕЛ<sub>нн,г</sub>, ЕЛ<sub>hi,г</sub>, ЕЛ, Н, Т<sub>2</sub>, Т<sub>1</sub>. Для скандия распределение по горизонтам иное: ПЕЛ<sub>нн,г</sub>, ЕЛ<sub>hi,г</sub>, ПВДГ, Н, Т<sub>2</sub>, ЕЛ, Т<sub>1</sub>. В подзолистой почве содержание соединений лантана и лантаноидов данной фракции увеличивается в ряду горизонтов: L, F, ЕЛ, АЕЛ, Н, ПВД, соединений иттрия – L, АЕЛ, F, ЕЛ, Н, ПВД, соединений скандия – L, ЕЛ, F, АЕЛ, Н, ПВД. Возможно, накопление данных форм соединений РЗЭ в горизонте Н связано с высоким содержанием в этом горизонте оксалаторастворимых форм железа (табл. 2) [5]. Содержание данных форм РЗЭ в серо-гумусовой почве увеличивается по профилю сверху вниз.

Нормированные по концентрации лантаноидов в глине Русской платформы графики распределений РЗЭ в данной фракции представлены на рис. 1. На графике для торфяно-подзолисто-глеевой почвы видно большее обогащение горизонтов ПЕЛ<sub>нн,г</sub> и ПВДГ соединениями средних и тяжелых лантаноидов и церия по сравнению с глиной Русской платформы. Данную особенность можно объяснить как сменой почвообразующей породы, так и более высоким содержанием несиликатных форм марганца в данных горизонтах. Отметим, что в горизонт ПЕЛ<sub>нн,г</sub> обогащен европием, в то время как в ПВДГ заметна отрицательная европиевая аномалия.

Для подзолистой почвы нормированные содержания фракции также имеют повышенное содержание церия (во всех горизонтах) и повышенное содержание европия (в горизонтах L, F), что свидетельствует о проявлении положительной цериевой и положительной европиевой аномалии.

Формы кривых на нормированных графиках для серо-гумусовой почвы указывают на то, что все горизонты обогащены средними лантаноидами данной фракции. Присутствует положительная цериевая аномалия во всех горизонтах, и есть небольшая положительная европиевая аномалия в горизонте О, а в горизонтах АУВ и ВМg – небольшая отрицательная.

В целом, данная фракция РЗЭ обогащена по сравнению с глиной Русской платформы соединениями средних и тяжелых лантаноидов и церием и европием (в некоторых горизонтах).

Значения цериевых и европиевых аномалий представлены в табл. 2. В торфяно-подзолисто-глеевой почве наибольшие значения цериевых аномалий характерны для горизонтов ПЕЛ<sub>нн,г</sub>, ПВДГ, Т<sub>2</sub>. В них нормированные содержания церия максимально отличаются от соседних лантаноидов в большую сторону. Эту особенность можно объяснить высоким содержанием оксалаторастворимых форм марганца в горизонтах ПЕЛ<sub>нн,г</sub>, ПВДГ, так как по некоторым данным, оксиды марганца ответственны за образование положительной цериевой аномалии [5]. Также во всех горизонтах кроме ПВДГ присутствует положительная европиевая аномалия, ее значение максимально для органогенных горизонтов, а минимально для элювиальных.

В подзолистой почве наибольшие положительные цериевые аномалии в горизонтах L, F, ЕЛ<sub>f</sub>. В горизонтах ЕЛ, ПВД подзолистой почвы присутствует отрицательная европиевая

аномалия, что характерно для минеральных горизонтов почв и может быть связано с минералогическим составом материнской породы. Отметим также, что существуют корреляции между величинами цериевых и европиевых аномалий и содержанием оксалоторастворимых форм марганца ( $R^2$  равны 0.73 и 0.88, соответственно). Заметим, что значения цериевых и европиевых аномалий сильно коррелируют между собой ( $R^2 = 0.89$ ). Этот факт не исключает их совместного происхождения.

В серо-гумусовой почве присутствует положительная цериевая аномалия во всех горизонтах, небольшая положительная европиевая аномалия в горизонте О, а в горизонтах АУВ и ВМg – небольшая отрицательная. Значения цериевых и европиевых аномалий коррелируют между собой ( $R^2 = 0.76$ ).

Таким образом, положительная цериевая аномалия присутствует во всех горизонтах изучаемых почв. Ее наличие для данных форм соединений закономерно. В связи с особенностями климата и положения почвы в ландшафте, проявление признаков оглеения носит сезонный характер, то есть возможна смена окислительно-восстановительной обстановки. Известно, что при определенных окислительно-восстановительных условиях оксиды марганца будут окислять  $Ce^{3+}$  до  $CeO_2$ , который может сорбироваться оксидами и гидроксидами марганца и накапливаться в них, при этом грунтовые воды обедняются этим элементом [5, 11].

В целом, на нормированных графиках заметно, что практически все горизонты содержат больше тяжелых лантаноидов данной фракции по сравнению с их общим содержанием в глине Русской платформы, что говорит об их фракционировании в процессе педогенеза. Возможно, это связано с тем, что в изучаемых почвах содержание оксалоторастворимых форм железа выше, чем марганца. По некоторым данным, оксиды и гидроксиды железа имеют большее сродство к тяжелым лантаноидам, в то время как данные соединения марганца тяготеют к легким, что было подтверждено экспериментально [8].

Причина образования положительной европиевой аномалии в некоторых горизонтах пока не до конца ясна. Возможно, наличие положительного пика на нормализованных графиках для органогенных горизонтов связано с биологическим накоплением европия [6].

Был проведен корреляционный анализ для форм соединений скандия, иттрия, лантана и лантаноидов. В торфяно-подзолисто-глеевой почве скандий слабо коррелирует со всеми лантаноидами, иттрий имеет высокую корреляцию (коэффициент корреляции  $K > 0.97$ ) с тяжелыми лантаноидами (кроме европия,  $K=0.91$ ), церий – с легкими лантаноидами и европием ( $K=1$ ), гадолинием, тербием, диспрозием ( $K=0.99; 0.98; 0.97$  соответственно). В целом, соединения и легких, и тяжелых элементов взаимосвязаны, соответственно соединения цериевой подгруппы и иттриевой подгруппы переходят в вытяжку Тамма совместно.

В подзолистой почве корреляционный анализ выявил следующие закономерности: соединения железа имеют низкие коэффициенты корреляции со всеми РЗЭ, марганца – отрицательные коэффициенты меньше (по модулю) 0.52, скандий хуже остальных РЗЭ коррелирует со всеми лантаноидами.

В серо-гумусовой почве концентрация соединений железа сильно скоррелирована со всеми соединениями РЗЭ ( $K < 0.99$ ), соединения скандия имеют самую низкую корреляцию со всеми соединениями РЗЭ ( $K < 0.70$ ). В основном, для остальных РЗЭ данной фракции присуща очень высокая степень корреляции

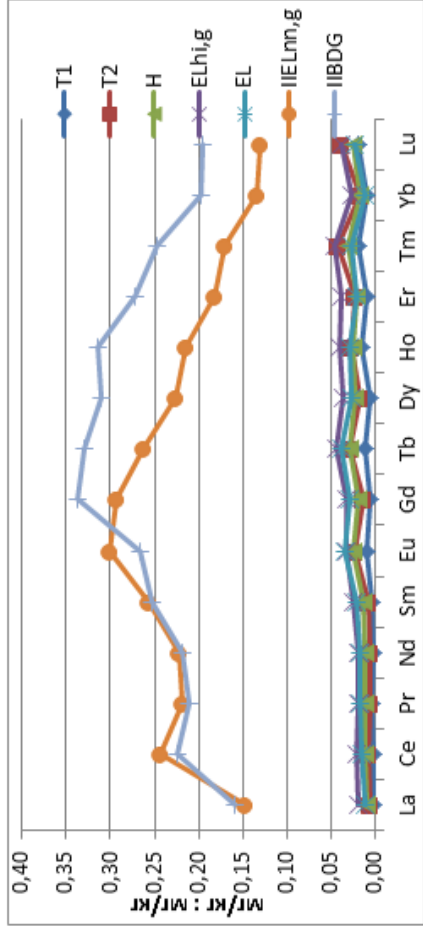
В целом, соединения скандия имеют низкую степень корреляции с остальными РЗЭ, что может быть связано с проявлением индивидуальных химических свойств данного элемента, что сказывается на его фракционировании в процессе почвообразования. Корреляционный анализ показал высокую степень связи между концентрациями всех лантаноидов, связанных с оксидами и гидроксидами железа и марганца, что свидетельствует об их совместном наследовании и поведении в почвах. Отметим, что соединения иттрия имеют высокую корреляционную связь с соединениями всех лантаноидов данной фракции (особенно с тяжелыми элементами), церия – с соединениями легких лантаноидов.

Таблица 1. Содержание РЗЭ, связанных с оксалогорстворимыми формами железа и марганца, мг/кг.

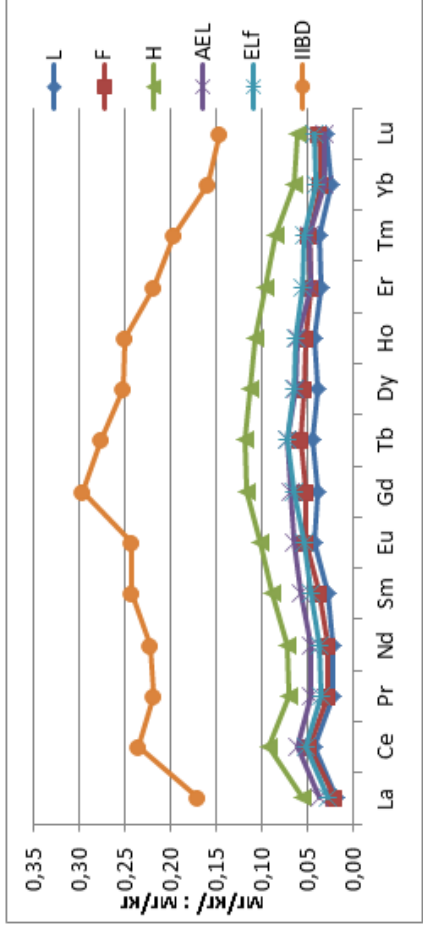
Горизонт	Sc	Y	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
Торфяно-подзолисто-глебовая почва																
T <sub>1</sub>	0.18	0.09	0.10	0.19	0.04	0.07	0.03	0.01	0.03	0.01	0.03	0.02	0.03	0.01	0.03	0.01
T <sub>2</sub>	0.75	0.44	0.24	0.58	0.06	0.19	0.05	0.03	0.07	0.02	0.09	0.03	0.07	0.02	0.05	0.02
H	1.04	0.49	0.41	0.95	0.10	0.36	0.09	0.03	0.11	0.02	0.11	0.03	0.06	0.01	0.05	0.01
ELhi,g	1.33	0.79	0.71	1.60	0.17	0.64	0.15	0.04	0.17	0.04	0.18	0.04	0.11	0.02	0.07	0.02
EL	0.55	0.45	0.48	1.22	0.15	0.55	0.14	0.04	0.15	0.03	0.13	0.03	0.06	0.01	0.04	0.01
ПЕLnn,g	1.39	4.69	5.51	18.26	1.88	7.17	1.60	0.39	1.53	0.21	1.11	0.21	0.51	0.07	0.37	0.05
ПВДG	1.21	8.42	5.94	16.71	1.81	7.04	1.57	0.35	1.76	0.26	1.51	0.30	0.76	0.10	0.54	0.08
Подзолистая почва																
L	0.53	1.06	0.73	3.20	0.19	0.72	0.17	0.05	0.21	0.04	0.19	0.04	0.10	0.02	0.07	0.01
F	0.75	1.26	0.79	3.63	0.24	0.92	0.23	0.07	0.27	0.05	0.26	0.05	0.13	0.02	0.10	0.01
H	1.92	2.44	2.10	7.00	0.60	2.34	0.55	0.13	0.61	0.09	0.55	0.10	0.27	0.04	0.18	0.03
AEL	0.91	1.24	1.37	4.57	0.40	1.50	0.36	0.08	0.36	0.06	0.31	0.06	0.13	0.02	0.09	0.01
ELf	0.69	1.34	1.07	3.85	0.31	1.18	0.29	0.07	0.34	0.06	0.32	0.06	0.16	0.02	0.11	0.02
ПВД	2.27	6.52	6.42	17.57	1.88	7.15	1.51	0.32	1.55	0.22	1.23	0.24	0.61	0.08	0.44	0.06
Серо-гумусовая почва																
O	0.26	0.31	0.18	0.56	0.05	0.20	0.05	0.02	0.06	0.01	0.06	0.01	0.04	0.01	0.02	0.00
AY	1.68	1.48	0.82	3.05	0.28	1.13	0.29	0.07	0.33	0.05	0.32	0.06	0.16	0.02	0.11	0.01
AYB	0.80	1.62	1.15	4.59	0.39	1.52	0.38	0.09	0.43	0.07	0.38	0.07	0.18	0.03	0.13	0.02
BMg	2.09	5.08	3.67	14.47	1.33	5.36	1.33	0.29	1.38	0.21	1.19	0.22	0.56	0.08	0.40	0.05

Таблица 2. Значения цериевых и европиевых аномалий, величина рН, содержание углерода органических соединений и оксалогорстворимых форм железа и марганца в изучаемых почвах.

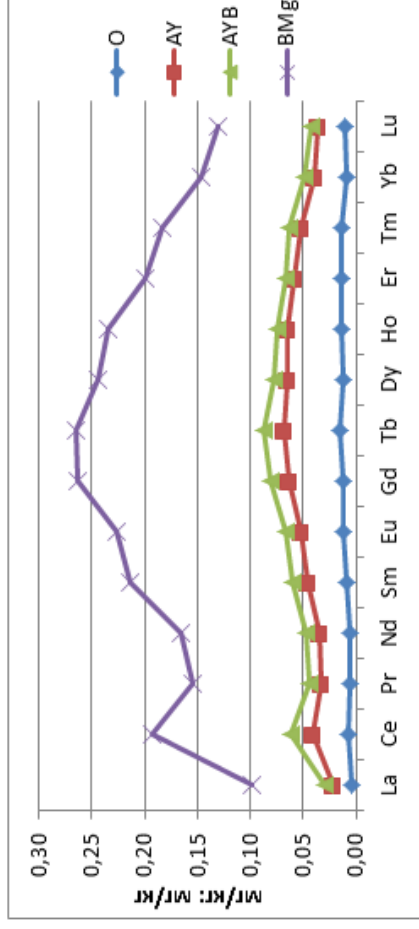
Показатель	Торфяно-подзолисто-глебовая почва						Подзолистая почва						Серо-гумусовая почва				
	T <sub>1</sub>	T <sub>2</sub>	H	ELhi,g	EL	ПЕLnn,g	ПВДG	L	F	H	AEL	ELf	ПВД	O	AY	AYB	BMg
Се <sub>ан</sub>	1.00	1.22	1.15	1.11	1.14	1.42	1.25	2.10	2.07	1.52	1.54	1.65	1.25	1.43	1.55	1.70	1.60
Еу <sub>ан</sub>	2.00	2.12	1.53	1.16	1.36	1.10	0.91	1.27	1.18	1.00	1.03	0.96	0.90	1.23	0.98	0.94	0.95
рН	4.35	3.80	4.12	3.46	4.23	6.70	6.52	5.92	5.73	5.60	4.24	4.68	4.96	6.01	4.53	4.52	5.41
С <sub>орг</sub> , %	–	–	–	4.65	0.81	0.09	0.54	–	–	–	2.82	0.28	0.07	–	3.01	1.92	1.47
Mn	607.2	25.98	18.69	18.00	14.31	266.4	238.2	5484	2906	1656	632.6	459.6	266.2	508.2	578.6	326.2	549.6
Fe	222.2	2918	2510	1808	326.8	2430.0	922.6	529.6	1588	8194	4978	3022	3588	732.0	6840	7040	16950



(1)



(2)



(3)

Рисунок 1. Нормированное по содержанию лантаноидов в глине Русской платформы содержание РЗЭ, связанных с оксалогорстворимыми формами железа и марганца в: (1) – торфяно-подзолисто-глеевой почве, (2) – подзолистой почве, (3) – серо-гумусовой почве

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Фракция РЗЭ, связанная с оксалаторастворимыми формами железа и марганца, оказывает существенное влияние на перераспределение тяжелых лантаноидов и церия, а также обуславливает развитие положительной цериевой аномалии в некоторых горизонтах. Для нормированных по глине Русской платформы распределений РЗЭ данной фракции характерны положительные цериевые аномалии во всех изученных почвах.

В подзолистой и торфяно-подзолисто-глеевой почвах не были найдены положительные корреляции между содержанием оксалаторастворимых форм железа и марганца и содержанием экстрагируемых вытяжкой Тамма РЗЭ. Возможно, это связано с тем, что содержание РЗЭ в данных фракциях зависит не только от количества фаз-носителей (оксалаторастворимых форм железа и марганца), но и от механизмов сорбции РЗЭ, которые у данных фаз могут отличаться. Однако корреляции между содержанием оксалаторастворимых форм железа и содержанием экстрагируемых вытяжкой Тамма РЗЭ были обнаружены в серо-гумусовой почве.

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Водяницкий Ю.Н.* Геохимическое фракционирование лантанидов в почвах и горных породах (обзор литературы) // Почвоведение. – 2012.– № 1. С. 1–13.
2. *Воробьева Л.А.* Химический анализ почв. М.: Издательство МГУ, 1998. 272 с.
3. *Ладонин Д.В.* Формы соединений тяжелых металлов в техногенно-загрязненных почвах. М: Издательство Московского университета, 2019. 312 с.
4. *Шишов Л.Л., Тонконогов В.Д. Лебедева И.И., Герасимова М.И.* Классификация и диагностика почв России. Смоленск: Ойкумена, 2004. с. 342.
5. *Braun J.J., Pagel M., Muller J.P., Bilong P., Michaud A., Guillet B.* Cerium anomalies in lateritic profiles // *Geochimica et Cosmochimica Acta*, Vol. 54, 1990. pp. 597–605.
6. *Brioschi L., Steinmann M., Lucot E., Pierret M.C.* Transfer of rare earth elements (REE) from natural soil to plant systems: implications for the environmental availability of anthropogenic RE // *Plant Soil*, No. 366, 2013. pp. 143–163.
7. *Chang Chunying, Fangbai Li Chengshuai Liu, Jianfeng Gao.* Fractionation characteristics of rare earth elements (REEs) linked with secondary Fe, Mn, and Al minerals in soils // *Acta Geochim*, Vol. 4, No. 35, 2016. pp. 329–339.
8. *Liu H., Pourret O., Guo H.* Impact of Hydrous Manganese and Ferric Oxides on the Behavior of Aqueous Rare Earth Elements (REE): Evidence from a Modeling Approach and Implication for the Sink of REE // *Int. J. Environ. Res. Public Health*, Vol. 2, No. 15, 2018
9. *Ndjigui P.-D., Bilong P., Bitom D., Dia A.* Mobilization and redistribution of major and trace elements in two weathering profiles developed on serpentinites in the Lomie ultramafic complex, South-East Cameroon // *Journal of African Earth Science*, Vol. 50, 2008. pp. 305–328.
10. *Piasecki W., Sverjensky D.A.* Speciation of adsorbed yttrium and rare earth elements on oxide surfaces // *Geochimica et Cosmochimica Acta*, No. 72, 2008. pp. 3964–3979.
11. *Seto M., Akagi A.* Chemical condition for the appearance of a negative Ce anomaly in stream waters and groundwaters // *Geochem. J.*, No. 42, 2008. pp. 371–380.

## RARE EARTH ELEMENTS ASSOCIATED WITH SOIL-ABUNDANT Fe- AND Mn-COMPOUNDS IN SOME RUSSIAN SOILS

S.A. Antonova, D.V. Ladonin

Moscow State University

Rare earth elements (REEs) associated with soil-abundant Fe-, and Mn-compounds were analyzed to explore the fractionation and anomalies of REEs related to this minerals in Gleyic Umbrisols, Folic Albic Retisols Raptic, Dystric Albic Retisol. HREEs have higher adsorption affinity to Fe-, and Mn-oxides/hydroxides than LREEs. The both positive Ce- and negative Eu- anomalie were estimated. This REEs fraction has a significant effect on the redistribution of heavy lanthanides and cerium, it is the cause of positive cerium anomaly development in some horizons.

*Keywords:* REEs, fractionation, cerium anomaly



СРАВНЕНИЕ СОДЕРЖАНИЯ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ В РАСТЕНИЯХ  
ПОЛЫНИ АВСТРИЙСКОЙ (*ARTEMISIA AUSTRICA*)  
РАЗЛИЧНЫХ ИМПАКТНЫХ ЗОН РОСТОВСКОЙ ОБЛАСТИ

В.А. Чаплыгин, С.С. Манджиева, Ю.А. Литвинов

Академия биологии и биотехнологии им. Д.И. Ивановского Южного федерального  
университета, г. Ростов-на-Дону

Проведено исследование почв и растений двух импактных зон Ростовской области: озера Атаманское и Новочеркасской ГРЭС, характеризующихся различными типами техногенного загрязнения почв тяжелыми металлами. Для изучения влияния различных типов загрязнения на аккумуляцию элементов в различных органах растений была выбрана *Artemisia austriaca*, широко распространенная на исследуемых территориях.

*Ключевые слова:* антропогенная нагрузка, травянистые растения, атмосферные выбросы, гидрогенное загрязнение.

## ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время деятельность промышленных предприятий является основным источником техногенного загрязнения природных сред. Одними из наиболее распространенных поллютантов, содержащихся в промышленных выбросах являются тяжелые металлы (ТМ). Атмосферные выбросы металлургических заводов и электростанций, за счёт распространения содержащихся в них высоких концентраций ТМ на значительные расстояния, создают обширные зоны, подверженные антропогенной нагрузке [8]. Активное использование современной промышленностью естественных водоемов в качестве отстойников и шламонакопителей, в свою очередь, ведет к образованию более локальных зон, однако с экстремально высоким уровнем гидрогенного загрязнения.

При биогеохимической индикации содержания элементов в почвах информативны данные по химическому элементному составу растений [11]. Состав и уровень содержания ТМ в растениях зависит от их биологических (видовых) особенностей, а также от комплекса внешних природных и антропогенных факторов. Для разных видов растений помимо селективного поглощения определенных элементов из почвы и локализации ТМ в различных органах характерны, также, специфические механизмы устойчивости к техногенному загрязнению [6].

Вопрос о путях поступления ТМ в растения является наиболее дискуссионным, что связано с методическими сложностями при разграничении корневого и фолиарного поглощения элементов. Фолиарный путь поступления ТМ в растения может играть существенную роль в условиях антропогенного загрязнения атмосферы, в том числе мелкодисперсными почвенными частицами, обогащенными ТМ, причем содержание некоторых элементов в этих частицах может быть на порядок выше, чем в почве в целом.

Исследования элементного химического состава лекарственных растений в настоящее время получили особую актуальность, т.к. именно в последние десятилетия во всем мире резко увеличился интерес к фитотерапии – комплексу относительно простых технологий профилактики и лечения с использованием лекарственных растений. Увеличение внимания к лекарственным средствам растительного происхождения, т.е. фитопрепаратам, обусловлено постоянно выявляющимися побочными эффектами современных синтетических лекарственных средств и отсутствием лекарств для лечения хронических и длительно протекающих заболеваний. Терапия с участием фитопрепаратов имеет высокий потенциал, но существует вероятность недостаточно эффективного, а также побочного (опасного) действия лекарственных средств растительного происхождения, связанных с плохим качеством лекарственного сырья и конечных продуктов.

Одним из растений, широко распространенных на территориях вокруг озера Атаманское и Новочеркасской ГРЭС (НчГРЭС), является полынь австрийская (*Artemisia austriaca* Pall. ex. Wild.). Данное растение из семейства Астровые (*Asteraceae*) широко применяется в медицине для изготовления потогонных, желчегонных, мочегонных, противосудорожных, жаропонижающих и противорвотных лекарственных препаратов.

Аккумуляция ТМ в растениях особенно актуальна в аграрных регионах, к числу которых относится и Ростовская область. Промышленные предприятия нередко тесно соседствуют с сельскохозяйственными угодьями, что создает риски для здоровья жителей региона. В таких условиях изучение поступления ТМ в растения имеет наибольшую важность, позволяя прогнозировать последствия техногенного загрязнения территории.

## ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

На берегах озера Атаманское в 2015 году было заложено 14 площадок мониторинга на расстоянии 0.7–8.4 км в различных направлениях от места сброса промстоков. Почвенный покров площадок представлен чернозёмом обыкновенным и лугово-чернозёмной почвой. Площадки мониторинга Новочеркасской ГРЭС были заложены в 2007 году в разных направлениях на расстоянии 1–20 км от предприятия [5]. В соответствии с розой ветров было установлено преобладающее северо-западное направление, на котором отбирались образцы почв и растений мониторинговых площадок № 4, 8, 9, 10 и близлежащей к данному направлению площадки № 5. Площадка № 10 расположена в 400 м от автомагистрали. За десятилетия выбросов автотранспорта в почву площадки № 10 поступило значительное количество ТМ, которые в настоящее время продолжают переходить из почвы в растения и служат дополнительным источником техногенной нагрузки. Исследовались почвы прилегающей к НчГРЭС территории, представленные чернозёмом обыкновенным, лугово-чернозёмной и аллювиально-луговой почвами поймы р. Тузлов, а также укусы травянистых растений, произрастающих на данной территории.

Отбор образцов растений *Artemisia austriaca* в обеих импактных зонах проводился во второй декаде июня в фазу массового цветения. В образцах растений и почв определялись такие ТМ, как Cu, Zn и Pb, присутствующие в выбросах НчГРЭС [4] и илах озера Атаманское [7]. Минерализацию проб проводили методом сухого озоления согласно ГОСТ 26929-94. Экстракция ТМ из золы осуществлялась растворением в 20 %-ном растворе HCl с последующим определением методом ААС [3]. Оценка уровня загрязнения растений ТМ проводилась путем сопоставления содержания ТМ в исследуемой растительности с максимально допустимыми уровнями (МДУ) химических элементов в кормах для сельскохозяйственных животных, а также ПДК для лекарственного растительного сырья.

Содержание ТМ в полыни сравнивалось с ПДК для лекарственного сырья и пищевых продуктов в соответствии с СанПиН 2.3.2.560-96. Оценка загрязнения ТМ стеблей и листьев проводилась путем сравнения концентрации элементов в растениях с максимально допустимым уровнем (МДУ) содержания металлов в кормах сельскохозяйственных животных [1]. Для оценки загрязнения почв ТМ по валовому содержанию и подвижным формам использовали руководящий документ ГН 2.1.7.2041 (2006) [2].

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Отмечается высокий уровень загрязнения почв берегов озера Атаманское Zn, колеблющийся от 2.8 до 13.9 ОДК для общего содержания и от 1.7 до 25.7 ПДК для подвижных форм (табл. 1). Также присутствует загрязнение почв подвижными формами Cu и Pb. Наибольшее загрязнение сосредоточено в 1.5 км зоне вокруг место сброса стоков завода «Химволокно».

Отмечается превышение ПДК для общего содержания Pb, а также подвижных форм Pb, Zn и Cu в пределах 5 км зоны вокруг НчГРЭС (табл. 2). Общее содержание и содержание подвижных форм ТМ в почве имеет максимум на площадках северо-западного направления и снижаясь по мере удаления от предприятия, что является характерным для почв различных импактных зон согласно исследованиям [10]. Только на площадках преобладающего направления отмечается превышение ПДК для подвижных форм элементов. Также, для всех ТМ наблюдается превышение кларка для почв.

Таблица 1. Общее содержание и подвижные формы ТМ в почвах импактной зоны озера Атаманское.

№ площадки	Направление и расстояние от источника, км	Zn	Cu	Pb
1	1.5 ССВ	<b>241/53</b>	31/7	23/6
2	1.1 ССЗ	<b>694/249</b>	40/7	14/2
3	0.9 СЗ	125/ <b>38</b>	32/ <b>9</b>	20/7
4	0.7 СВ	<b>830/336</b>	33/7	<b>61/9</b>
5	0.9 СВ	<b>2129/591</b>	36/ <b>6</b>	28/4
6	0.8 ЮВ	<b>3051/476</b>	18/5	<b>59/4</b>
7	1.0 ЮВ	<b>1392/414</b>	47/7	<b>52/3</b>
8	0.8 С	<b>625/219</b>	52/3	31/3
9	1.7 Ю	44/7	17/3	32/2
10	6.7 ССВ	112/10	39/ <b>6</b>	28/2
11	6.1 С	72/19	29/3	28/2
12	4.6 В	67/11	6/2	2/4
13	8.4 З	40/17	13/3	28/5
14	2.2 СЗ	90/13	40/ <b>6</b>	32/3
НСР <sub>0,95</sub>		34/11	4/0.4	3/0.2
ПДК/ОДК		220/23	132/3	32/6
Кларк для почв		50	20	10

Примечание: общее содержание / подвижные формы; жирным шрифтом отмечено превышение ПДК/ОДК.

Таблица 2. Общее содержание и подвижные формы ТМ в почвах импактной зоны НчГРЭС.

№ площадки	Направление и расстояние от источника, км	Zn	Cu	Pb
1	1.0 СВ	104/11	51/2	<b>43/4</b>
2	3.0 ЮЗ	79/12	43/ <b>4</b>	21/2
3	2.7 ЮЗ	99/5	55/2	30/2
4	1.6 СЗ	112/17	72/ <b>5</b>	<b>66/7</b>
5	1.2 СЗ	141/ <b>25</b>	63/ <b>4</b>	<b>60/7</b>
6	2.0 ССЗ	114/13	58/ <b>4</b>	<b>58/5</b>
7	1.5 С	92/6	43/1	<b>34/3</b>
8	5.0 СЗ	116/14	59/3	<b>43/3</b>
9	15.0 СЗ	82/2	42/1	28/1
10	20.0 СЗ	79/1	42/1	<b>38/3</b>
11	1.0 ЮВ	124/1	44/1	28/2
НСР <sub>0,95</sub>		8.0/0.4	4.1/0.1	2.2/0.1
ПДК/ОДК		220/23	132/3	32/6
Кларк для почв		50	20	10

Примечание: общее содержание / подвижные формы; жирным шрифтом отмечено превышение ПДК/ОДК.

Содержание Zn в растениях всех площадок превышает МДУ, достигая 4.8 МДУ в растениях на площадке № 5 (табл. 3). Превышение МДУ по Pb отмечается только на площадке № 1. Оценка содержания ТМ в растениях по ПДК для лекарственного сырья, показала значительно более высокий уровень загрязнения. Данная ПДК превышена по Cu, Zn и Pb на большинстве площадок мониторинга и составляет 1.1–2.4, 1.1–4.8 и 2.5–18.0 ПДК соответственно. Загрязнение Cu присутствует на площадках № 1, № № 3–7 и № 12, составляя от 1.1 до 2.4 ПДК. Cu и Pb аккумулируются преимущественно в корневой системе растений. Накопление Zn идет преимущественно в надземной массе полыни. Наибольшая аккумуляция ТМ отмечается в 1.5 км зоне вокруг озера Атаманское. По мере удаления от источника загрязнения преобладание аккумуляции элементов в корневой системе увеличивается (табл. 3). Это вы-

звано безбарьерным поглощением данных поллютантов растением в условиях высокого уровня гидрогенного загрязнения почвы. Схожие данные о высокой аккумуляции ТМ растениями в условиях техногенной нагрузки на почвы были получены [9].

Таблица 3. Содержание Zn, Cu и Pb в различных частях растений *Artemisia austriaca* импактной зоны озера Атаманское.

№ площадки	Направление и расстояние от источника, км	Zn	Cu	Pb
1	1.5 ССВ	<b>150/43</b>	17/11	<b>9.2/2.0</b>
2	1.1 ССЗ	<b>159/104</b>	10/9	1.9/3.0
3	0.9 СЗ	<b>57/77</b>	10/17	2.6/2.0
4	0.7 СВ	<b>125/64</b>	13/14	1.2/1.1
5	0.9 СВ	<b>241/153</b>	24/13	1.7/2.7
6	0.8 ЮВ	<b>141/156</b>	12/17	2.2/2.6
7	1.0 ЮВ	<b>119/110</b>	12/20	1.4/2.2
8	0.8 С	<b>64/88</b>	9/13	1.2/2.4
9	1.7 Ю	<b>87/47</b>	9/5	1.5/1.5
10	6.7 ССВ	<b>74/71</b>	10/12	0.5/1.8
11	6.1 С	<b>81/57</b>	10/10	2.4/2.3
12	4.6 В	<b>75/76</b>	11/18	3.2/2.2
13	8.4 З	<b>115/118</b>	7/7	1.6/2.6
14	2.2 СЗ	<b>57/35</b>	9/5	1.3/2.6
НСР <sub>0.95</sub>		7.0/8.0	3.0/1.5	0.1/0.2
ПДК для лекарст. сырья		50	10	0.5
МДУ для кормов		50	30	5.0

Примечание: общее содержание / подвижные формы; жирным шрифтом отмечено превышение МДУ.

В импактной зоне НчГРЭС установлено полиэлементное загрязнение растений полыни Pb (до 4.3 МДУ) и Zn (1.1) (табл. 4). ПДК Pb для лекарственного сырья превышено на всех площадках мониторинга и достигает 44 раз на площадке № 5. Как и в случае с содержанием ТМ в почве, отмечается наибольшая концентрация элементов в растениях, произрастающих в пределах 5 км зоны вокруг предприятия с максимумом на СЗ направлении.

Таблица 4. Содержание Zn, Cu и Pb в различных частях растений *Artemisia austriaca* импактной зоны НчГРЭС.

№ площадки	Направление и расстояние от источника, км	Zn	Cu	Pb
1	1.0 СВ	27/23	7/7	<b>17.3/19.0</b>
2	3.0 ЮЗ	38/37	6/7	4.2/4.0
3	2.7 ЮЗ	31/19	4/7	3.0/3.0
4	1.6 СЗ	47/25	10/6	<b>15.4/18.3</b>
5	1.2 СЗ	26/19	8/8	<b>21.0/22.2</b>
6	2.0 ССЗ	23/15	3/6	<b>7.2/8.3</b>
7	1.5 С	15/16	7/7	1.0/1.1
8	5.0 СЗ	<b>58/21</b>	2/8	3.2/3.1
9	15.0 СЗ	28/20	6/8	3.0/10.4
10	20.0 СЗ	14/17	10/5	<b>20.2/15.1</b>
11	1.0 ЮВ	38/22	11/11	2.0/3.2
НСР <sub>0.95</sub>		3.1/1.4	0.4/0.3	1.3/0.4
ПДК для лекарст. сырья		50	10	0.5
МДУ для кормов		50	30	5.0

Примечание: общее содержание / подвижные формы; жирным шрифтом отмечено превышение МДУ.

На площадке № 1, расположенной в 1 км от ГРЭС, и на площадке № 10, расположенной в 20 км от ГРЭС, установлено высокое содержание Pb, до 40 ПДК для продовольственного сырья, что связано с дополнительной эмиссией Pb за счет выбросов автотранспорта (табл. 4). Zn аккумулируются преимущественно в надземной части растения, в то время как для Cu и Pb характерно несколько большее содержания в корнях (табл. 4).

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Установлен экстремально высокий уровень загрязнения почв импактной зоны озера Атаманское Zn, а также загрязнение почв обеих исследуемых зон Pb Cu. Импактная зона НчГРЭС отличается меньшим уровнем загрязнения почв ТМ, однако значительно большей площадью распространения техногенной нагрузки (5 км) по сравнению с зоной озера Атаманское (1.5 км). Наблюдается значительное превышение МДУ для Zn в растениях полыни австрийской в импактной зоне озера Атаманское и для Pb в импактной зоне НчГРЭС. ПДК для лекарственного сырья превышена по всем изучаемым ТМ в импактной зоне озера Атаманское и только по Pb в районе НчГРЭС. Преимущественная аккумуляция Zn идет в надземной части, а Pb и Cu – в корневой системе растений полыни вне зависимости от вида техногенного загрязнения. В импактной зоне озера Атаманское преобладающим поллютантом является Zn, в зоне влияния НчГРЭС – Pb.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. *Временные максимально допустимые уровни (МДУ) некоторых химических элементов госсипола в кормах сельскохозяйственных животных.* Утвержден Главным Управлением Ветеринарии министерства сельского хозяйства РФ, 1991.
2. *ГН 2.1.7.2041-06* Предельно допустимые концентрации (ПДК) химических веществ в почве утвержденные Главным государственным санитарным врачом Российской Федерации 19 января 2006 года.
3. *Методические указания по определению тяжелых металлов в почвах сельхозугодий и продукции растениеводства.* М.: ЦИНАО, 1992. 61 с.
4. *Экологический вестник Дона: О состоянии окружающей среды и природных ресурсов Ростовской области в 2019 году.* Ростов-на-Дону. 2019. С. 283.
5. *Chaplygin V., Mandzhieva S., Minkina T., Sushkova S., Kizilkaya R., Gulser C., Zamulina I., Kravtsova N., Lobzenko I., Chernikova N.* Sustainability of agricultural and wild cereals to aero-technogenic exposure // *Environmental Geochemistry and Health.* 2019. DOI: 10.1007/s10653-019-00411-6).
6. *Kabata-Pendias A.* Trace Elements in Soils and Plants. 4th Edition. Boca Raton, FL: Crc Press, 2010. P. 548 с.
7. *Minkina T., Fedorenko G., Nevedomskaya D., Fedorenko A., Chaplygin V., Mandzhieva S.* Morphological and anatomical changes of *Phragmites australis* Cav. Due to the uptake and accumulation of heavy metals from polluted soils // *Science of the total environment.* 2018. № 636. P. 392–401.
8. *Minkina T.M., Mandzhieva S.S., Chaplygin V.A., Nazarenko O.G., Maksimov A.Y., Zamulina I.V., Burachevskaya M.V., Sushkova S.N.* Accumulation of Heavy Metals by Forb Steppe Vegetation According to Long-Term Monitoring Data // *Arid Ecosystems,* 8 (3), P. 190–202, 2018a. DOI: 10.1134/S2079096118030058.
9. *Prabhat K.R., Sang S.L., Ming Z., Yiu F.T., Ki-Hyun K.* Heavy metals in food crops: Health risks, fate, mechanisms, and management // *Environment International.* 2019. V. 125. P. 365–385.
10. *Tefera M., Gebreyohannes F., Saraswathi M.* Heavy metal analysis in the soils of in and around Robe town, Bale zone, South Eastern, Ethiopia // *Eurasian J. Soil Sci.* 2018. № 7 (3). P. 251–256. DOI: 10.18393/ejss.430116.
11. *Maksimov N., Evmenyeva A., Breygina M., Yermakov I.* The role of reactive oxygen species in pollen germination in *Picea pungens* (blue spruce). *Plant Reproduction,* Springer Verlag (Germany). Vol. 31(4). 2018. 357–365.

Работа рекомендована д.б.н., профессором Т.М. Минкиной.

# COMPARISON OF THE CONTENT OF HEAVY METALS IN PLANTS OF THE *ARTEMISIA AUSTRICA* IN DIFFERENT IMPACT ZONES OF THE ROSTOV REGION

V.A. Chaplygin, S.S. Mandzhieva, Yu.A. Litvinov

Academy of Biology and Biotechnology named after D.I. Ivanovsky of the Southern Federal University, Rostov-on-Don

A study of soils and plants of two impact zones of the Rostov region: Atamanskoe Lake and Novocherkasskaya power station, characterized by different types of soils technogenic pollution by heavy metals (HM), was carried out. To research the different types of pollution effect on the Zn, Cu and Pb accumulation and distribution in various plant organs, *Artemisia austriaca*, which was widespread in the studied territories, was chosen. An extremely high level of soil contamination was established in the impact zone of Atamanskoe Lake Zn, as well as soil contamination in both Pb and Cu studied zones. The impact zone of the Novocherkasskaya power station is characterized by a lower HM contamination level in soils, but a much larger distribution of anthropogenic load area (5 km) compared with the Atamanskoe Lake zone (1.5 km). The predominant accumulation of Zn occurs in the aerial part, and Pb and Cu – in the root system of *Artemisia austriaca* plants, regardless of the type of technogenic pollution. In the Atamanskoe Lake impact zone, the predominant pollutant is Zn, and in the influence zone of Novocherkasskaya power station, Pb.

*Keywords:* anthropogenic load, herbaceous plants, atmospheric emissions, hydrogen pollution.

УДК 631.421

## ПРОСТРАНСТВЕННОЕ ИЗМЕНЕНИЕ АГРОХИМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПАХОТНЫХ ЧЕРНОЗЕМОВ

К.А. Гордеева, И.А. Гусева, Л.И. Латыпова

Казанский (Приволжский) федеральный университет

Было проведено агрохимическое обследование черноземов сельскохозяйственных территорий расположенных в Закамье Республики Татарстан с целью внедрения систем дифференцированного внесения удобрений. Установлено, что агрохимические показатели пахотных черноземных почв Закамья Республики Татарстан характеризуются высокой вариабельностью.

*Ключевые слова:* вариабельность, чернозем, плодородие почв, агрохимический анализ.

### ВВЕДЕНИЕ

Исследования вариабельности свойств почв является актуальным при решении современных научно-прикладных проблем, так как несистемное внесение минеральных удобрений может повлиять на агрохимическое состояние сельскохозяйственных угодий, в том числе, на пространственную вариабельность содержания элементов питания [2, 3]. Традиционные подходы к агрохимическому обслуживанию сельскохозяйственных угодий ориентированы на внесение расчетных доз минеральных удобрений на поля севооборотов, по результатам оценки содержания доступных элементов питания на отдельных элементарных участках. Правильная реализация технологий дифференцированного внесения минеральных удобрений позволяет получать высокие урожаи экологически безопасной продукции при минимальных затратах минеральных удобрений и с минимальным негативным воздействием на почвы [1].

Цель исследования – провести агрохимическое обследование почв для выявления степени их вариабельности по агрохимическим показателям для перспектив внедрения систем точного внесения минеральных удобрений.

### ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Объектом исследования были черноземные почвы сельскохозяйственных территорий, расположенных в Закамье Республики Татарстан. В ходе камеральной подготовки, поля были поделены на участки отбора смешанных проб площадью 5 га. Суммарная площадь 24 об-

---

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, проект № 19-29-05061 мк.

© К.А. Гордеева, И.А. Гусева, Л.И. Латыпова, 2021

следованных полей составила 2612 га, элементных участков отбора образцов – 536 шт. Отбор почвенных проб проводился в конце вегетации культуры-предшественника 2018 года. Смешанные образцы отбирались по маршруту, проложенному по диагонали элементарных участков, и составлялись из 20–30 индивидуальных проб, отбираемых через примерно равные расстояния с помощью тростевого бура. Начальную и конечную точку маршрута фиксировали с помощью GPS-навигатора Trimble Juno 5D (точность геопозиционирования до 1 м). Определение подвижных форм фосфора и калия проводились по методу Чирикова (ГОСТ 26204-91) и Мачигина (ГОСТ 26205-91), щелочногидролизуемый азот определялся по методу Корнфилда.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЯ

По полученным данным были построены бокс-плот графики варьирования агрохимических свойств пахотных черноземов (рис. 1–3). На графиках можно наблюдать, что обследованные поля характеризуются широким варьированием распределения содержания доступных форм фосфора и калия, а также щелочногидролизуемого азота.

Ряд авторов утверждают, что внесение удобрений, повышая средний уровень содержания питательных веществ, обычно приводит к возрастанию пространственной вариабельности этих показателей, причем в такой степени, что варьирование, обусловленное естественными факторами, составляет лишь малую долю антропогенного. В работе [4] сравнивали пространственное варьирование почвенных свойств в естественных условиях и в условиях сельскохозяйственного использования. Было определено, что в результате сельскохозяйственного использования меняются почвенные свойства, а также их пространственное распределение.

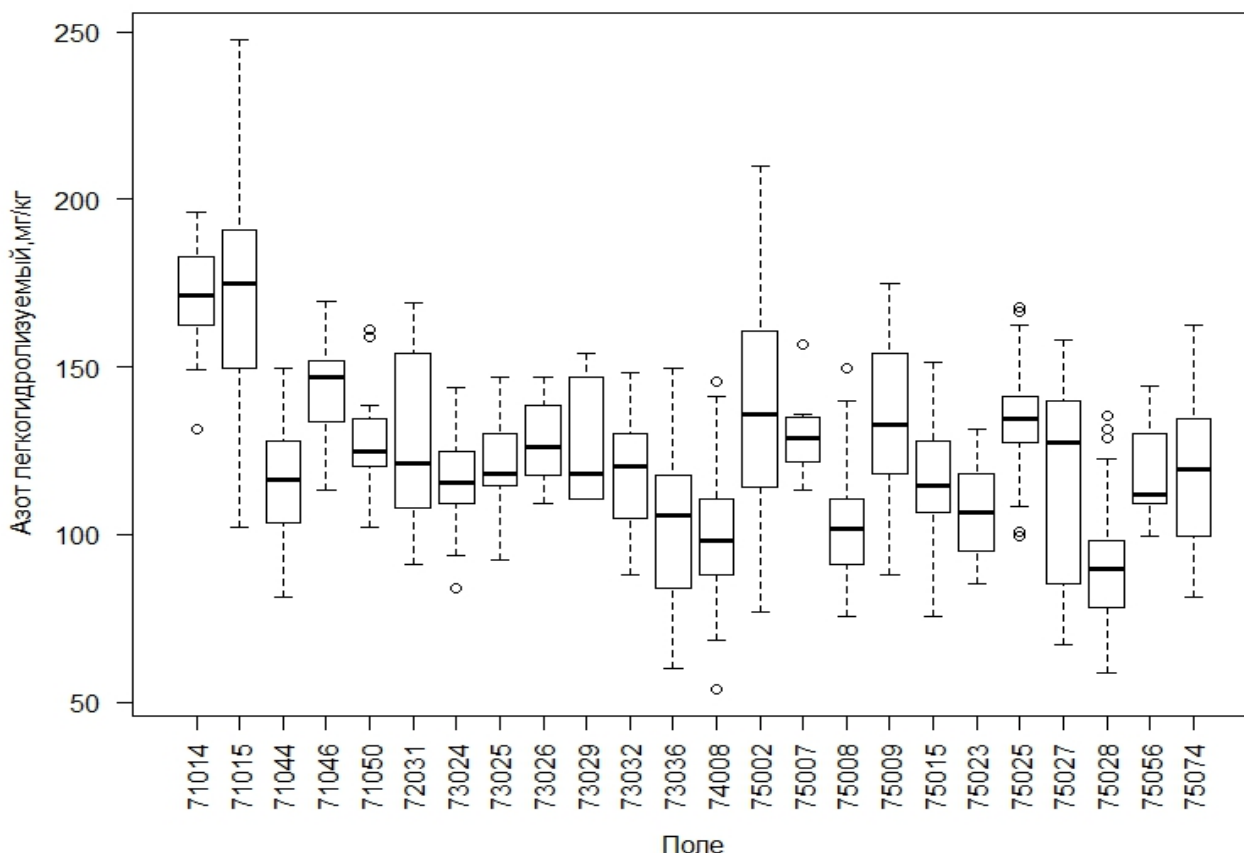


Рисунок 1. Распределение содержания щелочногидролизуемого азота на 24 полях.

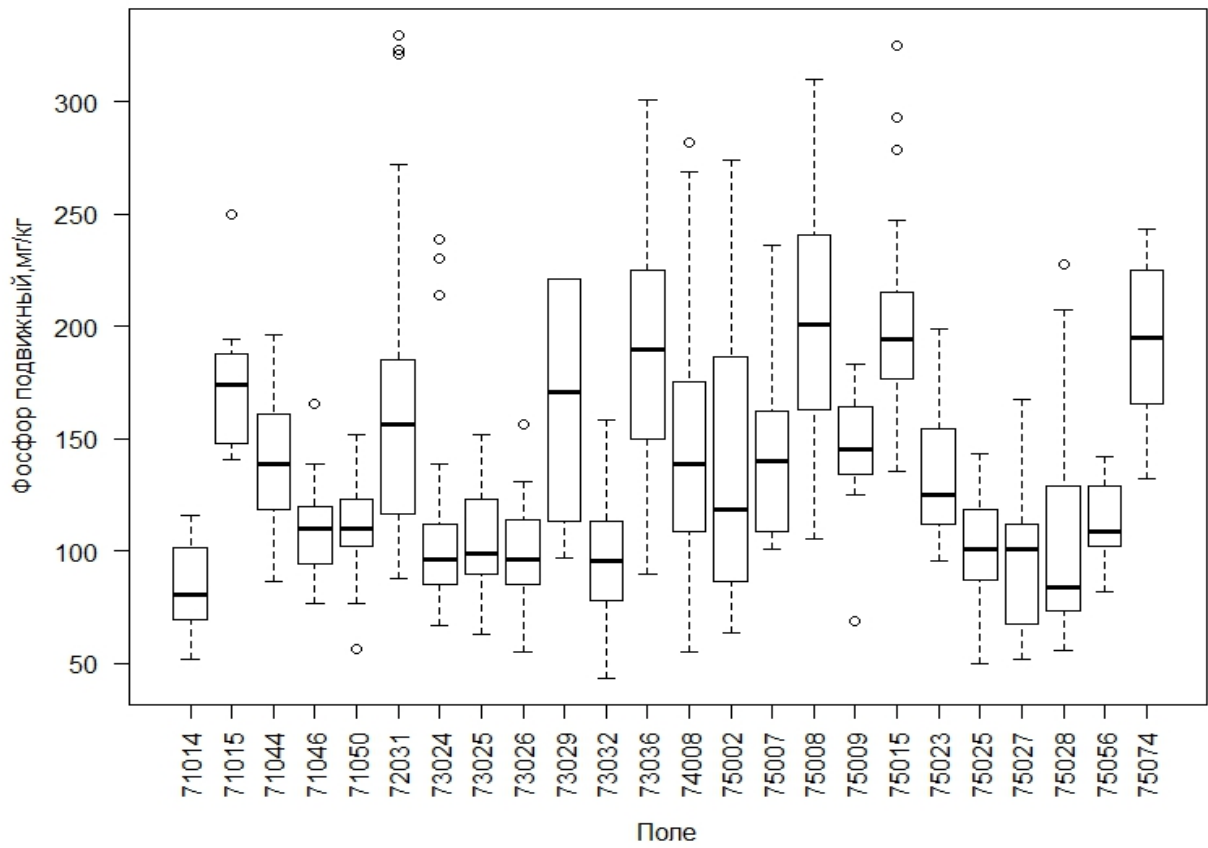


Рисунок 2. Распределение содержания подвижного фосфора на 24 полях.

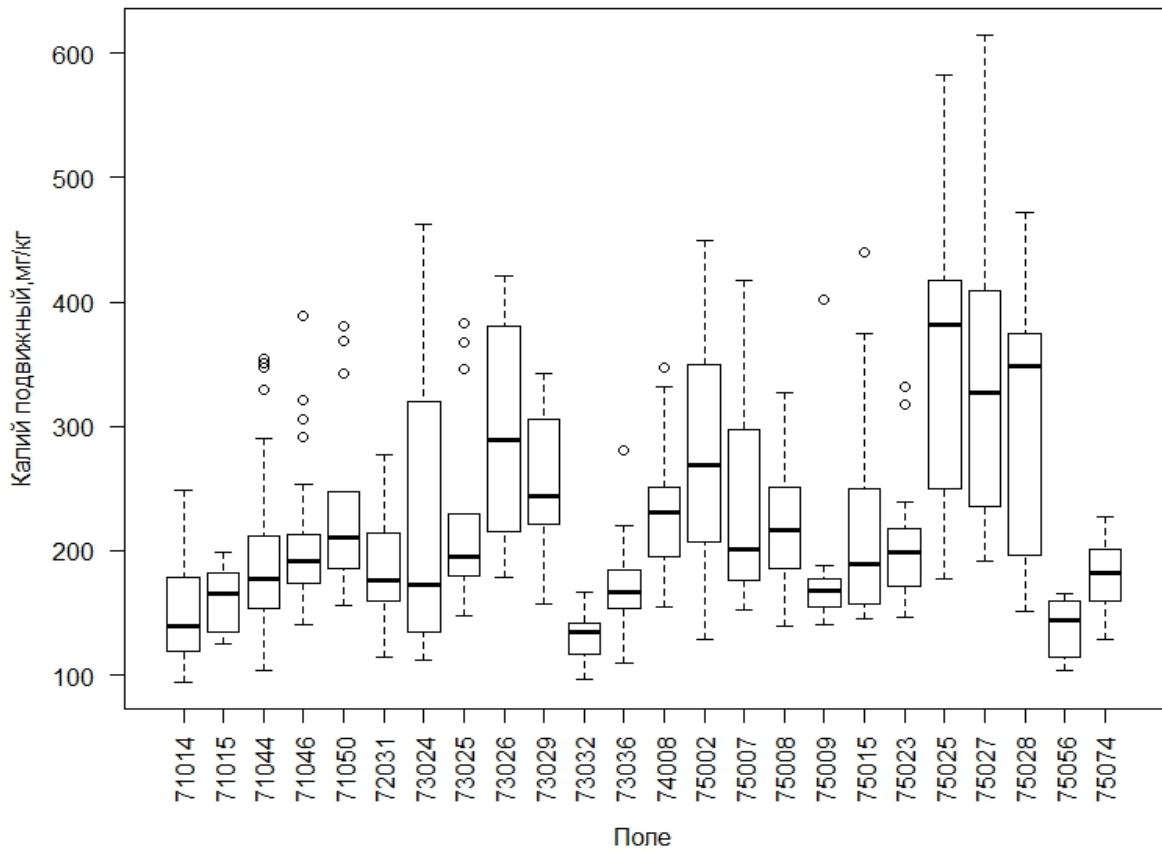


Рисунок 3. Распределения содержания подвижного калия на 24 полях.

В табл. 1 представлена статистическая характеристика варибельности агрохимических показателей по 24 полям. Анализ показал, что на 24 полях содержание доступного фосфора



варьирует в пределах от 84.0 до 202.9 мг/кг, содержание доступного калия находится в пределах от 130.9 до 350.7, вариабельность фосфора и калия характеризуется как сильная. Содержание щелочногидролизуемого азота варьирует в пределах от 91.9 до 171.3, вариабельность оценивается как средняя. По значению рН солевой вытяжки поля характеризуются как слабокислые и нейтральные, степень вариабельности слабая.

Таблица 1. Статистическая характеристика вариабельности агрохимических показателей по 24 полям.

Статистические показатели	Гидролизуемый азот, мг/кг	Доступный фосфор, мг/кг	Обменный калий, мг/кг	рН сол.
Среднее значение	124.0	136.2	221.1	5.9
Максимальное содержание	171.3	202.9	350.7	6.8
Минимальное содержание	91.9	84.0	130.9	5.3
Размах варьирования	79.4	118.9	219.8	1.5
Стандартное отклонение	19.1	37.1	57.7	0.4
Коэффициент вариации, %	15.4	27.2	26.1	7.5
Оценка коэффициента вариации	Средняя	Сильная	Сильная	Слабая

Установлено, что широкое варьирование содержания азота, фосфора и калия наблюдается не только между отдельными полями, но и внутри отдельных полей (рис. 4–5).



Рисунок 4. Доля полей с различной вариабельностью для подвижных форм фосфора и калия.



Рисунок 5. Доля полей с различной вариабельностью для гидролизуемого азота.

По содержанию доступного фосфора только 17 % полей из 24 характеризуются средним варьированием, 58 % сильным, а 25 % очень сильным, примерно такая же картина по содержанию доступного калия, где 21 % полей из 24 характеризуются средним варьированием, 46 % сильным и 33 % очень сильным. По содержанию щелочногидролизуемого азота внутри полевая вариабельность несколько ниже, сильной вариабельностью характеризуется 25 % полей, средней 63 % и слабой 22 %.

В работе [5] была изучена внутривополевая вариабельность основных агрохимических показателей дерново-подзолистой легкосуглинистой почвы. Авторами показано, что с учетом выявленных агрохимических особенностей почвы целесообразно использование дифференцированного внесения минеральных удобрений с учетом почвенной неоднородности.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенного исследования можно сделать вывод, что элементарный участок размером 5 га для отбора смешанных проб в черноземной зоне Республики Татарстан позволяет с высокой точностью описать пространственную вариабельность агрохимических свойств почв. Установлено, что агрохимические показатели пахотных черноземных почв Закамья Республики Татарстан характеризуются высокой вариабельностью, что делает перспективным внедрение систем дифференцированного внесения минеральных удобрений.

Таким образом, применение систем дифференцированного внесения минеральных удобрений, может обеспечить рациональное применение минеральных удобрений с максимальной эффективностью, что позволит существенно увеличить урожайность сельскохозяйственных культур, одновременно обеспечивая их высокое качество.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Ваганова Е.С., Рязанов С.С., Галиуллина А.Г., Шакирзянов Р.В. Методические аспекты интерполяции пространственной неоднородности агрохимических свойств пахотных угодий Северного Казахстана // Российский журнал прикладной экологии, № 1(5). 2016. С. 47–52.
2. Кураченко Н.Л., Хижняк С.В. Пространственное варьирование структурно-агрегатного состава черноземов и серых лесных почв Красноярской лесостепи в предельно однородных условиях почвообразования // Вестник Алтайского государственного аграрного университета, № 1 (63). 2010. С. 35–40.
3. Смирнова Е.В., Гиниятуллин К.Г., Сахабиев И.А., Рыжих Л.Ю. Оценка вариабельности агрохимических свойств сельскохозяйственных угодий в перспективе внедрения технологий точного земледелия // Научные труды международной научно-практической конференции «Сельское хозяйство и продовольственная безопасность: технологии, инновации, рынки, кадры», 2019. С. 232–242.
4. Сидорова В.А. Изменение пространственной вариабельности почвенных свойств в результате антропогенного воздействия // Экология и география почв, 2009. С. 30–47.
5. Шемняков Д.В., Налиухин Н.А. Изучение внутривоплевой вариабельности агрохимических показателей пахотных почв и определение потребности в удобрениях и мелиорантах в технологиях точного земледелия // Молочно-хозяйственный вестник, № 2 (18). 2015. С. 55–64.

Работа рекомендована к.б.н., зав. каф. почвоведения КФУ Е.В. Смирновой.

#### SPATIAL CHANGE OF AGROCHEMICAL PROPERTIES OF ARABLE CHERNOZEMS

K.A. Gordeeva, I.A. Guseva, L.I. Latypova

Kazan (Volga region) federal university

An agrochemical survey of chernozems of agricultural territories which located in Zakamye region of the Republic of Tatarstan was carried out for introducing differential fertilizer application systems. It is established that agrochemical indicators of arable Chernozem soils of the Zakamye region of the Republic of Tatarstan are characterized by high variability.

*Keywords:* variability, chernozems, soil fertility, agrochemical analysis

## ВЛИЯНИЕ БИОУГЛЯ И РАСТИТЕЛЬНЫХ ОСТАТКОВ НА УСВОЕНИЕ КАДМИЯ И АЗОТА РАСТЕНИЯМИ ЯЧМЕНЯ

Ю.Р. Искандирова

Санкт-Петербургский государственный университет

В модельном лабораторном эксперименте на агродерново-подзолистой среднесуглинистой почве изучено действие биоугля и растительных остатков на усвоение кадмия и азота растениями ячменя.

Самая низкая устойчивость к кадмию обнаружена в почве без добавления биопрепаратов. При совместном внесении биоугля и растительных остатков установлена 100 %-ая устойчивость растений к кадмию.

Растительные остатки увеличили поступление азота в растения до уровня контрольного варианта без Cd.

Биоуголь снизил концентрацию и вынос кадмия растениями ячменя, растительные остатки не изменили концентрацию кадмия, но резко увеличили вынос кадмия за счет увеличения биомассы растений.

*Ключевые слова:* биомасса ячменя, устойчивость растений, азотное питание.

### ВВЕДЕНИЕ

Кадмий (Cd (II)) признан одним из самых токсичных тяжелых металлов в окружающей среде, поскольку он обладает высокой мобильностью и является токсичным для организмов даже при низких концентрациях [3; 6; 10].

Концентрация кадмия возрастает в каждом последующем звене пищевой цепи, что делает его особенно опасным для высших организмов. Кадмий оказывает неблагоприятное влияние на широкий спектр биологических процессов у человека [7]. Его хроническое воздействие приводит к отложению в почках, почечной недостаточности, болезням легких и вызывает хрупкость костей [12]. Ярким примером является болезнь «Итай-Итай» в Японии, вызванная чрезмерным потреблением Cd через загрязненные пищевые продукты [5].

Загрязнение кадмием окружающей среды и непосредственно почвы происходит за счёт отходов горнодобывающей промышленности и металлургии, отопительных систем, мусоро-сжигательных заводов, выхлопных газов автомобилей, цементных заводов и при внесении загрязненных фосфатных удобрений [4].

При загрязнении почв кадмием ухудшаются экологические функции почвы, подавляется жизнедеятельность почвенных микроорганизмов [8; 14], падает урожайность и качество сельскохозяйственной продукции [3].

Внесение в почву растительных остатков приводит к стимуляции почвенной аммонифицирующей и нитрифицирующей микрофлоры, за счёт чего улучшается азотное питание и увеличивается биомасса растений [1]. Кроме того, почвенные микроорганизмы способны осмотрофно поглощать кадмий и выводить его из зоны действия корневых систем.

Биоуголь способен выводить тяжёлые металлы из биологического круговорота за счёт присущих ему сорбционных свойств [9, 11]. Однако сорбционные свойства биоугля в отношении кадмия недостаточно изучены [13].

Цель исследования – изучить влияние биоугля и растительных остатков на доступность азота растениям ячменя при избытке кадмия в почве.

### ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Объектом исследования служил пахотный горизонт агродерново-подзолистой среднесуглинистой почвы, отобранный в Гатчинском районе Ленинградской области на территории Меньковского филиала Агрофизического НИИ.

Лабораторный опыт включал 8 вариантов: контроль – чистая почва (П), почва + биоуголь (П+БУ), почва + растительные остатки (П+РО), и совместное внесение биоугля с растительными остатками (П+БУ+РО), как с кадмием, так и без него. Компостирование проведено в оптимальных гидротермических условиях в 3-кратной повторности в сосудах на 0.5 кг почвы.

Действующими веществами были биоуголь, бобово-злаковые растительные остатки и кадмий (CdCl<sub>2</sub>). Биоуголь и бобово-злаковые растительные остатки, состоявшие из клевера красного (*Trifolium pratense*) и тимофеевки (*Phleum pratense*) в равных отношениях, вносились в сосуды из расчета 3 г/кг сухой почвы. Кадмий вносился в почву в дозе 50 мг/кг, что выше ПДК в 10 раз.

Время компостирования почвы составило 3 недели.

После компостирования в сосуды были посеяны наклюнувшиеся семена ячменя финского сорта Потра 2016 года. В каждом сосуде было оставлено по 6 растений ячменя. В фазе «начало колошения» растения были убраны и высушены. Дальнейшие исследования осуществлялись с сухой биомассой растений: был определен вес сухой биомассы, общее содержание азота и кадмия в растениях.

Определение азота в растениях проводилось общепринятыми методами [2], определение общего содержания кадмия в растениях – на атомно-абсорбционном спектрометре.

Математическая обработка проводилась в программе IBM SPSS.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЯ

В табл. 1 представлено влияние биоугля и растительных остатков на индекс устойчивости растений к кадмию.

Индекс устойчивости был рассчитан по отношению массы растений с кадмием и без него и выражен в процентах.

Показано, что самая низкая устойчивость к кадмию обнаружена в почве без добавления биопрепаратов. При добавлении биоугля индекс устойчивости увеличился на 10 %. Добавление растительных остатков увеличило индекс устойчивости до 90 %. При совместном внесении биоугля и растительных остатков установлена 100 %-ая устойчивость растений к кадмию, поскольку в этом варианте биоуголь сорбировал кадмий и выводил его из зоны действия корневой системы, а растительные остатки, стимулируя жизнедеятельность микроорганизмов почвы, обеспечивали улучшение азотного питания.

Таблица 1. Влияние биоугля и растительных остатков на индекс устойчивости растений к кадмию, %.

Вариант	Масса растений без Cd, г/сосуд	Масса растений с Cd, г/сосуд	Индекс устойчивости, %
Почва (П)	2.7 b	1.3 a	48
П + БУ	2.8 b	1.6 a	58
П + Р. о.	3.8 d	3.5 c	90
П + БУ + Р. о.	4.0 d	4.0 d	100

На рис. 1 показано влияние биоугля и растительных остатков на вынос азота растениями ячменя в мг/сосуд.

Усвоение растениями азота по фону кадмия произошло в меньших количествах, чем без фона кадмия. Биоуголь не оказал никакого влияния на усвоение азота растениями без фона кадмия в почве, а по фону кадмия биоуголь достоверно увеличил содержание и вынос азота растениями ячменя, однако не снял токсичное действие полностью.

Растительные остатки и совместное применение растительных остатков с биоуглем увеличили интенсивность усвоения азота растениями до уровня контрольного варианта без фона кадмия, но целиком снять ингибирующее действие кадмия не удалось.

В табл. 2 представлены концентрации и усвоение кадмия растениями ячменя при внесении биоугля и растительных остатков.

Концентрация кадмия в растениях ячменя была самой большой и практически одинаковой в вариантах с почвой без применения биопрепаратов и с внесением в почву только растительных остатков, что объясняется увеличением биомассы растений за счет улучшения азотного питания. Наименьшая концентрация кадмия в растениях отмечена в вариантах с биоуглем. Это можно объяснить сорбцией кадмия биоуглем.

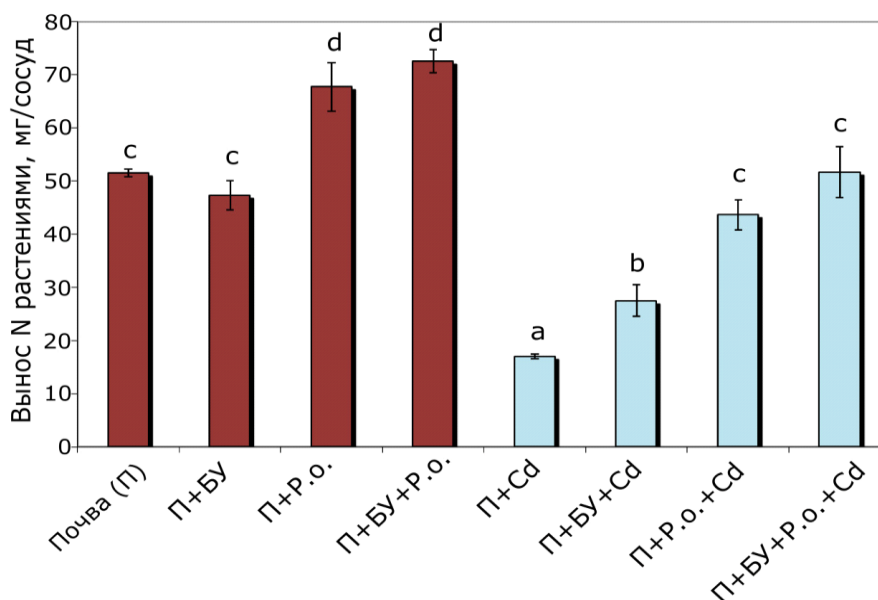


Рисунок 1. Влияние биоугля и растительных остатков на вынос азота растениями ячменя для разных вариантов лабораторного опыта, мг/сосуд.

Усвоение кадмия растениями ячменя установлено наибольшее в вариантах с растительными остатками, за счёт наибольшей биомассы в этих вариантах, наименьшее – в варианте с биоуглем, за счёт сорбционных свойств биоугля.

Таблица 2. Влияние биоугля и растительных остатков на концентрацию и усвоение кадмия растениями ячменя.

Вариант	Сухой вес растений, г/сосуд	Концентрация Cd в растениях, мг/г сухой биомассы	Усвоение Cd растениями, мг/сосуд
Контроль	2.7 b	0.0000	0.0000
Почва + Cd	1.3 a	0.060 b	0.079 b
Почва + БУ + Cd	1.6 a	0.027 a	0.043 a
Почва + Р.о. + Cd	3.5 c	0.052 b	0.181 d
Почва + БУ + Р.о. + Cd	4.0 d	0.027 a	0.109 c

Табл. 3 демонстрирует транслокацию кадмия из почвы в растения ячменя при внесении биоугля и растительных остатков.

Наименьший процент поступления кадмия в растения из почвы установлен в варианте с биоуглем, он оказался в 2 раза ниже, чем по фону кадмия. Наибольший процент поступления кадмия в растения из почвы показан в вариантах с растительными остатками, причем в варианте совместного внесения биоугля и растительных остатков наблюдается несколько меньшее поступление кадмия в растения, что может быть связано с частичной сорбцией кадмия биоуглем.

Таким образом, рекомендуется использовать биоуголь с целью снижения поступления кадмия в растения, а растительные остатки, напротив, с целью увеличения выноса кадмия растительной биомассой для улучшения фиторемедиации загрязнённых кадмием почв.

Таблица 3. Влияние биоугля и растительных остатков на транслокацию кадмия из почвы в растения ячменя, %.

Вариант	Содержание Cd в почве, мг/сосуд	Вынос Cd в растения ячменя, мг/сосуд	% поступления Cd в растения из почвы
Почва + Cd	25.0	0.079 b	0.32
Почва + БУ + Cd	25.0	0.043 a	0.17
Почва + Р.о. + Cd	25.0	0.181 d	0.72
Почва + БУ + Р.о. + Cd	25.0	0.109 c	0.44

## ВЫВОДЫ

1. Показано, что биоуголь не повлиял на величину сухой биомассы ячменя как по фону Cd, так и без него. Совместное применение биоугля и растительных остатков ликвидировало отрицательное действие Cd на биомассу растений ячменя.

2. Самая низкая устойчивость к кадмию обнаружена в почве без добавления биопрепаратов. При совместном внесении биоугля и растительных остатков создавалась 100 %-ая устойчивость растений к кадмию, поскольку в этом варианте биоуголь сорбировал кадмий и выводил его из зоны действия корневой системы, а растительные остатки, стимулируя жизнедеятельность микроорганизмов почвы, обеспечивали улучшение азотного питания.

3. На почве загрязненной кадмием биоуголь достоверно, но минимально увеличил вынос азота растениями ячменя, а растительные остатки увеличили поступление азота в растения до уровня контрольного варианта без Cd.

4. Биоуголь снизил концентрацию и усвоение кадмия растениями ячменя, растительные остатки не изменили концентрацию кадмия, но резко увеличили вынос кадмия за счет увеличения биомассы растений.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Банкина Т.А., Петров М.Ю., Петрова Т.М., Банкин М.П. Хроматография в агроэкологии, СПб.: НИИ Химии СПбГУ, 2002, с. 155–165, с. 305–310, с. 223.
2. Крейер К.Г., Банкина Т.А., Орлова Н.Е., Юрьева Г.М. Практикум по агрохимическому анализу почв. Издательство Санкт-Петербургского университета, 2005. С. 53–66.
3. Chen Q., Lu X., Guo X., Pan Y., Yu B., Tang Z., Guo Q. Differential responses to Cd stress induced by exogenous application of Cu, Zn or Ca in the medicinal plant *Catharanthus roseus*. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, Vol. 157, 2018, p. 266–275.
4. Gallego S.M., Pena L.B., Barcia R.A., Azpilicueta C.E., Iannone M.F., Rosales E.P., Zawoznik M.S., Groppa M.D., Benavides M.P. Unravelling cadmium toxicity and tolerance in plants: insight into regulatory mechanisms. *Environ. Exp. Bot.* 83, 2012, p. 33–46.
5. Huang Y., Hu Y., Liu Y. Heavy metal accumulation in iron plaque and growth of rice plants upon exposure to single and combined contamination by copper, cadmium and lead. *Acta Ecol. Sin.* 29 (6), 2009, p. 320–326.
6. Hu L., Wan J., Zeng G., Chen A., Chen G., Huang Z., He K. Comprehensive evaluation of the cytotoxicity of CdSe/ZnS quantum dots in *Phanerochaete chrysosporium* by cellular uptake and oxidative stress. *Environ. Sci.* Vol. 4, 2017, p. 10.
7. Hu L., Zhang C., Zeng G., Chen G., Wan J., Guo Z., Wu H., Yu Z., Zhou Y. Metal-based quantum dots: synthesis, surface modification, transport and fate in aquatic environments and toxicity to microorganisms. *Rsc Adv.* Vol. 6, 2016, 78595–78610.
8. Jiayi Tang, Jiachao Zhang, Liheng Ren, Yaoyu Zhou, Jun Gao, Lin Luo, Yuan Yang, Qinghui Peng, Hongli Huang, Anwei Chen. Diagnosis of soil contamination using microbiological indices: A review on heavy metal pollution, *Journal of Environmental Management*, No 242, 2019, p. 121–130.
9. Liu L., Deng G., Shi X. Adsorption characteristics and mechanism of p-nitrophenol by pine sawdust biochar samples produced at different pyrolysis temperatures, *Scientific Reports*, No 10(1), 2020, doi:10.1038/s41598-020-62059-y.
10. Mwamba T.M., Ali S., Ali B., Lwalaba J.L., Liu H., Farooq M.A., Shou J., Zhou W. Interactive effects of cadmium and copper on metal accumulation, oxidative stress, and mineral composition in *Brassica napus*. *Int. J. Environ. Sci. Technol.* Vol. 13, 2016, p. 2163–2174.
11. Poucke R. Van, Meers E., Tack Filip M. G. Leaching behavior of Cd, Zn and nutrients (K, P, S) from a contaminated soil as affected by amendment with biochar, *Chemosphere*, 2019, 125561.
12. Rubina Khanam, Anjani Kumar, Nayak A.K., Md. Shahid, Rahul Tripathi, Vijayakumar S., Debarati Bhaduri, Upendra Kumar, Sangita Mohanty, Panneerselvam P., Dibyendu Chatterjee, Satapathy B.S., Pathak H. Metal(loid)s (As, Hg, Se, Pb and Cd) in paddy soil: Bioavailability and potential risk to human health, *Science of the Total Environment*, Vol. 699, 2020, p. 11.

13. Wu H., Qin X., Wu H., Li F., Wu J., Zheng L., Wang J., Chen J., Zhao Y., Lin S., Lin W. Biochar mediates microbial communities and their metabolic characteristics under continuous monoculture, *Chemosphere*, No 246, 2020, e 125835. doi:10.1016/j.chemosphere.2020.125835.
14. Yu H., Xiang Y., Zou D. The effect of *Eulaliopsis binata* on the physi-chemical properties, microbial biomass, and enzymatic activities in Cd-Pb polluted soil, *Environ. Sci. Pollut. Res.*, No. 23, 2016, p. 19212–19218.

Работа рекомендована к.б.н., старшим преподавателем Т.А. Банкиной.

## THE EFFECT OF BIOCHAR AND PLANT RESIDUES ON THE ASSIMILATION OF CADMIUM AND NITROGEN BY BARLEY PLANTS

Y.R. Iskandirova

St. Petersburg State University

The objectives of the model laboratory experiment was to study the effect of biochar and plant residues on the on the assimilation of cadmium and nitrogen by barley plants at agrosoddy-podzolic medium loamy soil.

The lowest resistance to cadmium was founding in soil without the addition of biological products. It had established that the combined application of biochar and plant residues increases the plant resistance to cadmium to 100 percent.

Plant residues increased the nitrogen supply to plants to the level of the control variant without Cd.

Biochar reduced the concentration and removal of cadmium by barley plants, plant residues did not change the concentration of cadmium, but sharply increased the removal of cadmium because of an increase plant's biomass.

*Keywords:* biomass of barley, plant resistance, nitrogen nutrition.

УДК 631

## ОСОБЕННОСТИ СТРОЕНИЯ И ФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КОНСТРУКТОЗЕМОВ И ИХ КОМПОНЕНТОВ, ПРЕДНАЗНАЧЕННЫХ ДЛЯ ОБУСТРОЙСТВА ЗЕЛеной КРОВЛИ

М.А. Корытина

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова

Технология озеленения кровли предполагает использование субстратов, с одной стороны, легких оказывающих минимальную нагрузку на здание, с другой, обладающих оптимальными условиями для произрастания растений. В работе подробно рассмотрены агрофизические свойства двух субстратов, различающихся содержанием составляющих компонентов.

*Ключевые слова:* озеленение крыш, основная гидрофизическая характеристика, математическое моделирование.

### ВВЕДЕНИЕ

В последнее время существенно возрос интерес к озеленению крыш, поскольку «зеленые крыши» оказывают благотворное влияние на экологическую обстановку в месте их расположения (особенно в больших городах). «Зеленые крыши» уменьшают теплопотери зданий, удерживают осадки, снимая нагрузку с водостоков, продлевают срок службы крыш, спасая их от суровых воздействий температуры и климата [1]. Кроме того, «зеленые крыши» служат украшением больших городов, новыми рекреационными зонами для их жителей. Они выгодны не только с экологической, но и с экономической точки зрения [2].

Технология озеленения крыш предполагает использование почвенных субстратов с одной стороны легких, оказывающих минимальную нагрузку на крыши и опоры здания, с другой стороны с оптимальными условиями для произрастания растений. В связи с этим возникает необходимость в комплексном исследовании физических свойств субстратов, используемых в озеленении крыш для выявления наиболее оптимальных почвенных конструкций с учетом потребностей растений и климатических особенностей данного региона.

## ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

В работе исследованы различные агрофизические свойства почвенных субстратов и их компонентов такие как рН, плотность, порозность, функция влагопроводности, основная гидрофизическая характеристика (ОГХ), функция температуропроводности и другие физические свойства. Определение наименьшей влагоемкости и коэффициента фильтрации проводилось колоночным экспериментом, ОГХ – методом капилляриметров и методом десорбции паров воды над насыщенными растворами солей (аппроксимация проводилась в программе RETC), температуропроводность субстратов методом Кондратьева.

На основе экспериментально полученных физических свойств была сделана попытка рассчитать процессы движения влаги в почвенной толще с помощью программы Hydrus 1D.

В качестве объектов исследования были выбраны 2 почвенных субстрата, состоящие из следующих компонентов: песок, верховой торф, кокосовое волокно и агроперлит. Смеси (почвенные субстраты) различались пропорциями слагающих их компонентов (% по объему), субстрат 1: 30 % – речной песок, 30 % – верховой торф, 30 % – кокосовое волокно (койр), 10 % – агроперлит; субстрат 2: 25 % – речной песок, 15 % – верховой торф, 10 % – кокосовое волокно, 50 % – агроперлит. Данные субстраты были помещены в Модули GreenSkinbox, используемые для кровельного озеленения. Модуль имеет размеры 40×40×7 см. Толщина почвенного субстрата – 5 см. Сверху были высажены семена очитка едкого *Sedum acre* L. Модули были установлены на крыше оранжерейного комплекса МГУ.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЯ

В целом субстраты характеризуются как невысокой плотностью почвы, так и невысокой плотностью твердой фазы, однако для первого субстрата эти значения выше, чем для второго (табл. 1).

Таблица 1. Физические и химические свойства субстратов.

Объект	$\rho_n$ , г/см <sup>3</sup>	$\rho_{тф}$ , г/см <sup>3</sup>	ГВ, %	НВ, %	КФ, м/сут.	Сорг, мг	рНв
Субстрат 1	1.11	2.30	1.14	84.7	487.9	6.92	7.55
Субстрат 2	0.87	2.48	0.88	88.5	1143.3	5.32	7.69

Примечания:  $\rho_n$  – плотность почвы;  $\rho_{тф}$  – плотность твердой фазы; ГВ – гигроскопическая влажность; НВ – наименьшая влагоемкость; КФ – коэффициент фильтрации.

Коэффициент фильтрации для обоих субстратов исключительно высокий, (по Ф.Р. Зайдельману, 1985), но для второго субстрата он в два раза выше, чем для первого. Второй субстрат также имеет большее значение ненасыщенной гидравлической проводимости, особенно в области низких значений давления влаги, что, по-видимому, связано с высоким содержанием агроперлита.  $rF$  выше 2.5 – ненасыщенная гидравлическая проводимость для субстратов практически одинакова в исследуемом диапазоне давления до  $rF = 2.7$  (рис. 1).

Основная гидрофизическая характеристика, полученная для отдельных компонентов и субстратов показывает закономерное увеличение их водоудерживающей способности в ряду песок – агроперлит – субстрат 2 – субстрат 1 – торф – кокосовое волокно.

Температуропроводность первого субстрата (с повышенным содержанием торфа) значительно ниже, чем у второго, так в диапазоне влажности от 60 до 20 % средние значения в первом случае составляют около 6, во втором 8 см<sup>2</sup>/час. Низкая способность первого субстрата проводить температурную волну, препятствует его сильному промерзанию в зимнее время.

Для субстратов была проведена аппроксимация ОГХ уравнением ван Генухтена, параметры которой использовались для моделирования элементов водного режима (табл. 2).



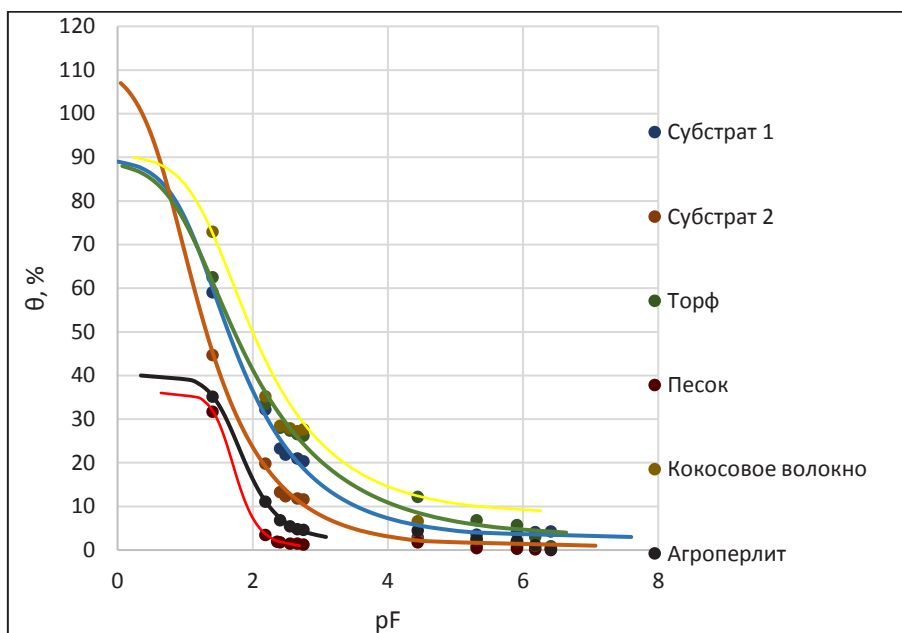


Рисунок 1. Основная гидрофизическая характеристика субстратов и их компонентов.

Таблица 2. Параметры аппроксимации уравнением Ван-Генухтена.

Объект	$Q_r$ ( $\text{см}^3/\text{см}^3$ )	$Q_s$ ( $\text{см}^3/\text{см}^3$ )	$\alpha$ ( $\text{см}^{-1}$ )	$n$ (-)
Субстрат 1	0.029	0.897	0.832	1.44
Субстрат 2	0.009	1.11	2.29	1.51

Одной из главных задач при функционировании субстратов является обеспечение оптимальных водно-воздушных условий для растений. Для этой оценки в программе Hydrus 1D были просчитаны элементы водного режима.

Данная модель строилась на основе ОГХ, полученной методом аппроксимации по ван Генухетну–Муалему в программе RETC. В модель вводились гидрологические параметры: остаточная влага ( $\theta r[\text{см}^3/\text{см}^3]$ ), полная влагоемкость почвы ( $\theta_s[\text{см}^3/\text{см}^3]$ ), обратное давление барботирования ( $\alpha [\text{см}^{-1}]$ ), параметр, описывающий крутизну ОГХ ( $n [-,]$ ), и коэффициент фильтрации ( $K_s[\text{см}/\text{сут}]$ ), а также верхние и нижние граничные условия (на верхней границе задавалось наличие испарение при отсутствии осадков, начальная влажность субстратов при давлении – 10 см в. ст., на нижней границе – свободный сток), период времени и количество слоев почвенной толщи для расчета. В исследовании разобрано три случая функционирования почвенных конструкций: отсутствие испарения с почвенной поверхности в течение 10 дней, наличие испарения, величиной в 0.2 см/сут в течение 10 дней и наличие испарения с почвенной поверхности в течение 10 дней, величина которого менялась экспоненциально от 0.3 см/сут до 0.01 см/сут.

В первом варианте с нулевым испарением перераспределение влаги по профилю соответствует условиям полевого определения влажности НВ, условия расчета показывают, как будет происходить перераспределение влаги в профиле почвы без внешнего воздействия, насколько хорошо данная конструкция отводит влагу. Вторым вариантом испарения 2 мм/сут приводил к достижению в нижних горизонтах влажности, соответствующей ВРК. Третий вариант соответствует естественным условиям: в начале после полива или обильного дождя испарение происходит интенсивно, а затем с уменьшением влажности испарение также уменьшается.

Результаты моделирования показали, что наименьшей влагоемкости субстраты достигали примерно на 3–4 сутки, что подтверждалось эпюрами влажности (1а, 1б) и составляли 38 %, что соответствует давлению влаги –90 см в. ст. и 36 % (–41 см в. ст.) соответственно. При постоянном уровне испарения влажность верхнего слоя второго субстрата на пятый день резко снизилась до 5 % из-за прекращения подтока влаги из нижнего горизонта.

В первом субстрате снижение влажности верхнего слоя происходило медленнее, так на 5 день расчетов содержание влаги составляло около 17 %.

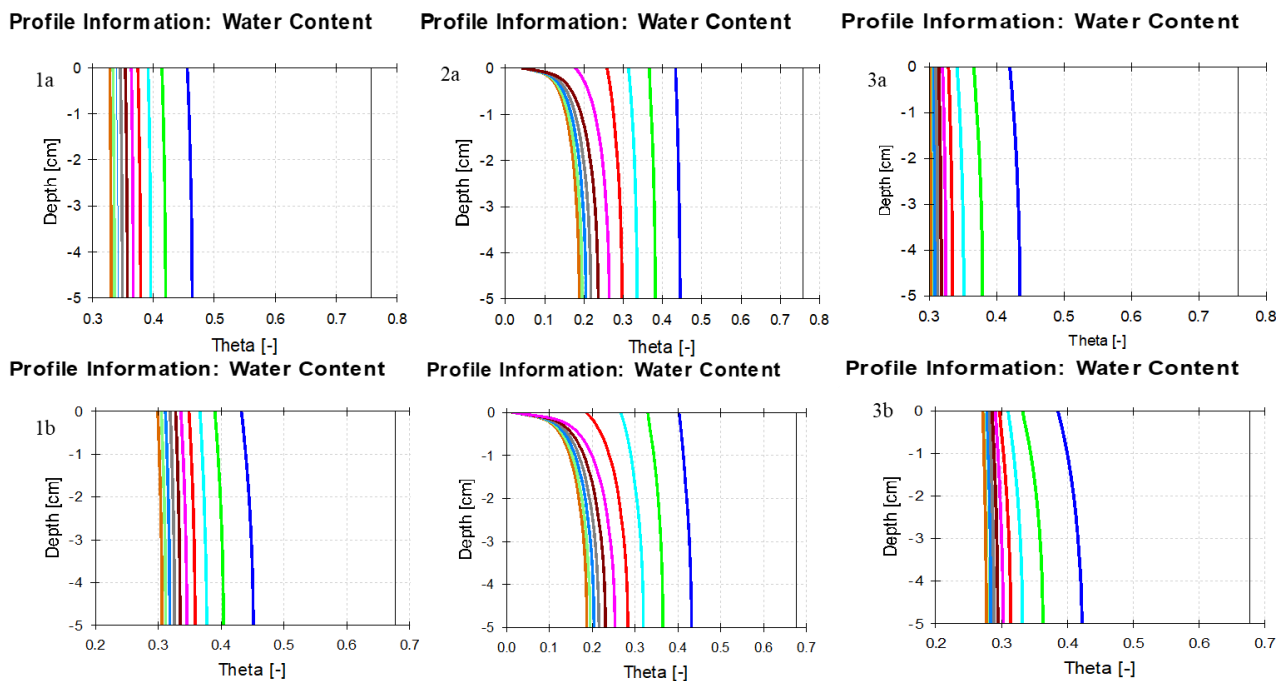


Рисунок 2. Эпюры распределения влажности, а – субстрат 1, б – субстрат 2 (1 – отсутствие испарения, 2 – испарение 0.2 см/сут, 3 – экспоненциальное испарение).

При экспоненциальном уменьшении испарения оба субстрата пересыхали значительно медленнее, чем при постоянном испарении в 0.2 см/сут: ни один из исследуемых субстратов за десятидневный период не достигал влажности разрыва капилляров. Наиболее интенсивная потеря влаги происходила в первые 3–4 дня в обоих субстратах, затем влажность практически не менялась, возможно, это связано с тем, что испарение на 4 сутки составляло всего 0.045 см/сут. Стоит также отметить, что в первом субстрате не происходило изменения значений влажности с глубиной, в отличие от второго субстрата, у которого уже на второй день влажность на поверхности была меньше, чем на глубине (различие составляло 4 % влажности).

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные исследования показали, что почвенные субстраты содержали компоненты, обеспечивающие хорошую водопроницаемость (песок), аэрируемость (агроперлит), водоудерживающие свойства (кокосовое волокно и верховой торф). Они обладали довольно высоким содержанием гумуса, имели нейтральную реакцию среды. Однако, первый субстрат отличался лучшими агрофизическими свойствами из-за высокой водоудерживающей способности, меньшей температуро- и влагопроводности. В связи с этим именно такой состав субстрата можно рекомендовать для озеленения крыш в условиях умеренного климата.

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Qianqian Zhanga, Liping Miao*. The capacity of greening roof to reduce stormwater runoff and pollution. 2015 г., Landscape and Urban Planning, с. 142–150.
2. *Зелёные крыши Гамбурга*. Экономическое обоснование [Журнал] // «Зеленая стрела». URL: <https://zstrela.ru/projects/magazine/sections/dizayn-sada/zelyonye-kryshi-gamburga-ekonomicheskoe-obosnovanie> (дата обращения: 07.11.2021)

Работа рекомендована к.б.н. Е.В. Фаустовой.

# PARTICULAR QUALITIES OF THE STRUCTURE AND PHYSICAL PROPERTIES OF CONSTRUCTOZEMS AND THEIR COMPONENTS INTENDED FOR ARRANGING A GREEN ROOF

M.A. Korytina

Lomonosov Moscow State University

Over the last few years, interest in greening the buildings, including roofs, has grown substantially, because «green roofs» are aesthetic and benefit the environment. The roof greening technology involves the use of substrates that, on the one hand, cause minimal impact on building, and, on the other, have optimal characteristics for plant growth. In this research agrophysical properties of two substrates with different content of components were reviewed in detail.

*Keywords:* green roof, water retention curve

УДК 631.423.4

## ЗАКОНОМЕРНОСТИ ИЗМЕНЕНИЯ ГУМУСНОГО СОСТОЯНИЯ ЗАЛЕЖНЫХ СВЕТЛО-СЕРЫХ ЛЕСНЫХ ПОЧВ

Л.И. Латыпова, А.В. Королева

Казанский (Приволжский) федеральный университет

Было изучено содержание органического вещества (ОВ) и его отдельных фракций, в светло-серых лесных почвах, находящихся под залежью. Исследованы спектры водорастворимых и щелочнорастворимых органических веществ залежей 7 и 80 лет. Качественный состав подвижных фракций ОВ оценивали по критерию SUVA254. Было показано, что с возрастом залежей происходит существенное увеличение содержания в почвах общего органического углерода и изменение качественного состава его подвижных фракций.

*Ключевые слова:* постагrogenные почвы, SUVA254, подвижное органическое вещество, удельное поглощение ультрафиолета.

### ВВЕДЕНИЕ

Содержание и качество органического вещества (ОВ) – один из главных показателей плодородия почвы. Почвенное органическое вещество (ПОВ) – важный компонент биосферы, является долговременным резервуаром углерода [8, 13, 4], влияет на устойчивость почв к негативным воздействиям и принимает непосредственное участие в формировании плодородия почвы [1].

При зарастании заброшенных сельскохозяйственных угодий постагrogenные изменения охватывают верхнюю (старопахотную) толщу почвы, изменяются основные физические, химические и биологические свойства почв. Смена растительного покрова неизбежно влечет за собой изменения и в содержании органического вещества, и качественное изменение его подвижных фракций.

Особенно большой интерес вызывает изучение лабильной части ОВ, так как оно является основным источником для минерализации и пополнения запасов элементов питания, и, как следствие, основным источником элементов питания, а часть этих компонентов может участвовать в образовании гумусовых веществ [9, 1, 2]. Органическое вещество почвы традиционно делится на три основные составляющие: лабильную, стабильную и инертную, для идентификации которых используется широкий спектр аналитических методов, основанных на физических, химических и биохимических принципах [11, 12]. Но, несмотря на их разнообразие, до настоящего времени нет методик, которые позволяют получить однозначные данные по разделению ПОВ на группы, что связано, прежде всего, с тем, что соединения углерода в почве образуют сложную совокупность по генезису, составу и свойствам [10]. В связи с этим изучение качественного состава подвижных фракций ОВ, извлекаемых растворами с различной экстрагирующей способностью, является актуальной задачей.

---

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, проект № 17-04-00846.

© Л.И. Латыпова, А.В. Королева, 2021

Цель исследования – оценка содержания и направленности качественного изменения состава лабильных фракций ОВ в разновозрастных залежных светло-серых лесных почвах.

## ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Исследование проводилось в Предволжье Республики Татарстан (Россия). В качестве объектов исследования были выбраны сопряженные участки разновозрастных залежей 7 и 80 лет. Почвы – светло-серые лесные, залежная растительность представлена стабильными разнотравно-злаковыми луговыми ценозами разных стадий сукцессий. Образцы из старопашотного горизонта отбирались послойно (через 5 см) на глубину до 20 см специальным буром из 7 точек отбора, приуроченных к 7 узлам гексагональных систематических решеток, заложенных отдельно на каждом участке. Образцы для характеристики вертикальной неоднородности старопашотного горизонта получали смешиванием отдельно по слоям 0–5, 5–10, 10–15 и 15–20 см индивидуальных образцов, отобранных из 7 точек пробоотбора. После тщательного отбора корней почву растирали и пропускали через сито 0.1 мм. В смешанных образцах определяли общее содержание органического вещества по методу Тюрина. Подвижные фракции ПОВ выделялись горячей водой по методике Шульца [5] и смесью  $\text{Na}_4\text{P}_2\text{O}_7\text{-NaOH}$  по методике Кононовой-Бельчиковой [3]. Все анализы проводились в 3-кратной повторности. Измерение спектров поглощения водо- и щелочнорастворимых фракций проводили на двухлучевом спектрофотометре Lambda 35 (PerkinElmer, США) в диапазоне длин волн 450–250 нм и длине кюветы 0.01 м.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЯ

Результаты определения содержания общего органического углерода (Общее  $C_{\text{орг}}$ ) в послойных почвенных образцах из старопашотного горизонта разновозрастных залежных почв, а также содержание органического углерода водорастворимой ( $C_{\text{H}_2\text{O}}$ ) и щелочнорастворимой ( $C_{\text{Na}_4\text{P}_2\text{O}_7\text{-NaOH}}$ ) фракции представлены в табл. 1.

Таблица 1. Содержание общего органического углерода, водо- и щелочнорастворимых фракций ОВ ( $M \pm m$ ), залежи 7 и 80 лет.

Глубина отбора образцов, см	Залежи 7 лет			Залежи 80 лет		
	Общее $C_{\text{орг}}$	$C_{\text{H}_2\text{O}}$	$C_{\text{Na}_4\text{P}_2\text{O}_7\text{-NaOH}}$	Общее $C_{\text{орг}}$	$C_{\text{H}_2\text{O}}$	$C_{\text{Na}_4\text{P}_2\text{O}_7\text{-NaOH}}$
	мг/г	мг/г	мг/г	мг/г	мг/г	мг/г
0–5	10.3±0.3	0.51±0.01	4.7±0.1	28.0±1.4	1.55±0.14	11.7±0.2
5–10	8.4±0.2	0.35±0.01	4.0±0.3	11.1±0.4	0.59±0.06	5.2±0.4
10–15	7.1±0.3	0.30±0.02	3.3±0.2	8.2±0.6	0.33±0.03	4.2±0.1
15–20	6.6±0.1	0.25±0.02	3.1±0.2	6.7±0.3	0.24±0.02	3.7±0.2

Анализ данных показал, что существенное накопление ОВ идет в основном в верхней части старопашотного горизонта в слое 0–5 см и в меньшей степени в слое 5–10 см. Наблюдается четкая дифференциация содержания как общего  $C_{\text{орг}}$ , так и водорастворимой и щелочнорастворимой фракций по глубине. Такой характер вертикальной неоднородности накопления ОВ наблюдается в залежах как 7 лет, так и 80 лет.

Процесс накопления органического углерода закономерно зависит от возраста залежи. Под залежной растительностью 80-летнего возраста уровень накопления всех форм углерода в верхних слоях существенно выше, чем под 7-летними залежами.

Доля водорастворимого ОВ в верхних слоях старопашотного горизонта в общем пуле ОВ выше, чем в его нижней части. Видимо, накопление водорастворимой фракции идет, прежде всего, в верхних слоях. В составе подвижного ОВ почвы доминируют щелочнорастворимые фракции, наиболее высокая доля содержания отмечается в нижних слоях старопашотного горизонта. Это может происходить за счет значительного накопления в верхней части старопашотных горизонтов залежных почв детритного гумуса с низкой долей щелочнорастворимого ОВ.

На сегодняшний день, наиболее быстрым и эффективным методом, позволяющим оценить изменчивость растворенного органического вещества, является использование оптических свойств ПОВ, используя ультрафиолетовое поглощение при длине волны 254 нм (SUVA<sub>254</sub>) [6, 7].

Для качественной характеристики выделенных фракций ОВ были получены спектры поглощения в диапазоне длин волн 250–450 нм (рис. 1).

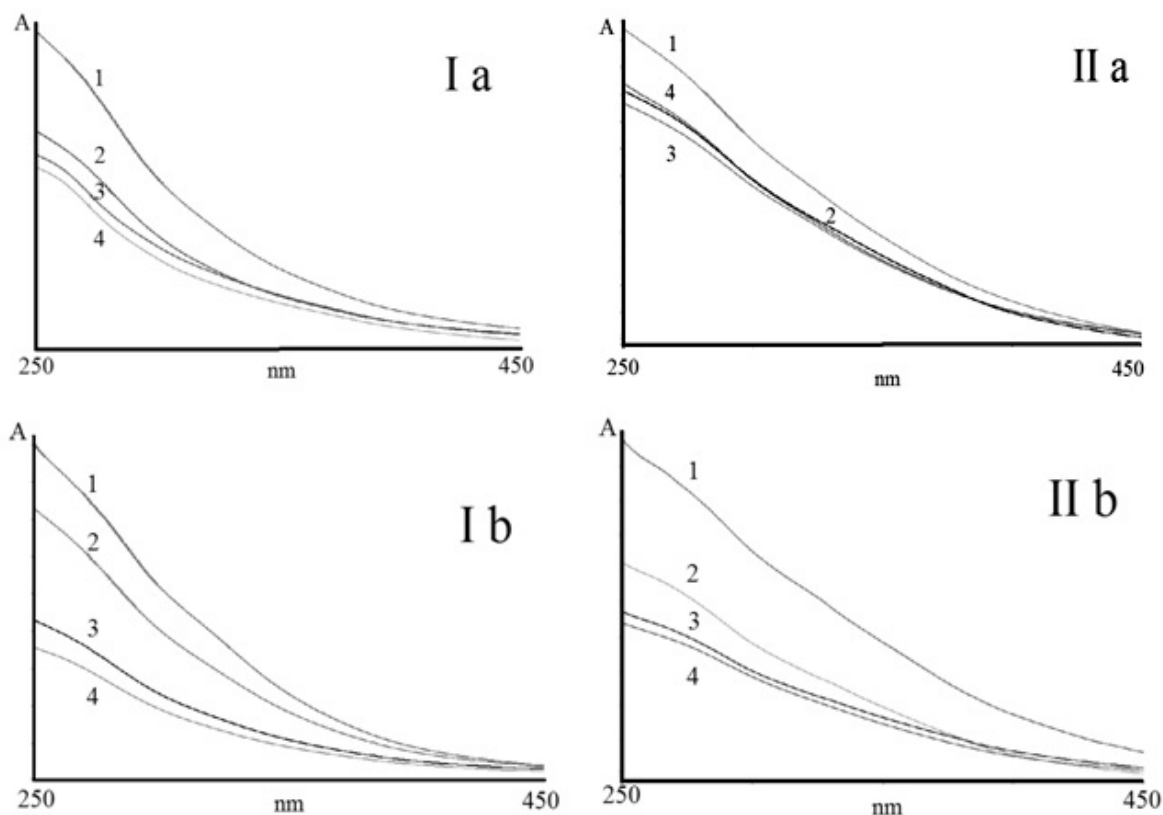


Рисунок 1. Спектры поглощения водорастворимых (I) и щелочнорастворимых (II) фракций ОВ залежей 7 лет (I а и II а) и 75–80 лет (I б и II б), 1 – слой 0–5 см, 2 – слой 5–10 см, 3 – слой 10–15 см, 4 – слой 15–20 см.

На основании полученных спектров поглощения был рассчитан критерий SUVA<sub>254</sub> (табл. 2). Критерий SUVA<sub>254</sub> представляет собой отношение коэффициента поглощения ( $a_{CDOM}(\lambda) (m^{-1})$ ) окрашенного раствора ОВ при  $\lambda=254$  нм, к содержанию в нем органического углерода, выраженному в мг/л. Критерий SUVA<sub>254</sub> считается надежным показателем, имеющим тесную прямую корреляцию со степенью ароматичности природных окрашенных органических соединений [14].

Анализ данных показывает, что лабильные фракции, выделяемые из различных слоев старопахотного горизонта, различаются по своим качественным показателям.

Рассчитанные данные показали, что в верхней части старопахотного горизонта идет накопление ОВ с более низкой степенью ароматичности, как водорастворимых, так и щелочнорастворимых фракций, по сравнению с более нижними слоями, где степень ароматичности несколько выше. Скорее всего, это происходит за счет преимущественного накопления в верхних слоях старопахотного горизонта более молодых алифатических гумусовых веществ.

С возрастом залежи ароматичность водорастворимого ОВ увеличивается, что может свидетельствовать о преимущественном отборе более устойчивых к разложению водорастворимых молекул.

В случае щелочнорастворимого ОВ увеличение ароматичности с возрастом залежи проявляется слабо, скорее всего из-за того, что фактор выборочного сохранения устойчивых соединений для данной фракции не столь актуален.

Таблица 2. Значения критериев SUVA<sub>254</sub>, спектров поглощения подвижных фракций ОВ почвы.

Глубина отбора образцов, см	Залежи 7 лет	Залежи 80 лет
	SUVA <sub>254</sub>	SUVA <sub>254</sub>
Водорастворимая фракция ОВ		
0–5	5.8	6.5
5–10	5.8	6.8
10–15	6.0	7.3
15–20	6.7	8.4
Щелочнорастворимая фракция ОВ		
0–5	30.7	29.8
5–10	34.8	36.9
10–15	40.1	37.9
15–20	41.7	40.6

Стабильность щелочнорастворимого ОВ в почве, вероятнее всего, связана с пространственной недоступностью для гетеротрофных микроорганизмов за счет образования супрамолекулярных агрегатов и взаимодействия с минералами и ионами металлов. Эти факторы считаются наиболее важными механизмами для создания устойчивого пула ОВ в целинных почвах.

## ВЫВОДЫ

1. Накопление органического углерода в залежных почвах идет в основном в верхних слоях старопашотного горизонта. Наблюдается снижение содержания показателя вниз по глубине старопашотного горизонта, как для залежей 7-летнего возраста, так и для залежей 80-летнего возраста;

2. Наблюдается четкая дифференциация накопления подвижных фракций в старопашотном горизонте по слоям. В поверхностном слое профиля идет накопление водо- и щелочнорастворимых фракций ОВ. В залежах 80 летнего возраста содержание лабильных форм выше, чем для залежей 7 летнего возраста;

3. По данным УФ спектрометрии в верхней части старопашотного горизонта идет накопление ОВ с более низкой степенью ароматичности, как водорастворимых, так и щелочнорастворимых фракций, по сравнению с более нижележащими слоями, где степень ароматичности несколько выше. С возрастом залежи ароматичность водорастворимого ОВ увеличивается.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Власенко О.А. Запасы легкоминерализуемого органического вещества при возделывании пропашных кормовых культур в красноярской лесостепи // Вестник Крас-ГАУ, № 9. 2017. С. 157–165.
2. Дедов А.В., Несмеянова М.А. Лабильное органическое вещество почв и приёмы его регулирования // Известия Оренбургского государственного аграрного университета, № 5 (67). 2017. С. 8–10.
3. Кононова М.М., Бельчикова Н.П. Ускоренные методы определения состава гумуса минеральных почв // Почвоведение. № 10. 1961. С. 75–87.
4. Федоров Б.Г. Российский углеродный баланс: монография. М.: Научный консультант, 2017. С. 82.
5. Шульц Е., Деллер Б., Хофман Г. Метод определения углерода и азота, экстрагируемых горячей водой. Методы исследований органического вещества почв. Владимир, 2005. С. 230–240.
6. Alex T. Chow, Randy A. Dahlgren, Qian Zhang, P.K. Wong. Relationships between specific ultraviolet absorbance and trihalomethane precursors of different carbon sources // Journal of Water Supply: Research and Technology-Aqua. № 57 (7). 2008. Pp. 471–480.

7. *Angela M. Hansen, Tamara E. C. Kraus, Brian A. Pellerin, Jacob A. Fleck, Bryan D. Downing, Brian A. Bergamaschi.* Optical properties of dissolved organic matter (DOM): Effects of biological and photolytic degradation // *Limnology and Oceanography*. № 3. 2016. Pp. 1015–1032.
8. *Franzluebbers A.J., Doraiswamy P.C.* Carbon sequestration, and land degradation // *Climate and land degradation*. № 18. 2007. Pp. 343–358
9. *Kolář L., Kužel S., Horáček J., Čechová V., Borová-Batt J., Peterka J.* Labile fractions of soil organic matter, their quantity and quality // *Plant, Soil and Environment*. 55. 2009. Pp. 245–251.
10. *Krasilnikov P.V.* Stable carbon compounds in soils: their origin and functions // *Eurasian Soil Science*. № 9 (48). 2015. Pp. 997–1008.
11. *Rovira P., Vallejo V.R.* Labile, recalcitrant and inert organic matter in Mediterranean forest soils // *Soil Biology and Biochemistry*. № 39. 2007. Pp. 202–215.
12. *Strosser E.* Methods for determination of labile soil organic matter: An overview // *Journal of Agrobiological Science*. № 27. 2010. Pp. 49–60.
13. *Thomas Knoke, Baltazar Calvas, Santiago Ochoa Moreno, Jonathan C. Onyekwelu, Verena C. Griess.* Food production and climate protection – What abandoned lands can do to preserve natural forests // *Global Environmental Change*. 5(23). 2013. Pp. 1064–1072
14. *Weishaar, J.L., G.R. Aiken, B.A. Bergamaschi, M.S. Fram, R. Fugii, K. Mopper.* Evaluation of specific ultraviolet absorbance as an indicator of the chemical composition and reactivity of dissolved organic carbon // *Environ. Sci. Technol.* № 37. 2003 Pp. 4702–4708.

Работа рекомендована к.б.н. зав. кафедрой почвоведения КФУ Е.В. Смирновой.

## CHARACTERISTIC OF CHANGE IN THE HUMUS STATE OF FALLOW LUVISOLS

L.I. Latypova, A.V. Koroleva

Kazan (Volga region) federal university

The content of organic substances (OM) and its individual fractions was studied. The studied spectra of water-soluble and alkali-soluble organic substances fallow land for 7 and 80 years. The qualitative composition of the mobile OM fractions was evaluated by the SUVA<sub>254</sub> criterion. It was shown that a significant increase in the content of total organic carbon in the soil and a change in the qualitative composition of its mobile fractions.

*Keywords:* post-agrogenic soil, SUVA<sub>254</sub>, mobile organic matter, specific ultraviolet absorption.

УДК 582.28; 595.796

### ДРОЖЖЕВЫЕ АССОЦИАЦИИ С МУРАВЬЯМИ ВИДА *LASIUS FLAVUS*

К.П. Меркель

Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова,  
факультет почвоведения

В статье рассматриваются ассоциации между муравьями вида *Lasius flavus* и дрожжами в естественной среде.

*Ключевые слова:* мирмекология; дрожжи; экология; биология почв.

### ВВЕДЕНИЕ

Из литературных источников известно, что дрожжи часто тесно ассоциированы с различными беспозвоночными животными. Исследования дрожжевых ассоциаций с муравьями были начаты в нашей лаборатории еще во второй половине прошлого века и показали, что дрожжи постоянно присутствуют как в муравейниках *Formica rufa* и близких к нему видов, так и на поверхности были представлены видами одного рода – *Debaryomyces* [1]. Несколько

лет назад в лаборатории была предпринята еще одна попытка изучить дрожжевое население гнезд муравьев *Formica aquilonia*, экологически близких *Formica rufa*, и, как и в гнездах муравьев *Formica aquilonia* были обнаружены дрожжи семейства *Debaryomycetaceae*, в частности, было выяснено, что и в почве, и в подстилке, окружающей муравейники, среди дрожжей доминируют типичные подстилочные виды *Trichosporon moniliiforme* (*Cutaneotrichosporon moniliiforme*) и *Cystofilobasidium capitatum*, а непосредственно в материале муравейника и непосредственно в самих муравьях вместе с этими же видами доминируют аскомицетовые виды *Debaryomyces hansenii* и *Schwanniomyces vanrijiae*, как раз из упомянутого выше семейства *Debaryomycetaceae* [3].

Также известно, что многие виды муравьи разводят мицелиальные грибы. Основными объектами их культивирования являются представители отдела *Basidiomycetes*, такие как *Attamyces bromatificus*, которые дрожжами не считаются [8]. Тем не менее, важность дрожжей для муравьев долгое время была предметом споров, и некоторые исследования продемонстрировали примеры взаимного влияния. В частности, было зафиксировано, что дрожжи, произрастающие в грибных садах, наряду с культивируемыми грибами, производят ряд внеклеточных ферментов, например, целлюлозо- и пектинолитические, а также протеазы и амилазы, которые потенциально детоксифицируют эти сады и помогают усвоению питательных веществ [7]. В случае с мирмекофильными растениями роль дрожжей имеет черты сходные с теми, которые были описаны выше, и связаны с пчелами и шмелями. Данные свидетельствуют о том, что дрожжи, переносимые муравьями, способны изменять содержание сахара в нектаре, в частности, уменьшая содержание сахарозы и увеличивая содержание глюкозы и фруктозы, что изменяет динамику опыления муравьями и прочими опылителями [5].

Тем не менее, видовой состав дрожжей в гнездах муравьев других родов изучен явно недостаточно, а экологические функции не известны вовсе. А между тем, например, муравьи рода *Lasius* играют не меньшую, чем род *Formica*, роль в формировании структуры мирмекоценозов средней полосы России, однако, значительно хуже изучены. В настоящий момент неизвестно, используют ли муравьи рода *Lasius* дрожжи в кормовых и иных целях, и существуют ли дрожжи автохтонные или тесно ассоциированные с муравьями иных родов, кроме рода *Formica*?

Таким образом, целью работы является исследование видового состава дрожжей, ассоциированных с видом *Lasius flavus*.

В соответствии с данной целью нами были сформулированы следующие задачи:

1. оценить таксономическое разнообразие дрожжей, ассоциированных с муравьями и их гнездами;
2. проверить степень приуроченности разных видов дрожжей к определённым структурным элементам муравейника.

## ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

*Lasius flavus* (Fabricius, 1781), желтые садовые муравьи, представляют собой мелких (длина тела составляет 2–5 мм у рабочих особей и самцов, матки же достигают 7–9 мм) полностью геобионтных (чем и объясняется настолько светлая пигментация особей) представителей подрода *Cautolasius* [9]. Это эвритопный вид, распространенный по всей Голарктике, предпочитает открытые и солнечные участки. Представители данного вида в больших количествах встречаются на лугах и пастбищах, где гнезда с большими насыпями почвы его представителей затрудняют выращивание и скашивание сельскохозяйственных культур. Поверхность этих гнезд часто зарастает мхом, тимьяном и разнотравьем. Гнезда *L. flavus* также могут встречаться и в скалистой местности. Колонии обычно моногинны, т.е. в них находится лишь одна яйцекладущая самка (матка, царица) в семье. Такие колонии независимо основываются молодыми матками после брачного периода, протекающего с июля по август. Однако часто встречается плеометроз – совместное основание новой колонии муравьёв несколькими оплодотворёнными самками. *L. flavus* – полностью подземные муравьи, питающиеся в основном выделениями специально разводимых ими корневых тлей, но также спо-



собны потреблять в пищу и других насекомых, иногда попадающих в муравейник представителей данного вида [4, 6].

Был проведен эксперимент, объектами которого служили 145 рабочих особей муравьев *L. flavus*, образцы внешней стенки купола муравейников, почва из купола муравейников, мелкие корни из муравейников и, в качестве контрольной почвы, образцы органогенного горизоннта.

Образцы муравьев были отобраны в Зеленоградском районе Московской области в окрестностях поселения Крюково (55 особей), в деревне Пустые Меленки Клинского района Московской области (50 особей), а также неподалеку от деревни Верхняя Козлань Касимовского района Рязанской области (40 особей).

В максимально сжатые сроки образцы муравьев были доставлены в лабораторию для дальнейшей работы. Дрожжевое население муравьев было изучено с помощью метода микробиологического посева на плотную питательную среду, так как он является наиболее распространенным способом, позволяющим оценить численность и видовое разнообразие дрожжей в различных типах природных субстратов. Для этого в эппендорфы с 500  $\mu$ л стерильной водопроводной воды было помещено по 2 или 5 муравьев, в зависимости от размера муравьев, далее муравьев растирали стерильным силиконовым пестиком, а затем обрабатывали на вортексе Multi Reax фирмы Heidolph (Германия) в режиме 1700 об./мин в течение 10 мин. Аликвоту полученной суспензии объемом 50 мкл наносили на поверхность плотной питательной среды GPYa (глюкоза – 20 г/л, пептон – 10 г/л, дрожжевой экстракт – 5 г/л, агар – 20 г/л) и равномерно растирали стерильным стеклянным шпателем Дригальского. Для подавления роста бактерий в среду перед разливом добавляли хлорамфеникол (1 г/л).

Посевы инкубировались при температуре 5 градусов Цельсия в течение одной – двух недель, затем все выросшие колонии на основании морфологических признаков были разделены на морфотипы.

Используя вышеперечисленные приемы и методические подходы для каждого образца была определена общая численность дрожжей в образующих колонии единицах (КОЕ) в пересчете на одну особь. Все выросшие колонии были разделены на макроморфологические типы, представители каждого из которых были выделены в чистую культуру в пробирки с закошенной агаризованной средой GPY.

Окончательную идентификацию осуществляли анализом нуклеотидных последовательностей D1/D2 доменов 26S (LSU) или ITS региона рДНК по методике, описанной в работе Глушаковой с соавторами [2]. Амплификацию регионов рДНК проводили с использованием праймеров ITS1f (5'-CTTGGTCAATTTAGAGGAAGTA), NL4 (5'-GGTCCGTGTTTCAAGACGG). Для секвенирования использовали праймер NL4 или ITS1f. Секвенирование амплифицированных регионов проводили на секвенаторе Applied Biosystems 3130xl Genetic Analyzer в компании ЗАО «Евроген» (Москва). Видовую идентификацию дрожжей по полученным сиквенсам осуществляли с помощью данных генбанка NCBI ([www.ncbi.nlm.nih.gov](http://www.ncbi.nlm.nih.gov)) и базы CBS ([www.cbs.knaw.nl](http://www.cbs.knaw.nl)).

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В целом, для многих представителей рода *Lasius* является характерным признаком сравнительно невысокие количественные показатели дрожжевого населения. В случае с муравьями вида *L. flavus*, можно сделать предположение, что конкретные виды дрожжей, с которыми были ассоциированы их представители зависят от видов растительности, чья корневая система может быть связана с гнездами *L. flavus*, что, отчасти, может подтверждаться фактом несоответствия видов дрожжей у данного вида муравьев на всех местах их сбора (табл. 1).

Таблица 1. Относительное обилие видов дрожжей, выделенных из *Lasius flavus*.

Вид дрожжей	Обилие в <i>L. flavus</i> , %
<i>Cryptococcus sp.</i>	30.0
<i>Galactomyces geotrichum</i>	30.0
<i>Schwanniomyces vanrijiae</i>	3.2
<i>Sporobolomyces sp.</i>	6.8
<i>Trichosporon sp.</i>	30.0

Был проанализирован состав дрожжевого населения исследуемого вида и, учитывая немногочисленность обнаруженных дрожжей, предполагается, что большая их часть является случайным компонентом микрофлоры муравьев и привнесена из сопряженных субстратов, таких как листья растений (представители рода *Sporobolomyces* являются типичными эпифитами), опад и подстилка (*Trichosporon* – типичные сапротрофы), а большинство криптококков – встречается на поверхности листьев или в почве, но так как видовую принадлежность этого изолята установить нам не удалось, то определить, откуда мог быть привнесен этот вид дрожжей, мы не можем. Единственным действительно приуроченным к муравьям видом дрожжей является *Schwanniomyces vanrijiae*, встречаемость которого на муравьях и внутри муравейников как правило, значительно выше, чем в других типах местообитаний.

Стоит отметить, что *L. flavus* являются активными культиваторами прикорневых тлей, от которых они эти дрожжи и получают, посредством потребления в пищу их выделений. В пользу этой теории также говорят многочисленные исследования, подтверждающие большое количество дрожжей именно в кишечниках, а также в экскрементах различных таксонов насекомых. Дрожжи были обнаружены в образцах всех отобранных субстратов, включая самих муравьев, за исключением *L. flavus*, отобранных в окрестностях деревни Верхняя Козлань, что, в настоящий момент связывается с возможными агрокультурными мероприятиями со стороны человека в данном населенном пункте.

Количество КОЕ разного вида дрожжей было неоднородным (рис. 1). Муравьи, собранные в Крюково и в Клину, показали схожую, сравнительно невысокую, величину дрожжевых ассоциаций, 4.8 КОЕ/1 особь (рис. 2).

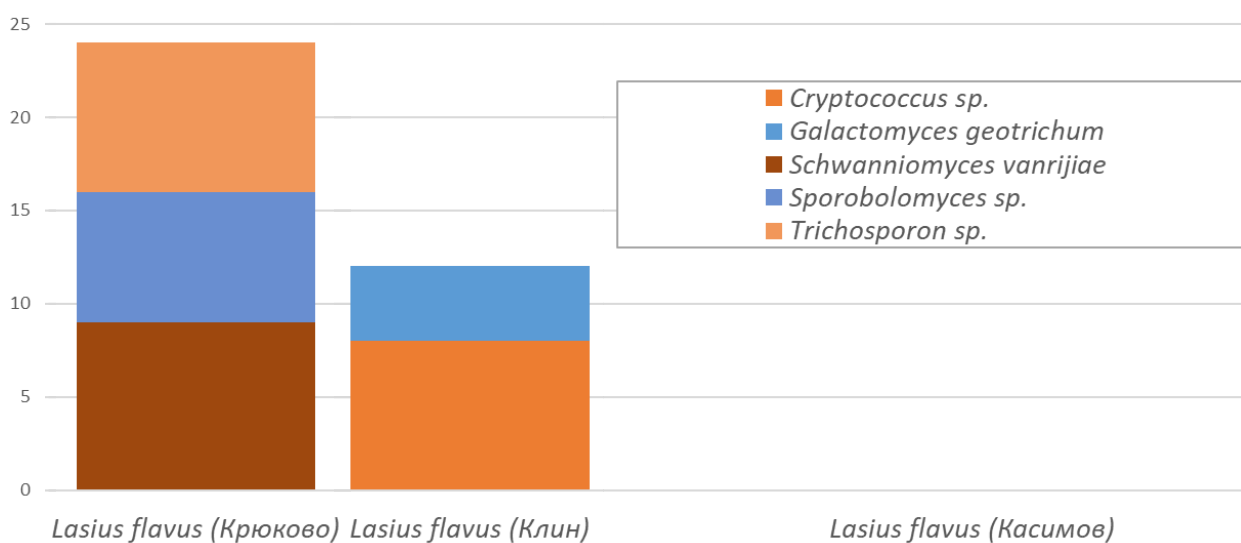


Рисунок 1. Количество дрожжей, обнаруженных в образцах *Lasius flavus* в разных географических пунктах.

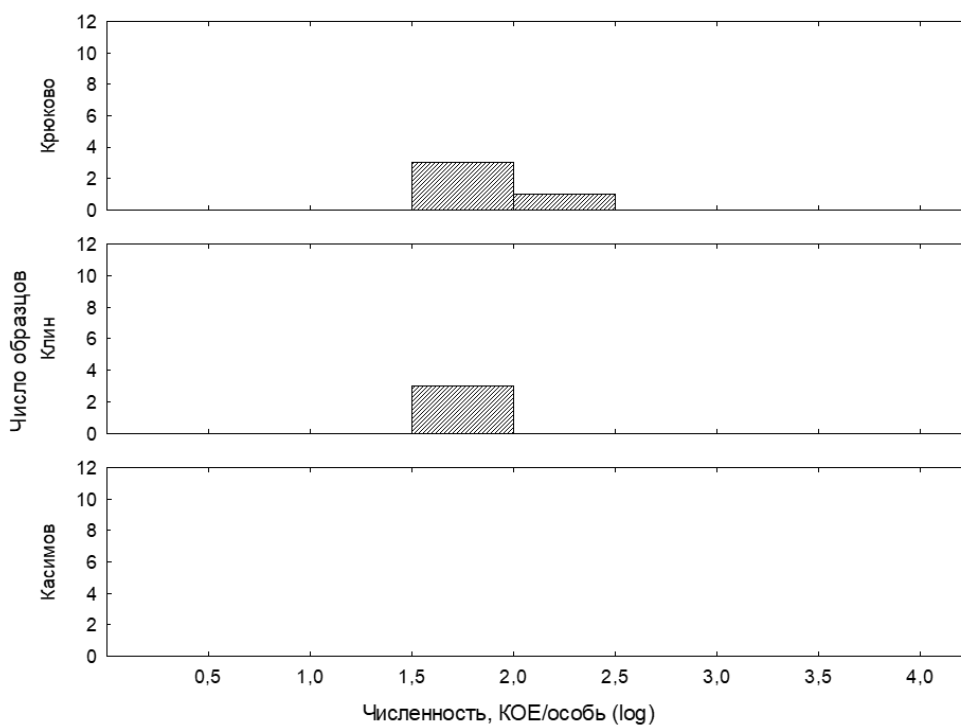


Рисунок 2. Распределение численности дрожжей по отдельным образцам *L. flavus*, отобраным в разных географических пунктах.

Также на муравьях *L. flavus* нами был обнаружен ранее неописанный вид базидиомицетовых дрожжей *Cryptococcus sp.*, о приуроченности которого к определенному типу субстрата судить сложно, так как среди представителей этого рода встречаются как типичные эпифиты, так почвенные виды. Единственным из обнаруженных на *L. flavus* видом дрожжей, который, по всей видимости, действительно связан с муравьями, является *Schwanniomyces vanrijiae*, встречаемость которого в муравейниках заметно выше, чем в сопряженных субстратах [3].

## ВЫВОДЫ

1. На основании морфологических признаков, выделенные культуры были отнесены к пяти родам и видам дрожжей: *Schwanniomyces vanrijiae*, *Cryptococcus sp.*, *Trichosporon sp.*, *Sporobolomyces sp.* и *Galactomyces geotrichum*;

2. Единственным из обнаруженных на *L. flavus* видом дрожжей, который, по всей видимости, действительно связан с муравьями, является *Schwanniomyces vanrijiae*, встречаемость которого в муравейниках заметно выше, чем в сопряженных субстратах.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Бабьева И.П., Гузева И.С., Длусский Г.М., Голубев В.И. Ассоциация дрожжей с муравьями в лесных биогеоценозах // Закономерности развития почвенных микроорганизмов. Л.: Изд-во АН СССР. 1975. С. 16–25.
2. Глушакова А.М., Качалкин А.В., Чернов И.Ю. Особенности динамики эпифитных и почвенных дрожжевых сообществ в зарослях недотроги железистой на перегнойно-глеевой почве // Почвоведение. № 8. 2011. С. 966–972. doi: 10.1134/S1064229311080059.
3. Максимова И.А., Глушакова А.М., Качалкин А.В., Чернов И.Ю., Пантелеева С.Н., Резникова Ж.И. Дрожжевые сообщества муравейников *Formica aquilonia* // Микробиология. Т. 85, № 1. 2016. С. 100–106.
4. Czechowski W., Radchenko A., Czechowska W. The ants (*Hymenoptera, Formicidae*) of Poland. Warszawa: Wiesfawa Czechowska. 2002. 200 p.

5. De Vega C., Guzman B., Lachance M.-A., Steenhuisen S.L., Johnson S.D., Herrera C.M. *Metschnikowia proteae* sp. nov., a nectarivorous insect-associated yeast species from Africa // International journal of systematic and evolutionary microbiology. V. 62. 2012. P. 2538–2545.
6. Hölldobler B., Wilson E.O. The Ants. Berlin: Springer. 1990. p. 522–532. doi.org/10.1046/j.1420-9101.1992.5010169.x
7. Mendes T.D., Rodrigues A., Dayo-Owoyemi I., Marson F.A., Pagnocca F.C. Generation of Nutrients and Detoxification: Possible Roles of Yeasts in Leaf-Cutting Ant Nests // Insects. V. 3(1). 2012. P. 228–245.
8. Seal J.N., Gus J., Mueller U.G. Fungus-gardening ants prefer native fungal species: do ants control their crops? // Behavioral Ecology. V. 23 (6). 2012. P. 1250–1256.
9. Wilson E.O. A monographic revision of the ant genus *Lasius*. Ph.D. dissert., Harvard University. 1955. 105 p.

Работа рекомендована к.б.н., н.с. И.А. Максимовой; к.б.н., н.с. М.В. Голиченковым.

## YEASTS ASSOCIATED WITH LASIUS FLAVUS ANTS

K.P. Merkel

Lomonosov Moscow State University, faculty of Soil science

This article discusses the associations between ants of the species *Lasius flavus* and yeast in the wild nature.

*Keywords:* Myrmecology, yeasts, ecology, soil biology.

Посвящается памяти  
Зинаиды Юльевны Шокальской  
и её предкам

## КЕРН – ШОКАЛЬСКИЕ. ИСТОРИЯ ОДНОЙ СЕМЬИ (1800–1961)

И.С. Михайлов

Почвенный институт им. В.В. Докучаева РАН

Я помню чудное мгновение.  
Передо мной явилась ты,  
Как мимолётное видение,  
Как гений чистой красоты.  
А.С. Пушкин

На заре XIX века 21 февраля 1800 года в доме Орловского губернатора родилась его внучка Анна. Её отцом был помещик Пётр Полторацкий. Он происходил из польских шляхтичей. Когда императрица Екатерина Великая присоединила Польшу к Российской империи, она издала указ, что польские шляхтичи, которые примут православие, получают русское дворянство и поместья. Среди них можно назвать такие фамилии: Глинки, Пржевальские, Шокальские, Держинские, Менжинские, Ливеровские и многие другие.

Полторацкий владел большим имением близ местечка Лубны Полтавской губернии. Туда и уехала семья после рождения Ани. Она росла в тиши украинских садов и получила необходимое для уездных барышень образование: французский язык, танцы, дворянский этикет, умение читать и писать. К шестнадцати годам она превратилась в очень симпатич-

ную девушку. Её отец – очень строгий и деспотичный человек решил, что её пора вывозить в столицы на ярмарку невест.

Вспомните приезд Татьяны Лариной в Москву, описанный А.С. Пушкиным в «Евгении Онегине». Только Аню Полторацкую привезли в Петербург, где её осмотрела многочисленная родня, одобрила и начала подыскивать ей достойного жениха. Её вывозили на балы, где многие восхищались красотой и привлекательностью юной провинциалки.

Так мысль её далече бродит:  
Забыт и свет, и шумный бал,  
А глаз меж тем с неё не сводит  
Какой-то важный генерал.  
Друг другу тётушки мигнули,  
И локтем Таню враз толкнули,  
И каждая шепнула ей:  
«Взгляни налево поскорей».  
– Налево? Где? Что там такое?  
«Ну, чтобы ни было гляди...  
В той кучке, видишь? Впереди,  
Там, где ещё в мундирах двое...  
Вот отошёл, вот боком стал...»  
– Кто? Толстый этот генерал?

А.С. Пушкин «Евгений Онегин»  
Глава VII, Строфа LIV

Для Ани Полторацкой это был генерал Ермолай Керн. Ему тогда было 54 года, он недавно овдовел. Его дед прибыл из-за моря и нанялся служить российским императорам. Сам Ермолай Керн с юности на военной службе. Участвовал в Суворовских походах. Дисциплинированный, организованный он быстро продвинулся по службе. Отечественную войну 1812 года он уже встретил генералом. Участвовал в Бородинском сражении. Был тяжело ранен, но его успели вывезти с поля боя. Он поправился и снова встал в строй. Родня ухватилась за это выгодное предложение. Аня была против, но отец настоял, и она пошла под венец с мужчиной на 40 лет старше себя. В пушкинском романе Татьяна горит Онегину: «Мой муж в сраженьях изувечен, и нас за то ласкает двор». Совершилось венчание. Вспомните картину В. Пукирева «Неравный брак».

Генерал увёз Анну в свой гарнизон. Все офицеры, от прапорщиков до полковников, боготворили её. Она быстро освоилась с ролью матушки-командирши, через год у неё родилась дочь Катя. После рождения дочери генерал отпустил Анну в столицу к тётке Олениной. В этом доме её встретил молодой повеса Александр Пушкин, который только что окончил Царскосельский лицей: «Державин нас заметил, и в гроб сходя, благословил». Поэт не мог не обратить внимания на красивую, элегантную молодую маму. Знакомство продолжалось недолго, Анна уехала к мужу в гарнизон.

Жить Анне с престарелым генералом, который привык командовать и распространял армейскую дисциплину в семье, было трудно. Пушкин писал в одной из эпиграмм: «Он чином от ума избавлен». Анна старалась вырваться к своим многочисленным родственникам. Летом 1825 года Анна приехала к своей кузине Зинаиде Вульф в Псковское имение Тригорское, расположенное рядом с селом Михайловским, куда сослали А.С. Пушкина. Там состоялась их вторая встреча, вдохновившая поэта на создание одного из лучших лирических произведений русской поэзии. Встреча была коротка. Расставаясь, поэт подарил ей черновик стихотворения и третьей главы «Евгения Онегина».

Анна вернулась к мужу. Она родила ещё двух девочек, но они прожили недолго. Катю отдали в Смольный институт благородных девиц. В 1828 году генерала Керна отправили в отставку, и они уехали в одно из его имений.

Родственники генерала, в особенности его дети от первого брака, ненавидели свою молодую мачеху. Отношения в имении накалялись. Генерал понял это и отпустил жену в Петербург к её родственникам. Так Анна Петровна попала в положение «соломенной» вдовы. Красивая, элегантная тридцатилетняя женщина, привыкшая к вниманию мужчин. Пушкин пишет об Анне Петровне:

Душе настало пробуждение:  
И вот опять явилась ты,  
Как мимолётное видение,  
Как гений чистой красоты.

Позже в одном из своих писем называет Анну Керн «нашей вавилонской блудницей», но это гипербола. У неё были романы, но мне кажется, что слухи о таком поведении Анны Керн значительно преувеличены.

Наконец, ей встретился мужчина любимый и любящий. Это был её дальний родственник Александр Марков-Виноградский моложе её на 10 лет. Она стала открыто жить с ним в гражданском браке и даже осмелилась родить ему сына, что осложнила её положение в светском обществе. В 1840 году умирает Генерал Ермолай Керн. При разделе имущества ей достаётся имение Прутня в Тверской губернии. Как вдове генерала Анне полагалась большая пенсия, но при условии, что она не выйдет замуж. Анна отказывается от пенсии и венчается с любимым человеком. У них рождается дочь Анна, и они 37 лет живут уединённо в своём тверском имении. В 1877 году скончался её муж Александр. Сын забрал её в Москву, через год она умерла и была похоронена в Прутне.

Мне удалось побывать в Прутне. В конце 80-х годов прошлого века была создана Комиссия по возвращению Русской православной церкви земель и имущества. Сопредседателем этой комиссии от РПЦ был митрополит Волоколамский Питирим, очень эрудированный человек, хорошо знающий культуру и историю России. Он организовывал поездки членов комиссии на места, и мне довелось участвовать в ряде поездок.

В летний день я пришёл московскую резиденцию митрополита на Денежном переулке, откуда вместе с митрополитом и его келейником мы отбыли на ЗИЛе в Калинин. Меня отвезли в гостиницу. Утром ЗИЛ заехал за мной. Там уже сидели митрополит, архиепископ тверской и келейник митрополита. Машина привезла нас на грунтовый аэродром, где нас ждал вертолёт. Как мы узнали позже, машина была закреплена за Калининским обкомом КПСС. Первым объектом была Старица, где мы в присутствии районного начальства осмотрели бывшие мужской и женский монастыри.

Вторым объектом был Торжок. Мы вылетели. Через некоторое время пилот объявил по громкой связи: «Мы сейчас будем пролетать над усадьбой Анны Керн». Митрополит попросил сделать посадку, что было успешно осуществлено на партере перед барским домом. Рядом с местом посадки стояла стела с портретом Анны Керн и строками пушкинского стихотворения. Перед нами стоял просторный одноэтажный дом с мезонином. На входе была доска «Музей дворянского быта». На шум вертолёта к нам вышла пожилая, очень симпатичная женщина. Пилот, бывавший здесь неоднократно, представил ей именитых гостей. Она провела с нами экскурсию по дому. Анна Орлова-Виноградская, уже не Керн, жила очень скромно. В доме было много книг, особенно прижизненных пушкинских изданий.

Усадьба Прутня расположена в очень живописном месте. Небольшое поселение. Кругом расстилаются поля, разделённые берёзовыми перелесками. За ними поднимаются моренные холмы с тёмно-зелёными ельниками. Глубоко врезанная речка Тьмака громко журчит по валунам и гальке. Немного ниже усадьбы видны остатки плотины. Там раньше был пруд и мельница. Рядом с усадьбой на крутом берегу Тьмаки видна была небольшая церковь с надвратной колоколенкой. Вокруг церкви располагалось старинное кладбище, где была похоронена Анна Петровна. Сейчас на его месте поляна, и только старые березы напоминают о былом. Под какой из этих берёз похоронена Анна Петровна неизвестно. Уже в наши дни был

поставлен небольшой чёрный камень с православным крестом, именем и датами рождения и смерти Анны Петровны.

После осмотра экспозиции музея, мы отправились к этой церкви. Откуда-то появился запыхавшийся настоятель храма. Он начал целовать руки церковных иерархов. Открыл церковные ворота, взбежал на колоколенку, начал звонить в колокол. Церковные иерархи зашли в церковь, чтобы совершить заупокойную литию по Анне Петровне, а я спустился к речке, собрал букет полевых цветов и положил к подножью могильного камня.

Дочь Анны Петровны Екатерина Ермолаевна Керн родилась в 1818 году, в Смоленске. До десяти лет она жила с родителями. В десять лет её отдали в Смольный институт благородных девиц. Катя была очень любознательной и прилежной девушкой. В 18 лет она окончила Смольный институт с отличием и вернулась в отеческий дом. Молодая обаятельная девушка начала выезжать в свет. Её там увидел смоленский помещик и великий русский композитор Михаил Иванович Глинка. Ему в то время было 32 года, и он был давно женат. Его жена – типичная уездная барышня. Она абсолютно не понимала его музыкальных занятий. Они не понимали друг друга и жили порознь. В Екатерине он нашёл умную, образованную, привлекательную девушку и влюбился в неё. Она ответила ему взаимностью. Глинка написал романс на слова Пушкина «Я помню чудное мгновение» и посвятил его Екатерине Керн. Отношения Михаила Ивановича и Кати показаны в фильме «Михаил Глинка», вышедшем в 60-е годы прошлого века.

Их смоленские встречи были недолгими. Екатерину Керн пригласили для работы класной дамой в Смольный институт. Скоро для работы над своей оперой «Иван Сусанин» в Петербург перебрался и Михаил Глинка. Они регулярно встречались, и Кате было посвящено много произведений композитора. Михаил Глинка начал бракоразводный процесс, что в те времена было очень сложно. Актом гражданского состояния в Российской империи был факт церковного венчания. Разводы были в компетенции Священного Синода. Хотя у Михаила Ивановича были неоспоримые доказательства в его пользу, бракоразводный процесс тянулся 7 лет. Тем временем Катерина Ермолаевна забеременела. В те времена рождение внебрачного ребёнка было осуждаемым поступком. Перед женщиной, решившейся на такой шаг, закрывались все двери. Это испытала и Анна Петровна. Михаил Глинка выступил против рождения ребёнка и даже дал деньги на аборт. Анна не согласилась и увезла дочь на Украину в имение «Лубны». Через год они вернулись в Петербург. Когда композитор получил развод, он не захотел связывать себя новыми брачными узами и уехал на длительный срок в Европу. Екатерину после этого случая не взяли в Институт благородных девиц. Она осталась практически без средств существования. Пришлось ей идти в богатые дома гувернанткой. Когда ей исполнилось 38 лет, к ней посватался пожилой дальний родственник Михаил Осипович Шокальский – известный петербургский юрист. Они обвенчались, и через 2 года у них родился сын Юлий. Когда мальчику было 10 лет, его отец скончался, и мальчика пришлось отдать в морской кадетский корпус, а Екатерине Ермолаевне жить у родственников. Когда сын «встал на ноги» и обзавёлся семьёй, она переехала к нему и стала воспитывать внуков. Это от неё у Зинаиды Юльевны превосходное знание европейских языков, русской культуры и истории. Умерла Екатерина Ермолаевна в Петербурге в возрасте 86 лет.

Юлий Михайлович Шокальский родился в Петербурге в 1856 году. Детство он провёл в имении Тригорское Псковской губернии в семье Зинаиды Вульф – кузины Анны Петровны Керн. В соседнем имении Михайловское жил отставной полковник Григорий Александрович Пушкин – младший сын великого поэта. Григорий Александрович часто бывал в Тригорском и привязался к смышлёному мальчику. Своих сыновей у него не было, только дочери. Их дружба продолжалась долгие годы вплоть до смерти Григория Александровича.

В десятилетнем возрасте Юлия отдали в Морской кадетский корпус в Петербурге; он окончил его с отличием и был направлен на Балтийский флот. Получив звание мичмана, Юлий поступает в Морскую Николаевскую академию на отделение гидрографии и метеоро-

логии. Успешно закончив обучение, он работает в области метеорологии и климатологии в Главной геофизической обсерватории, которая тогда подчинялась командованию Флота. Через два года его в звании капитан-лейтенанта направляют в Военно-морскую гидрографическую службу. С этой организацией его будут связывать долгие годы работы и жизни.

Гидрографическая служба России в те годы была лучшей в мире. Целая флотилия судов бороздила просторы 14 морей трех океанов, омывающих берега Российской империи. Изучались берега, погода, течения, солёность, делали промеры глубин. Юлий Михайлович вначале участвовал в гидрографических работах. Потом он возглавил эту службу, получил генеральское звание, как его дед Ермолай Керн. Но Юлий Михайлович был не только военным администратором, он был учёным. Он обобщил бесценную информацию Гидрографической службы; его статьи печатались в «Морском вестнике» и в трудах Российского географического общества. В 1895 году им была опубликована статья о возможности и необходимости развития Северного Морского пути. Эту тему он развил в докладе на Международном географическом конгрессе в Лондоне в 1895 году.

Юлий Михайлович создал новую науку – океанологию.

В те времена суда Морской гидрографической службы бороздили моря и океаны, делая географические открытия. Много новых объектов было названо в честь Ю.М. Шокальского. Так, в 1912 году экспедиция под командованием капитана первого ранга Бориса Вилькицкого открыла к северу от Таймыра, обширный архипелаг, названный ими Землей Николая Второго, теперь – Северная Земля. Из-за сложной ледовой обстановки экспедиция смогла обследовать только восточный берег новооткрытой земли. Там они обнаружили глубоко вдающийся в сушу залив, который назвали заливом Шокальского. В 1931 году экспедиция Ушакова установила, что это не залив, а пролив между самыми крупными островами архипелага. Карская гидрографическая экспедиция обнаружила крупный остров к северу от Гыданского полуострова. Он был назван именем Шокальского. Новоземельская экспедиция открыла ледник, впадающий в бухту Русская Гавань, от которого откалывались айсберги. Ледник был назван именем Шокальского. У побережья острова Вайгач обнаружены небольшие островки, также названные его именем.

Юлий Михайлович был со времени учёбы в Морской академии членом Русского географического общества и принимал активное участие в его работе. В 1912 году после смерти П.П. Семёнова-Тяншанского его избирают вице-президентом РГО. Президентом Общества по традиции был член Императорского дома – великий князь Николай Михайлович. В 1917 году он сложил с себя обязанности президента РГО и передал их Шокальскому. Юлий Михайлович исполнял их до 1931 года. Почётным президентом общества он оставался до самой смерти.

Настал 1917 год. Генералитет Русской армии раскололся. Часть генералов возглавили борьбу против новой власти, значительная часть генералов и адмиралов сочли, что они должны служить России, какие бы перемены ни прошли во власти. Так, Его Высокопревосходительство, Вице-адмирал Шокальский стал товарищем Шокальским – членом коллегии Народного комиссариата по военно-морским делам и руководителем гидрографической службы. Он много сделал для восстановления флота, хотя его основные интересы лежали в научной и педагогической сферах. Юлий Михайлович продолжал преподавать в Морской академии и Петроградском университете. В Морской академии он создал Океанографический кабинет – прообраз будущего Института океанологии РАН. В 1923 г. Ю.М. Шокальский был избран действительным членом АН СССР. Должности руководителей Гидрометеослужбы, Главного управления геодезии и картографии он занимал недолго.

Мы много знаем о многогранной научной и общественной деятельности академика Шокальского, но почти ничего о его личной жизни. В 1880 году он обвенчался с Любовью Ивановной Скворцовой. Вместе они прожили 53 года до её смерти в 1923 году. У них было двое детей: дочь Зинаида (1882) и сын Александр (1889). Сын закончил Морское училище, был офицером Балтийского флота и погиб в морском сражении в самом начале 1917 года. Академик Юлий Михайлович Шокальский закончил свой жизненный путь на 85 году в Ленинграде.



Хочется рассказать о моих «встречах» с Ю.М. Шокальским. В 1955 году я, окончив Географический факультет МГУ, отправился к месту первой работы – полярной станции «Бухта Солнечная» на Северной Земле. 22 июня ледокольный пароход «Георгий Седов» отвалил от причала Молотовска (Северодвинска) и направился к Новой Земле. С первых дней рейса я познакомился и сдружился с моим сверстником – штурманом Виктором Петровым. Первым пунктом назначения оказалась полярная станция «Русская Гавань». Как только пароход бросил якорь, и началась разгрузка, мы с Виктором на первом кунгасе высадились на берег. Бухта «Русская Гавань» – это небольшой фьорд, заканчивавшийся ледником Шокальского. Ледник напоминал гигантского белого динозавра, пьющего воду из бухты. Ледяные пирамиды на его вершине смотрелись как зубцы на панцире динозавра. Время от времени от него отваливались куски льда и падали в воду. По фьорду проходила зыбь, раскачивающая наш пароход. Осмотрев окрестности станции, мы отправились на ледник. По поверхности льда бежало множество ручейков. Между ними поднимались белоснежные остроконечные глыбы льда, а под ручейками виден был небесно-голубой лёд. Он оказался коварным и очень скользким. Вступив на него, мы сразу полетели в ручей. Обошлось без ран, но гулять в мокрой одежде в Арктике неуютно, и мы поспешили обратно на судно.

Зайдя ещё на мыс Желания, мы устремились по Баренцеву морю. Через пролив Карские Ворота, мы вступили в Карское море. Но вскоре нас встретил массив дрейфующих льдов. Капитан повернул на юго-восток вдоль кромки этого массива. Виктор не вылезал из обсервационной бочки на гротмачте. Где-то недалеко замаячил остров. Капитан приказал лечь в дрейф. Виктор сказал, что это остров Шокальского и попросил капитана разрешить высадку на него. Виктор, два матроса и я на шлюпке отправились к острову. Мы высадились на песчаной косе. На нас сразу набросились крачки. Их яйца лежали тут же в песчаных ямках. Мы поднялись повыше. Там расстилалась мохово-злаковая, пятнистая тундра. Раздался гудок парохода, призывающий нас вернуться. На пароходе Виктор рассказал мне, что авиаразведка нашла полынью, и по ней мы попали в Диксон.

Начались дни ожидания момента когда ледовая обстановка позволит нам добраться до Северной Земли. Наконец, в начале сентября нас снова погрузились на знакомый пароход. Первый пункт назначения была полярная станция Краснофлотские острова в проливе Шокальского у его выхода в Карское море. Мы остановились у полярной станции. Перед нами на северо-восток уходил пролив, забитый дрейфующим льдом. Над ним поднимались шапки айсбергов. Над нами со стороны острова Большевик поднималась чёрная отвесная стена, перекрытая материковыми льдами. Эта стена казалась призрачной, висящей в воздухе. Другой берег пролива едва угадывался в дымке. Мне удалось высадиться на одном из Краснофлотских островов и сделать описание увиденного. Вскоре мы прибыли в бухту Солнечная. Мне пришлось расстаться с «Седовым» и его штурманом Виктором.

Летом 1957 года вместе с геодезистом Леонидом Хрущёвым мне удалось совершить переход через ледник Ленинградский и выйти к заливу Ахматова. По его берегу мы прошли в мысу Песчаному, где пролив Шокальского соединяется с морем Лаптевых. Пролив Шокальского, как и в прошлый раз, был забит паковым многолетним льдом. На берегу пролива мы сделали описание и отобрали образцы. Так закончились мои «встречи» с Ю.М. Шокальским.

В 1957 я вернулся на Большую Землю, приехал в Ленинград и сделал сообщение о моей работе на Северной Земле. Зинаида Юльевна Шокальская предложила мне выступить с докладом в Почвенном музее, что я с удовольствием сделал, включив туда мои «встречи» с Шокальским. Зинаиде Юльевне мое сообщение понравилось. Она пригласила меня в свой кабинет с видом на Дворцовый мост. Мы пили чай с очень вкусным печеньем и долго беседовали. К сожалению, разговор шёл об Арктике и моих исследованиях. Она пригласила меня ещё посещать музей. Что я и сделал. Она удостаивала меня беседами. К сожалению, она почти ничего не говорила о себе. Разговор шёл о моих «встречах» с Шокальским, описанными выше, о природе Арктики, жизни полярников. Тогда Зинаиде Юльевне было 75 лет, но я был уверен, что ей лет на 15 меньше. Высокая стройная дама в длинном тёмно-коричневом пла-

ть с накрахмаленным кружевным воротником. Аккуратно убраны седые волосы. Привлекали её темные глаза, пронзительные и добрые. Её язык отличался от нашего. Слова были те же, но интонации были более мягкие и распевные. С таким языком я столкнулся в общении с русскими эмигрантами первой волны в Чили.

Зинаиду Юльевну воспитывала бабушка Екатерина Ермолаевна. С детства она освоила основные европейские языки. Позже она сопровождала отца в его поездках в Париж и Лондон, посещала Италию и Германию. Бабушка передала ей любовь к русской истории и культуре. Дни ее молодости в Петербурге проходили в Серебряный век русской культуры, и она была в центре событий. Когда я рассказал ей о моих встречах с Львом Николаевичем Гумилёвым, она заметила: «Я была хорошо знакома с его родителями, а Лёву помню мальчиком в коротких штанишках».

По примеру отца Зинаида Юльевна стремилась к знаниям, к науке. Она окончила естественный факультет Высших женских курсов и некоторое время преподавала географию в женской гимназии. Началась первая мировая война. Жизнь в Петербурге осложнилась. Она перешла работать в госпиталь – ухаживать за ранеными.

В начале 1917 года в морском бою погибает её младший брат. От престола отрекаются Романовы, возникает Временное правительство, к власти приходят большевики. Её отец продолжает служение Родине на своём посту. Начинается гражданская война. Петроград стоит голодный, холодный, тёмный. Даже правительство покидает его, переселяется в Москву. Начинает крутиться «Красное колесо». Расстрелян поэт Н. Гумилёв и многие другие. От причалов Петрограда уходит в Европу «философский» пароход. Но учёные Российской академии наук продолжают работать. В рамках Академии создаётся Комиссия по изучению естественных производительных сил России (КЕПС). Зинаида Юльевна принимает активное участие в её работе. Внутри Комиссии создаются отделы по различным направлениям. В их числе и почвенный отдел, который потом вырастает в Почвенный институт им. В.В. Докучаева.

Молодой научный сотрудник общается с учёными, работающими в КЕПСе. Её внимание особенно привлекает академик Ф.Р. Левинсон-Лессинг, Б.Б. Польшов. Она переходит в почвенный отдел и принимает активное участие в создании Почвенного Института. В начале 30-х годов Академия Наук переезжает в Москву. Туда же переводят Почвенный институт, но Музей почвоведения решают оставить в Ленинграде. Зинаида Юльевна – коренная петербурженка, остаётся в Музее. Сначала научным сотрудником, потом и директором.

Зинаида Юльевна принимает активное участие в экспедиции, возглавляемой академиком А.Е. Ферсманом в Хибинь. В основном она использует своё отличное знание иностранных языков, полученное от бабушки Екатерины. Ей создаются почвенные карты Индии и Индонезии. Её книга «Почвенный покров Африки» остаётся до сих пор классической работой, и за нее Зинаиде Юльевне была присвоена учёная степень доктора географических наук. Кроме науки важной стороной её жизни была забота об отце.

В 30-е годы прошлого века «Красное колесо» начало набирать обороты. По городу, особенно по ночам, сновали чёрные «воронки». Большой дом на Литейном проспекте сиял огнями. Многие ленинградцы переселились из уютных квартир на нары лагерей. Руководитель Зинаиды Юльевны Б.Б. Польшов был переведен в Москву и занял пост директора Почвенного института, но через несколько месяцев оказался в Бутырской тюрьме по ложному навету одного из коллег. Его друзья и соратники пополнили ряды узников ГУЛАГа. В Ленинграде по «делу Польшова» в Большой дом вызвали его любимую ученицу Марию Глазовскую. Каждый ждал, кто следующий. Юрий Алексеевич Ливеровский рассказал такую историю, свидетелем которой он был.

Дом академиков на Васильевском острове. В нём жили и Шокальские. Глухая зимняя ночь 1937 года. Во входную дверь громкий настойчивый стук. Из квартир высовываются испуганные жители. За кем? С верхнего этажа спускается академик Ф.Р. Левинсон-Лессинг: «Граждане, не волнуйтесь. Это только пожар. Наш дом горит». Пошёл вниз открывать пожарным.

К счастью, «Красное колесо» не зацепило семью Шокальских. В 1940 году Юлий Михайлович умирает, и Зинаида Юльевна остаётся одна. Наступает 1941 год. Война. Блокада Ленинграда. Зинаида Юльевна отказывается эвакуироваться. В блокадном городе она охраняет свой музей. Её назначают также вице-президентом Всесоюзного географического общества. Благодаря её стараниям, сохранены бесценные фонды общества. Она, как все блокадницы, ходит к прорубям на Неву за водой, ест скудный блокадный паёк, коротает длинные вечера с коптилкой и выживает «всем смертям назло».

Блокада снята. Война закончилась. Ленинград быстро восстанавливается. Но «Красное колесо» продолжает крутиться. Из соседней квартиры забирают друга семьи Шокальских всемирно известного Николая Ивановича Вавилова. Бесследно исчезают знакомые биологи.

Когда я приехал в Ленинград, уже настали времена «оттепели» Вернулись невинно осужденные. Но у ленинградцев за долгие годы выработалась привычка не говорить о знакомых и о предках. Сколько могла бы рассказать и написать Зинаида Юльевна! В 1961 году ее не стало. С ней закончился славный род Полторацких – Кернов – Шокальских.

Автор благодарит Марию Иннокентиевну Герасимову за помощь в написании этой работы.

УДК 631.4

## ВЛИЯНИЕ СПОСОБОВ ОБРАБОТКИ НА УСТОЙЧИВОСТЬ К РАЗБРЫЗГИВАНИЮ ДОЖДЁМ И РЕОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СЕРЫХ ЛЕСНЫХ ПОЧВ

А.В. Мищенко

МГУ имени М.В. Ломоносова

Устойчивость к разрушению каплями зависит от агрегатного состава и межчастичных контактов. При различных обработках и типах пара (черный, занятый) изменяется структурное состояние почв, что влияет на устойчивость к разбрызгиванию.

*Ключевые слова:* структура, агрегаты, реологические свойства, серая лесная почва, обработки.

### ВВЕДЕНИЕ

Глобальные климатические изменения затрагивают Владимирское Ополье и при сохранении тенденций к повышению температур и увеличению засушливого периода необходимость в орошении возрастёт, а также опасность ирригационной эрозии. По результатам многолетних наблюдений сотрудниками ФГБНУ «Верхневолжский ФАНЦ» за ходом температур и осадками установлено, что с 1990 по настоящее время наблюдается постепенное повышение суммы активных температур за вегетационный период. Если за 1990–2000 гг. средняя сумма активных температур составила 2058 °С, то за 1998–2009 гг. – 2121 °С, а за 2007–2015 гг. – 2306 °С. Также вырос гидротермический коэффициент с 1.28 до 1.36 [7]. По данным В.В. Окоркова процессы водной эрозии во Владимирской области распространены >18 % площади, на пашне с уклоном >2–3°. Более 40 % эродированных почв области это серые лесные. Эти почвы отличаются высоким содержанием крупной (около 40 %) и средней (10–15 %) пыли. Также в пахотном слое большинства серых лесных почв содержится 10–19 % илистой фракции [8]. Это приводит к переуплотнению в засушливые периоды слоя 5–10 см выше 1.35–1.40 г/см<sup>3</sup> [9]. В зависимости от типа обработки изменяется структурное состояние. Ежегодная безотвальная обработка на глубину 6–8 см формирует микроагрегатный состав аналогичный участку залежи, при этом увеличивается количество агрегатов >10 мм, также применение этой обработки положительно сказывается на водопрочности [2]. В результате ежегодной отвальной вспашки на глубину 20–22 см формируется плужная по-

дошва [3]. Поэтому целью исследования стало изучение влияния агротехнологий разной интенсивности на структуру серых лесных почв Владимирского Ополя на уровне агрегатов и ЭПЧ, и зависимость устойчивости почв к разбрызгиванию дождём от структурного состояния. Были поставлены следующие задачи: провести анализ содержания агрономически ценных агрегатов, провести оценку реологических свойств почв; определить критические скорости разбрызгивания при разных способах обработки почв.

### ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Образцы почвы были отобраны на участке опыта по изучению адаптивно-ландшафтных систем земледелия ФГБНУ «Верхневолжский ФАНЦ». Опытный участок расположен в водораздельной части плакорного рельефа с уклоном  $<1^\circ$ , выделены почвенные разности: серая лесная, серые лесные разной степени оподзоленности, серая лесная со вторым гумусовым горизонтом. Севооборот: Овёс – Многолетние травы 1 г.п. – Многолетние травы 2 г.п. – Ячмень – Черный пар – Яровая пшеница. Внесение NPK 0, 30, 60, 90 кг/га. На опытном участке применяются четыре системы обработки почв.

Общепринятая отвальная под все культуры: лущение стерни осенью после уборки предыдущей культуры, вспашка на глубину 20–22 см., а под 5-ю культуру (черный или занятый пар) глубокое рыхление на 25–27 см.

Комбинированно – энергосберегающая: плоскорезная обработка на 10–12 см и весеннее гл. рыхление на 25–27 см два раза в ротацию.

Комбинированно – ярусная: плоскорезная обработка на 10–12 см, весеннее гл. рыхление на 25–27 см. Перед мн. травами 1 г.п., яровой пшеницей – вспашка на 20–22 см.

Противоэрозионная обработка: гл. рыхление на 25–27 см осенью и весной.

В 2019 году для анализа устойчивости серых лесных почв к разбрызгивающему действию дождя были взяты образцы с делянок под чёрным и занятым викоовсяной смесью паром. Минеральные удобрения не вносились. Образцы отбирали буром в трёхкратной повторности в слое 0–20 см. Методы: определение водопрочности агрегатов по методу Саввинова, на стандартной колонке сит:  $>10$ ; 10–7; 7–5; 5–3; 3–2; 2–1; 1–0.5; 0.5–0.25;  $<0.25$  мм; определение реологических свойств почвы с использованием ротационного вискозиметра «РЕОТЕСТ-2» [4, 12]; моделирование дождя на Лабораторной дождевальной установке [11]. Каплеобразователи на рабочей поверхности расположены по спирали Архимеда. Благодаря этому и автоматически раскачивающему устройству, которое вращает установку, капли дождя равномерно распределяются по стоковой площадке, не образуя углубления в почве. Диаметр образуемых капель равен 2.6 мм. Дождевание производится дистиллированной водой, расход воды 4.4 мм/мин и 4.0 мм/мин. Дождевание одного образца производилось в течение тридцати минут. Скорость падения капель регулируется высотой установки, мы использовали 7 высот: 1.75, 1.5, 1.25, 1.0, 0.7, 0.5 и 0.3 м. Насыпные образцы насыщаются водой перед дождеванием. Разлетающиеся частицы улавливаются специальным воротом. Затем осадок собирается в бюксы, просушивается и взвешивается. Для построения дендрограмм сходства по алгоритму для смесей и для метода главных компонент использовали программу STATISTICA [6, 13].

### РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЯ

Наши наблюдения за структурным состоянием серых лесных почв при парах подтверждают данные, полученные сотрудниками ФГБНУ «Верхневолжский ФАНЦ». В частности, показано существенное отличие энергосберегающей обработки от других по влиянию на структурное состояние почвы и согласуется с ранее опубликованными данными для серых лесных почв [5, 10]. В образцах почв при энергосберегающей обработке в поверхностном слое 0–20 см содержалось меньше агрегатов  $>10$  мм по сравнению с образцами с другими типами обработки (табл. 1). Так же показано, что на черном пару по сравнению с занятым значительно увеличивается доля агрегатов  $>10$  мм. Таким образом, черный пар оказывает

негативное воздействие на структурное состояние серой лесной почвы, в том числе и из-за потери органического вещества.

Таблица 1. Содержания воздушно-сухих агрегатов серой лесной при различных обработках на черном и занятом парах.

Обработка	Размер фракции, мм; содержание фракции, %								
	>10	10–7	7–5	5–3	3–2	2–1	1–0.5	0.5–0.25	<0.25
Отв/ЧП	16.50	16.74	14.76	15.79	11.90	14.20	3.18	3.71	3.22
Э/ЧП	15.86	12.81	11.21	14.81	12.31	18.20	3.52	5.33	5.95
Я/ЧП	8.44	13.25	12.90	17.38	14.91	20.40	2.13	5.07	5.52
П/ЧП	13.60	11.62	11.87	15.43	14.25	19.69	2.64	5.49	5.41
Отв/ЗП	11.12	11.75	14.68	17.81	14.32	22.61	3.64	7.75	7.45
Э/ЗП	8.62	8.87	9.54	14.95	16.54	18.38	4.63	8.84	9.63
Я/ЗП	10.46	19.28	18.00	17.31	11.59	13.09	2.57	3.32	4.38
П/ЗП	7.10	21.40	17.80	17.67	12.61	13.29	2.25	3.04	4.84

Примечания: ЧП – черный пар; ЗП – занятый пар; Отв – отвальная обработка; Э – энергосберегающая обработка; Я – ярусная обработка; П – протиерозийная обработка.

Результаты кластеризации разного типа обработки методом кластерного анализа согласно распределению в них сухих структурных отдельностей приводятся на дендрограмме (рис. 1а).

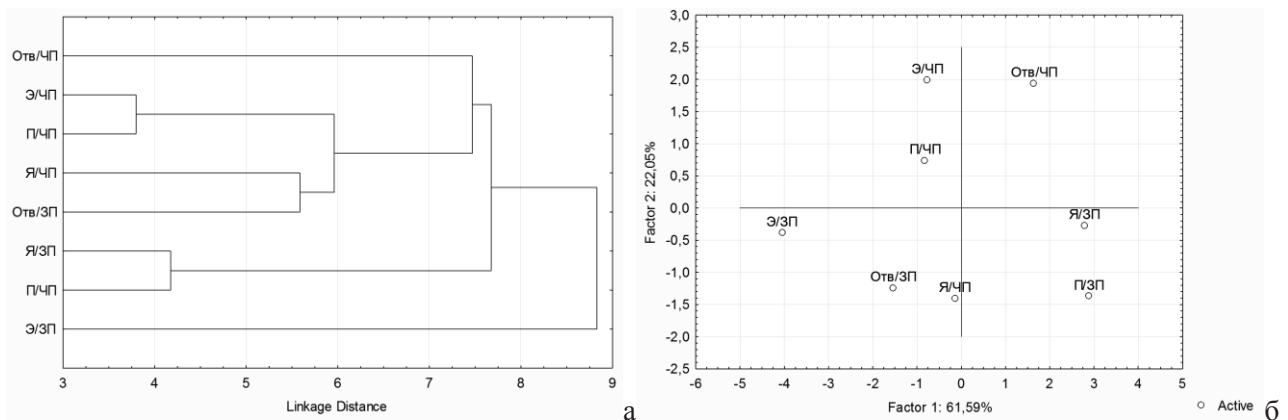


Рисунок 1. Дендрограмма иерархической группировки (а) и распределение в плоскости главных компонент (б) агрегатного состава слоя 0–20 см. Обозначения аналогичны, представленным в табл. 1.

Различия между почвами по структуре отражаются в дендрограммах в евклидовом расстоянии. Наименьшее расстояние в слое 0–20 см между серой лесной под энергосберегающей и противоэрозийной обработками на черном пару (3.8); а наибольшее расстояние между образцами с делянок под теми же обработками, но на занятом пару.

В табл. 2 приведена характеристика главных компонент по результатам просеиваний. Первая и вторая главные компоненты описывают большую часть вариации рассматриваемых характеристик объектов – больше 80 %. Первая, наиболее значимая компонента, вносит вклад в характеристику объектов около 60 %, соответственно вклад второй составляет 20 %. Учитывая относительно невысокий вклад других компонент, к которым можно отнести ошибки определения, их не рассматривали.

Таблица 2. Характеристика главных компонент для результатов просеиваний.

ГК	собственное число	вклад, %	Коэффициент собственного вектора								
			>10	10–7	7–5	5–3	3–2	2–1	1–0.5	0.5–0.25	<0.25
1	5.54	61.59	0.002	<b>0.96</b>	<b>0.89</b>	0.514	<b>-0.84</b>	<b>-0.75</b>	<b>-0.766</b>	<b>-0.961</b>	<b>-0.884</b>
2	1.98	22.05	<b>0.93</b>	-0.11	-0.32	<b>-0.77</b>	-0.43	-0.20	0.248	-0.163	-0.331

При анализе воздушно-сухих агрегатов в слое 0–20 см наиболее значимы для первой компоненты как крупные (10–7, 7–5), так и мелкие (3–2 – <0.25) фракции. Для второй компоненты определяющая фракция >10 мм. Вклад в различия объектов фракции >10 и <0.25 мм достаточно информативен – эти фракции не относятся к агрономически ценным агрегатам и их содержание отражает степень антропогенной нагрузки. И как можно увидеть на плоскости главных компонент именно по второй компоненте образцы разделились. Это наглядная иллюстрация к воздействию черных паров на структурное состояние почв. Распределение объектов в координатах первых двух главных компонент (проекция в процентах от размаха) приводится на рис. 1. По первой главной компоненте (на рис. 1б – вдоль оси X) объекты распределены следующим образом, в слое 0–20 см в отрицательной зоне сгруппированы все варианты с занятым паром, а в положительной с черным паром, исключение составляет вариант ярусной обработки на черном пару. В этом варианте обнаружилось меньшее содержание определяющей фракции >10 мм, чем при других вариантах обработки на черном пару. Так же распределение на координатной плоскости отражает расстояние между образцами на дендрограмме. Образец при отвальной обработке на черном пару отличается наибольшим содержанием агрегатов >10 мм (16.50 %) (табл. 1) и наименьшим <0.25 мм (3.22 %), а образец при энергосберегающей на занятом пару содержащий наибольшее количество агрегатов <0.25 мм (9.63 %) находится в противоположной части плоскости. Образцы, имеющие большее сходство и маленькие расстояния на дендрограмме на плоскости главных компонент также находятся рядом, например, под энергосберегающей и противоэрозионной обработками на черном пару (3.8).

Исследования реологических свойств дали следующие результаты (табл. 3). Диапазон линейного вязкоупругого поведения составлял в среднем 0.0048 % деформации. Минимальное сопротивление сдвигу и значение модуля сдвига – было отмечено для варианта с применением энергосберегающей обработки, значение модуля сдвига равнялось 632.67 Па, среднее значение для 12 повторностей 661.83 Па. Кроссовер происходил при деформации 1.48 % в среднем для 12 повторностей. Наименьшее значение, деформации при котором происходил кроссовер (1.22 %) наблюдалось для варианта с применением противоэрозионной обработки. Наибольшее (1.72 %) для энергосберегающей обработки. В целом можно сказать, что на уровень контактов между ЭПЧ применение различных видов обработки влияет не столь сильно, как на структурное состояние на уровне агрегатов.

Третьим этапом нашей работы было моделирование воздействия дождя с помощью лабораторной дождевальной установки. Мы предполагали, что значения критических скоростей разбрызгивания согласуется с различиями структурного состояния почв под воздействием различных обработок, так сила упругости почвы, межчастичных контактов и крупность агрегатов может влиять на разбрызгивание почв при дожде [1].

На графике (рис. 3а) представлена зависимость смыва от квадрата скорости. По оси Y откладывается масса оторванных частиц с площади образца за время, по X – квадрат скорости падения капли. Критические скорости рассчитываются из линейных уравнений (рис. 3б). Разбрызгивающая скорость – скорость, при которой начинается массовый отрыв (выбивание) частиц от поверхности. Не разбрызгивающая – скорость капель, при которой уже наблюдается отрыв частиц, однако ее величины еще недостаточно для массового отрыва почвенных частиц. Скорости рассчитывались из линейных уравнений аппроксимации значений. Значения полученных скоростей представлены в табл. 4. Можно увидеть, насколько положительное действие на структуру оказывает занятый пар. Скорости на нём выше, следовательно, интенсивность дождя для отрыва частиц должна быть существенно выше. Отмечено, что при отвальной и ярусной обработках, скорости были ниже, чем при энергосберегающей и противоэрозионной.

Таблица 3. Значение деформации и модуля вязкости при различных обработках.

Обработка	W, %	ст. откл.	дов. инт.	LVE				ст. откл.	ст. откл.	дов. инт.
				Gamma %	ст. откл.	дов. инт.	G', Pa			
Отвальная	46,62	1,10	1,24	0,00567	0,00137	0,00155	793333	70713	80017	
Энергосберегающая	48,06	1,17	1,33	0,00435	0,00092	0,00105	775666	19008	21510	
Ярусная	46,25	1,06	1,20	0,00435	0,00092	0,00105	848000	87641	99173	
Противоэрозионная	47,92	1,83	2,07	0,00488	0,00	0,00	798000	19000	21500	
Среднее	47,21	0,91	0,89	0,00481	0,00062	0,00061	803750	31028	30407	

Таблица 3. Продолжение.

Обработка	Shear Stress max				Crossover							
	gamma %	ст. откл.	дов. инт.	$\tau$ Pa	ст. откл.	дов. инт.	Gamma %	ст. откл.	дов. инт.	G' [Pa]	ст. откл.	дов. инт.
Отвальная	0,45	0,11	0,12	651,67	17,62	19,93	1,64	0,61	0,69	23940	8785	9941
Энергосберегающая	0,39	0,00	0,00	632,67	19,55	22,13	1,72	0,19	0,22	19763	3202	3623
Ярусная	0,39	0,00	0,00	687,00	4,58	5,19	1,34	0,30	0,34	31073	7707	8721
Противоэрозионная	0,39	0,00	0,00	676,00	13,00	14,71	1,22	0,04	0,05	33210	1307	1480
Среднее	0,40	0,055	0,054	661,83	24,41	23,93	1,48	0,24	0,23	26996	6242	6117

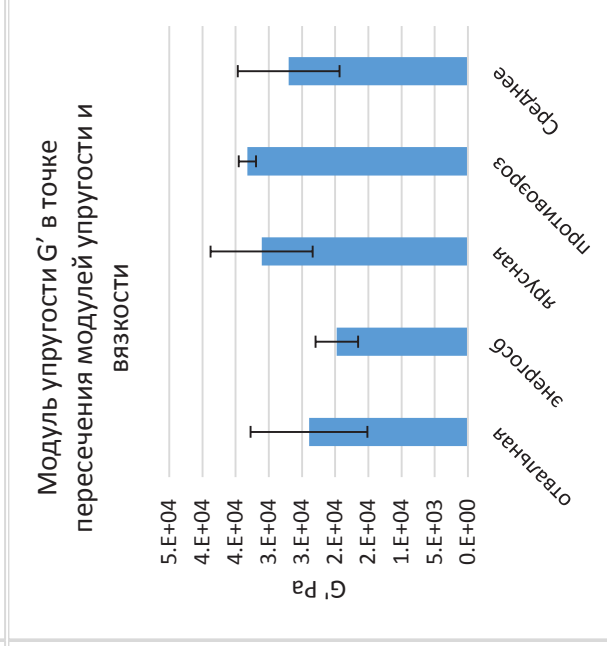
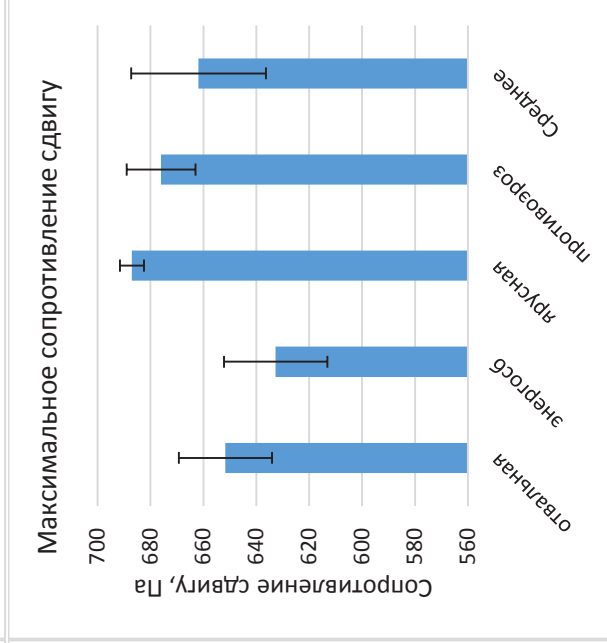
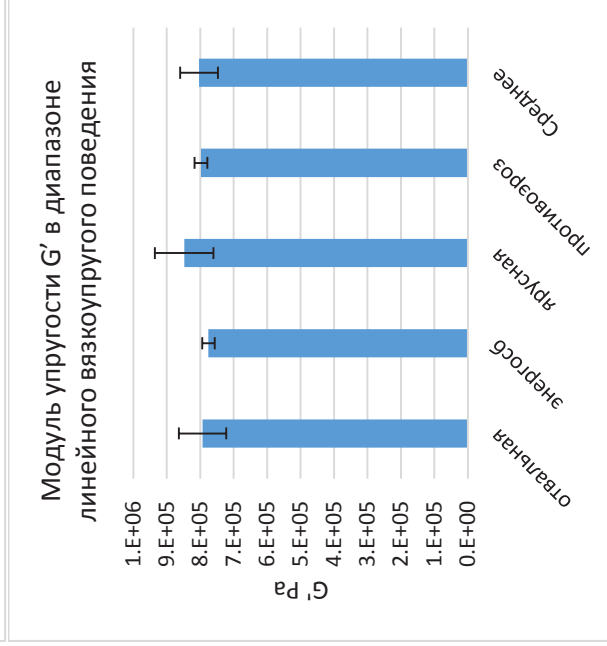
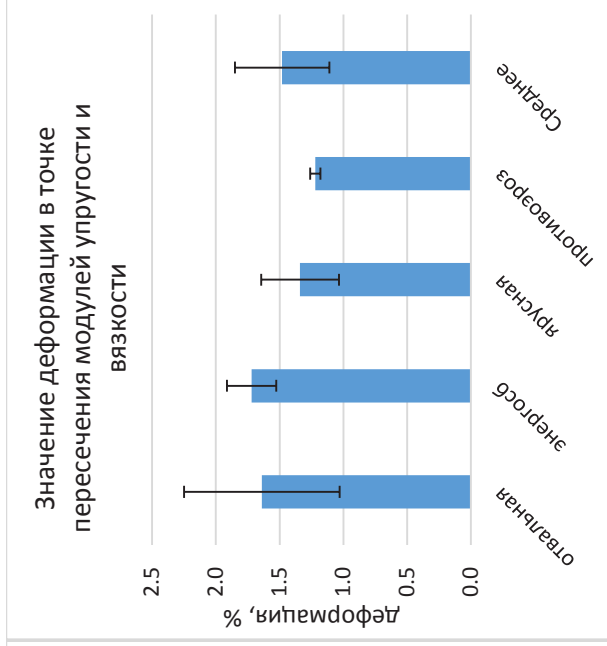
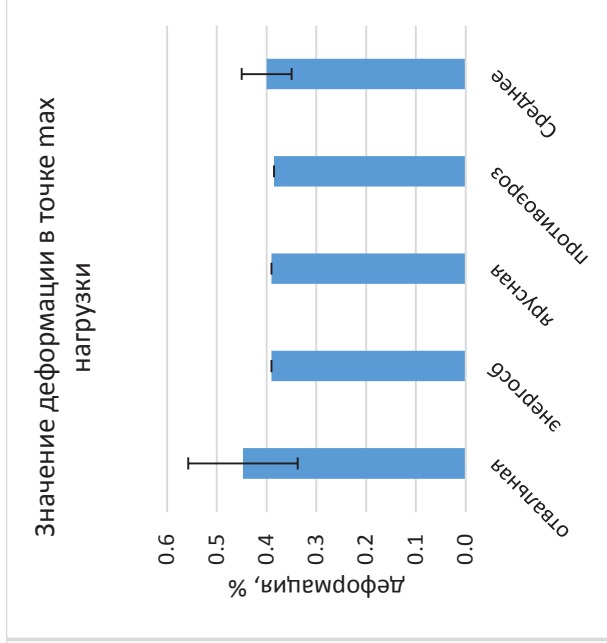
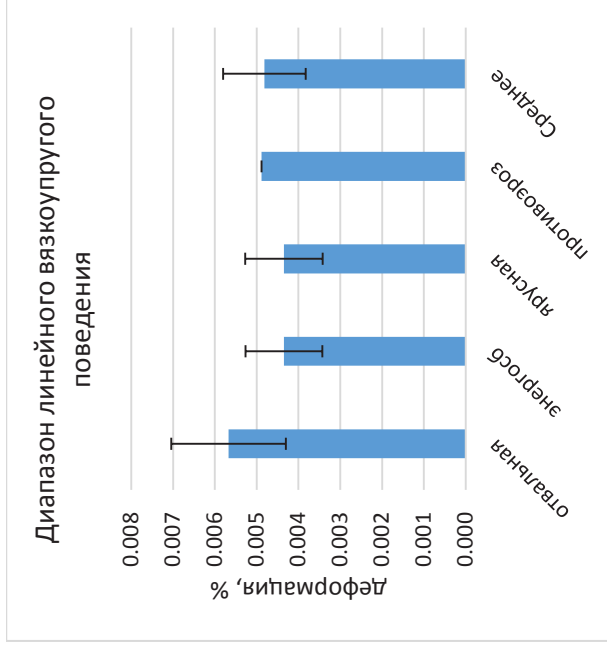


Рисунок 2. Графики зависимости модулей упругости и вязкости от деформации.



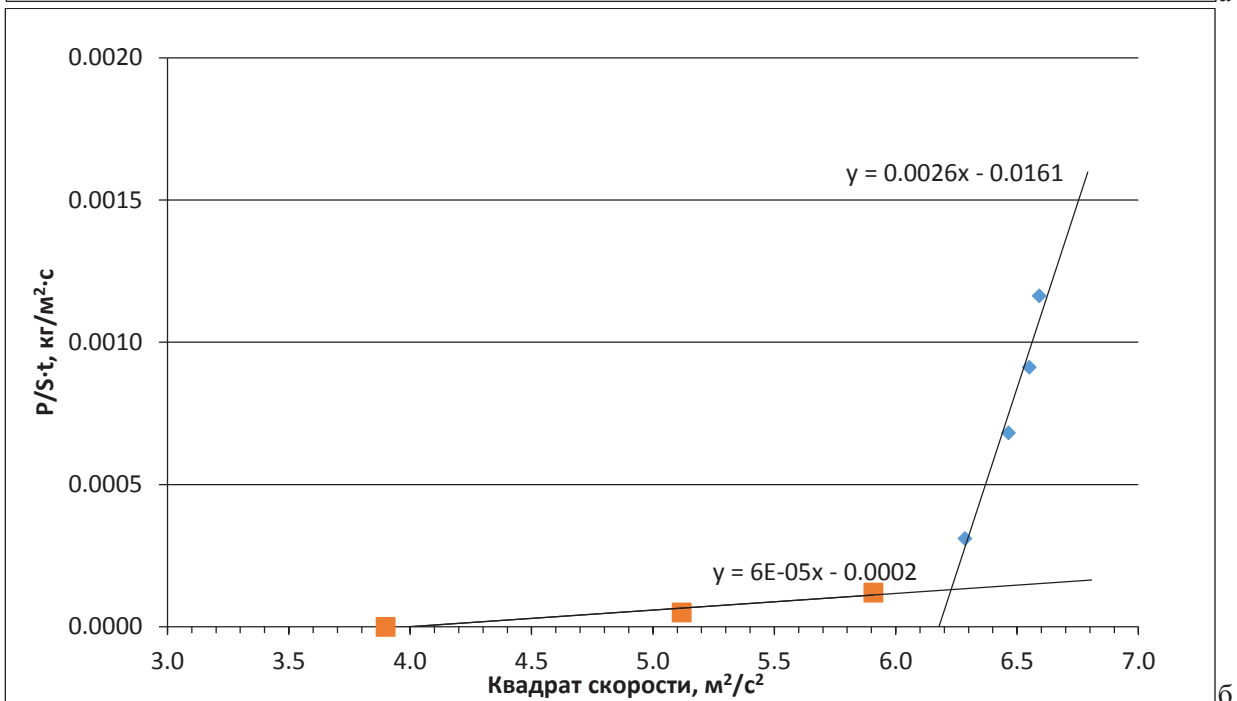
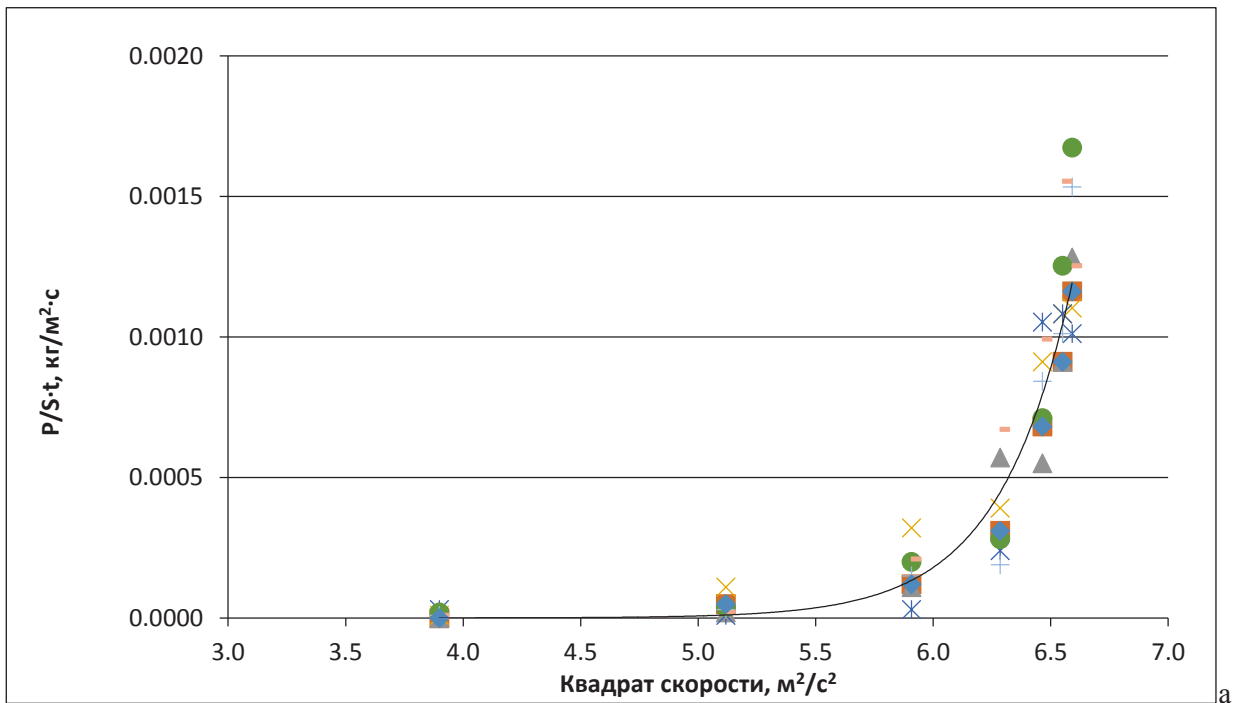


Рисунок 3. Зависимость смыва от квадрата скорости капель (а) и уравнения расчета разбрызгивающей скорости (б).

Таблица 4. Разбрызгивающая и не разбрызгивающая скорости.

делянка	пар	обработка	не разбрызгивающая скорость (м/с)	разбрызгивающая скорость (м/с)
1	чп	отвальная	2.488	2.502
2	чп	энергосберегающая	2.460	2.470
3	чп	ярусная	2.475	2.476
4	чп	противоэрозионная	2.487	2.484
9	зп	отвальная	2.487	2.496
10	зп	энергосберегающая	2.506	2.514
11	зп	ярусная	2.466	2.475
12	зп	противоэрозионная	2.506	2.508

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Показано, что на устойчивость к разбрызгиванию влияет способ обработки и тип пара, так как они оказывают влияние на структурное состояние почвы. В частности, существенно положительное влияние энергосберегающей обработки на структурное состояние почвы: в поверхностном слое 0–20 см содержалось меньше агрегатов >10 мм по сравнению с другими типами обработки. На черном пару выявлена деградация структуры, что повлекло за собой и меньшую устойчивость к разбрызгиванию. На черном пару по сравнению с занятым значительно увеличивается доля агрегатов >10 мм. Таким образом, черный пар оказывает негативное воздействие на структурное состояние серой лесной почвы, в том числе и из-за потери органического вещества.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Барсукова М.Ю., Дудкин Ю.И., Коржов Е.Н., Щеглов Д.И. Капельная эрозия почв // Вестник ВГУ, Серия: Химия. Биология. Фармация, 2008, № 2, с. 62–70.
2. Зинченко С.И., Мазиров М.А., Зинченко В.С. Антропогенное влияние приемов основной обработки на элементы механического состава серой лесной почвы // Успехи Современного Естествознания № 2, 2013, с. 47–50.
3. Зинченко С.И. Влияние приемов основной обработки на структуру серой лесной почвы в агроэкосистемах при возделывании озимой ржи. // Владимирский земледелец. 2019. № 3. С. 4–7.
4. Ключева В.В., Хайдапова Д.Д. Реологические свойства образцов естественного и нарушенного сложения дерново-подзолистой и агродерново-подзолистой почвы // Бюл. Почв. ин-та. 2017. № 89.
5. Мельцаев И.Г. Роль систем обработки почвы в повышении её плодородия в агроландшафтах Верхневолжья / И.Г. Мельцаев – Иваново: [б.и.], 2002. 367 с.
6. Мешалкина Ю.Л., Самсонова В.П. Математическая статистика в почвоведении. М.: Изд-во Моск. ун-та, 2008. 84 с.
7. Окорков В.В., Фенова О.А., Окоркова Л.А. Приёмы комплексного использования средств химизации в севообороте на серых лесных почвах Верхневолжья в агротехнологиях различной интенсивности / В.В. Окорков, О.А. Фенова, Л.А. Окоркова; ФГБНУ «Владимирский НИИСХ» – Суздаль, 2017. 176 с.
8. Окорков В.В. Гранулометрический состав почв и его роль в устойчивости к водной эрозии // ВЗ. 2010. № 3.
9. Окорков В.В., Фенова О.А., Окоркова Л.А. Приёмы комплексного использования средств химизации в севообороте на серых лесных почвах Верхневолжья в агротехнологиях различной интенсивности/ В.В. Окорков, О.А. Фенова, Л.А. Окоркова; ФГБНУ «Владимирский НИИСХ» – Суздаль, 2017. 176 с.
10. Пестряков А.М. Приемы антропогенного регулирования плодородия почв // Инновационные технологии в адаптивно-ландшафтном земледелии: сб. докл. Международ. науч.-практ. конф. Суздаль / ФГБНУ «Владимирский НИИСХ». – Иваново: ИПК «Прес-Сто», 2015. – С. 206–212.
11. Патент на полезную модель 171157 Рос. Федерации: МПК А01G 25/00 Лабораторная дождевальная установка / Демидов В.В., Шульга П.С., Есафова Е.Н., Абдулханова Д.Р., Полубнев А.А.; заявитель и патентообладатель ФГБНУ МГУ им. М.В. Ломоносова – № 2016110105; заявл. 21.03.2016, опубл. 23.05.2017, Бюллетень Изобретений – № 15
12. Хайдапова Д.Д., Милановский Е.Ю., Честнова В.В. Оценка реологическими методами восстановления структуры почв под влиянием выращивания лесополос на антропогенно нарушенных почвах // Вестник АГАУ. 2014. № 6 (116).
13. Холодов В.А., Ярославцева Н.В., Лазарев В.И., Фрид А.С. Интерпретация данных агрегатного состава Типичных черноземов разного вида использования Методами кластерного анализа и главных компонент // Почвоведение, 2016, № 9, с. 1093–1100.

Работа рекомендована д.с.-х.н., в.н.с. Д.В. Карповой.

# THE INFLUENCE OF TREATMENT METHODS ON RAIN EROSION AND RHEOLOGICAL PROPERTIES OF FLUVISOLS

A.V. Mishchenko

Moscow State University of Lomonosov

The resistance to destruction by drops depends on the aggregate composition and interparticle contacts. With various treatments and types of steam (black, busy), the structural state of the soil changes, which affects the resistance to spraying.

*Keywords:* structure, aggregates, rheological properties, gray forest soil, treatments

УДК 630\*114.351

## ИССЛЕДОВАНИЯ БИОЛОГИЧЕСКОЙ АКТИВНОСТИ ПОГРЕБЕННЫХ ПОЧВ КРОВЛИ ПОЗДНЕМЕЛОВОГО ИСКОПАЕМОГО ЛЕСА ВОСТОЧНОЙ ЧУКОТКИ

Е.А. Назаренко<sup>1</sup>, М.Р. Васина<sup>1</sup>, М.М. Гладкова<sup>2</sup>, П.В. Учанов<sup>3</sup>

<sup>1</sup>РНИМУ имени Н.И. Пирогова

<sup>2</sup>МГУ имени М.В. Ломоносова

<sup>3</sup>Институт проблем экологии и эволюции РАН

Цель исследования заключалась в выявлении эффектов погребенных почв Восточной Чукотки на тест-культуры в лабораторных биотестах. Метод биотестирования с использованием простейших показал токсичность исследованных образцов почв. Установлено ингибирующее влияние почв на прорастание спор микромицета *Aspergillus niger*. Химический анализ выявил большое количество металлов, токсичных для живых организмов.

*Ключевые слова:* палеопочвы, биоактивность, биотестирование, токсичность.

### ВВЕДЕНИЕ

Почва – уникальный биокосный продукт. В палеопочвах соотношение живого и неживого компонентов меняется под влиянием различных воздействий, включая вулканическую активность.

Обнаруженные проф. Б.Ф. Апариним на территории Восточной Чукотки погребенные почвы имели горизонты, напоминающие органогенные. Образцы почв, погребенных под вулканогенной толщей осадочной породы были представлены рыхлой черной массой, похожей на хорошо гумусированную почву. Ископаемый лес предположительно относится к тэмлянкой флоре, возраст которой относится к верхнему мелу или раннему палеоценту [3].

Биологическая активность почвы – это совокупность биологических процессов в почве. Она характеризует размеры и направление процессов превращения веществ и энергии в экосистемах суши, интенсивность переработки органических веществ и разрушения минералов. Для оценки БАП используют перечень методов: микробиологические, химические, физиологические, биохимические. Так, оценка токсичности, эмиссии CO<sub>2</sub>, определение КХА ряда элементов позволяет наиболее точно оценить биологическую активность почвы.

Актуальным представлялось исследование биологической активности образцов погребенных почв, выделенных на основании сходства с темноокрашенными гумусированными слоями. В связи с этим, осуществлялось изучение влияния двух образцов погребенных почв на живые организмы.

### ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Объектами исследования выступили два образца погребенных почв – 4-Е и 5-Е. Пробо-подготовка образцов к исследованиям заключалась в их измельчении и просеивание через сито (d = 1 мм) для отделения более крупных частиц от мелких. Из каждого исследуемого

---

Исследование выполнено при частичной поддержке РФФИ, проект 18-04-01218.

© Е.А. Назаренко, М.Р. Васина, М.М. Гладкова, П.В. Учанов, 2021

образца почвы брали навеску по 1 г в 6-кратной повторности в пенициллиновые флаконы. После этого в каждый флакон добавляли дистиллированную воду в соотношении 1:4 (почва:вода), тщательно перемешивали и отстаивали в холодильнике в течении 3-х суток при температуре 4–6 °С.

Оценка токсичности двух исследуемых образцов почв проводилась с использованием стандартизированных тест-культур [1]: простейших *Paramecium caudatum* согласно «Методики определения токсичности отходов, почв, осадков сточных, поверхностных и грунтовых вод методом биотестирования с использованием равноресничных инфузорий *Paramecium caudatum* Ehrenberg» ФР.1.39.2006.02506 (ПНД Ф 14.1:2:3.13-06 16.1:2.3:3.10-06) и генномодифицированных люминесцентных бактерий *Escherichia coli* согласно «Методики определения интегральной токсичности поверхностных, в том числе морских, грунтовых, питьевых, сточных вод, водных экстрактов почв, отходов, осадков сточных вод по изменению интенсивности бактериальной биолюминесценции тест-системой «Эколюм» ПНД Ф Т 14.1:2:3:4.11-04 (ПНД Ф Т 16.1:2.3:3.8-04).

Острое токсическое действие исследуемой пробы определяли по смертности инфузорий за сутки. Критерием острой токсичности исследуемой пробы с использованием инфузорий по условиям методики служит гибель 50 % и более особей за 24 часа.

Для оценки острой токсичности пробы рассчитывают процент погибших инфузорий ( $A$ , %) по формуле:

$$A = (X_t/X_i) 100,$$

где  $X_t$  – количество погибших особей инфузорий в тестируемой воде через 24 часа;  $X_i$  – количество исходных особей инфузорий.

Оценку токсичности с помощью бактериальной тест-системы «Эколюм» на приборе Биотокс-10М проводили по относительному различию в интенсивности биолюминесценции контрольной и опытной проб и вычислению индекса токсичности « $T$ ».

Индекс токсичности « $T$ » определяется по формуле:

$$T = ((I_0 - I)/I_0) \cdot 100,$$

где  $I_0$  и  $I$  – интенсивность свечения контроля и опыта при фиксированном времени экспозиции исследуемого раствора с тест-объектом, соответственно.

По величине индекса токсичности анализируемые пробы классифицируются на три группы: « $T$ » < 20 – допустимая степень токсичности, 20 ≤ « $T$ » < 50 – образец токсичен, « $T$ » ≥ 50 – образец сильно токсичен. Если регистрируется отрицательное значение индекса токсичности, то индекс принимается равным нулю.

Кроме того, была предпринята попытка оценить наличие питательных веществ, пригодных для развития микроорганизмов, хроматографическим методом по эмиссии диоксида углерода. Для этого к осадку приливали суспензию спор гриба *Aspergillus niger* (до достижения плотности спор гриба ~10<sup>6</sup> ед/г почвы) с целью определения возможного роста и развития биомассы гриба в почвенных образцах. Развитие гриба планировалось оценить по эмиссии CO<sub>2</sub> [2].

Количественный химический анализ (КХА) ряда элементов проводился методом ИСП (ИСП, масс-спектрометрия с индуктивно связанной плазмой), основанном на зависимости аналитического сигнала определяемого металла от его концентрации в растворе анализируемой пробы. Анализируемые растворы проб при помощи перистальтического насоса подавали в распылительную камеру масс-спектрометра, и в токе аргона образовавшаяся аэрозоль попадала в горелку, в которой происходила ионизация атомов. В данном методе источником возбужденных ионов служит аргоновая плазма, но каждый химический элемент имеет уникальный ряд стабильных изотопов, что позволяет точно идентифицировать присутствие данного элемента в пробе методом масс-спектрометрии. В этом случае после плазмы частицы проходят через систему электронных линз и квадрупольный масс-фильтр на масс-детектор.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Полученные результаты биотестирования на парамециях показали, что исследуемые образцы двух почв оказывают токсическое действие по отношению к стандартизованной тест-культуре инфузорий (летальность в контроле составляла 6.38 %), причем почвенный образец 4-Е проявил большее токсическое действие по сравнению с почвенным образцом 5-Е (рис. 1).

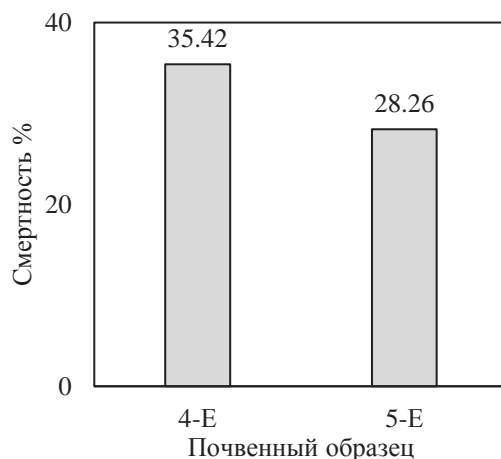


Рисунок 1. Оценка токсичности водного экстракта из почвенных образцов (1:4) по выживаемости тест-культуры инфузорий.

Результаты исследования токсичности почвенных образцов по интенсивности свечения тест-культуры генномодифицированного штамма *E. coli* представлены на рисунке 2.

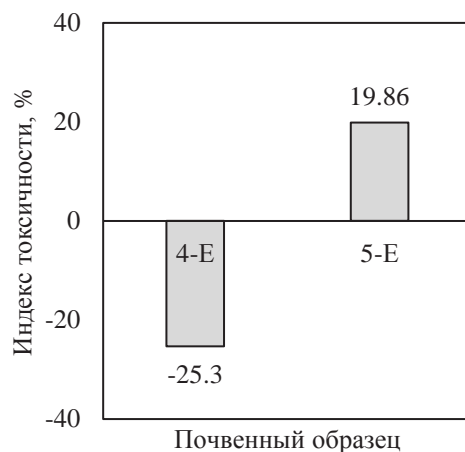


Рисунок 2. Оценка токсичности водных экстрактов почвенных образцов по интенсивности свечения люминесцентных бактерий (разведение 1:50).

Водный экстракт образца 5-Е несколько снижал интенсивность свечения пробы относительно контроля (бактериальная суспензия без добавки почвенной суспензии). «Т» для 5-Е соответствует допустимой степени токсичности. Водный экстракт почвенного образца 4-Е, напротив, существенно усиливал свечение пробы. Согласно условиям методики, результат можно было бы трактовать как стимуляцию роста бактерий, однако возникли некоторые сомнения не только в связи с выявлением токсичности, но и с выявлением высокого уровня содержания токсичных веществ (табл. 1), при котором нормальное развитие живых организмов маловероятно.

Из опыта работы с методикой на основе бактериальной биотест-системы «Эколюм», неоднократно отмечалось, что целый ряд почвенных компонентов и загрязняющих веществ, особенно содержащие ароматические соединения, нефтепродукты или гуминовые кислоты, вызывают повышение интенсивности свечения проб с люминофорами.

Таблица 1. Результаты химического анализа двух образцов погребенных почв (4-Е и 5-Е), полученные методом ICP (по данным к.б.н. М.М. Карпухина).

Образец почвы	Элементы и их содержание в почвенных образцах, мг/кг				
	Al	Si	P	S	K
4-Е	60959	355332	132.6	581.1	7571.3
5-Е	60117	350558	125.6	404.5	4278.8
	Ca	Ti	Cr	Mn	Fe
4-Е	10353.4	1209.9	106.64	114.4	14940
5-Е	7823.3	1307.9	109.32	89.1	20977
	Ni	Cu	Zn	As	Sr
4-Е	34.0	8.48	77.6	3.40	354.5
5-Е	36.6	8.85	87.9	1.06	175.3
	Ba	Pb	B	Cd	Co
4-Е	345.5	4.21	18.5	0.22	2.12
5-Е	150.8	3.57	11.2	0.14	2.12
	Li	Mg	Mo	Na	V
4-Е	4.78	8474	1.03	7737	8.76
5-Е	8.06	10268	1.59	3920	13.05

С целью выявления пригодности почвенных условий для развития микроорганизмов была проведена оценка жизнеспособности в эксперименте с интродукцией чистой культуры микромицета *Aspergillus niger* в исследуемые почвенные образцы. Оценка жизнеспособности гриба и возможность использования им почвенных питательных веществ, проводили по параметру «дыхания», т.е. эмиссии диоксида углерода газохроматографическим способом.

Определение эмиссии углекислого газа в образцах с внесенными спорами *A. niger* не показало накопления биомассы, т.е. не подтвердило развития спор и рост мицелия гриба, что говорит об отсутствии в почве элементов, достаточных для протекания процессов жизнедеятельности.

Таким образом, можно заключить, что исследованные образцы непригодны для развития живых организмов. При внесении суспензии спор микромицета аспергилла в почвенные образцы эмиссии CO<sub>2</sub> не наблюдалось, гриб не развивался, грибная биомасса не накапливалась, в образцах отсутствуют доступные для микроорганизмов источники углерода. Есть основания утверждать, что образцы обладают определенной токсичностью, что подтверждено при биотестировании на инфузориях, а окончательное заключение о токсичности по различающимся результатам нескольких тест-систем делается по наиболее жесткому критерию.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Терехова В.А., Гершкович Д.М., Гладкова М.М., Ипатова В.И., Исакова Е.Ф., Николаева О.В., Рахлеева А.А., Федосеева (Бандолина) Е.В. Биотестирование в экологическом контроле. Москва: ГЕОС, 2017, 70 с.
2. Anderson T.H., Domsch K.H. The metabolic quotient for CO<sub>2</sub> (qCO<sub>2</sub>) as a specific activity parameter to assess the effects of environmental conditions, such as pH, on the microbial biomass of forest soil. Germany, Soil Biology and Biochemistry, 1993, 25, (3). PP. 393–395.
3. Aparin B., Sukhacheva E., Grabovskiy A. The buried soils of the roof stratum of the late cretaceous fossil forest in eastern Chukotka / Cryosols in Perspective: A View from the Permafrost Heartland. Proceedings of the VII International Conference on Cryopedology. Yakutsk, 2017. PP. 11–12.

Работа рекомендована проф., д.б.н., заведующей лабораторией экотоксикологического анализа почв (ЛЭТАП) МГУ имени М.В. Ломоносова В.А. Тереховой.

# BIOLOGICAL ACTIVITY RESEARCH OF THE LATE CRETACEOUS PERIOD EASTERN CHUKOTKA FOSSIL FOREST ROOF STRATUM BURIED SOILS

E.A. Nazarenko<sup>1</sup>, M.R. Vasina<sup>1</sup>, M.M. Gladkova<sup>2</sup>, P.V. Uchanov<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Pirogov Russian National Research Medical University (RNRMU)

<sup>2</sup>Lomonosov Moscow State University

<sup>3</sup>Institute of Ecology and Evolution RAS

The research aims to identify the biological effects of buried soils from the Eastern Chukotka in laboratory biotests. Biotesting method on protozoans showed toxicity of the soil. The inhibitory effect on germination of spore micromycete *Aspergillus niger* has been established. Chemical analysis showed a large number of metals that are toxic to living systems.

*Keywords:* paleosols, bioactivity, bioassay, toxicity.

УДК 631.47:504.5

## МЕТОДИЧЕСКИЕ ПОДХОДЫ К УСТАНОВЛЕНИЮ НОРМАТИВОВ КАЧЕСТВА ПОЧВ НА ПРИМЕРЕ ТУЛЬСКОЙ ОБЛАСТИ

С.С. Огородников

Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова

В статье рассмотрены проблемы определения почвенного эталона для мониторинга и контроля за состоянием окружающей среды в свете выхода постановления Правительства ПП-149. Показано, что метод главных компонент может использоваться для установления значения нормативов качества почв по фондовым данным.

*Ключевые слова:* эталон почв, метод главных компонент

### ВВЕДЕНИЕ

Пункт 6 постановления Правительства РФ от 13 февраля 2019 г. N 149 устанавливает возможность определения нормативов для показателей природного фона на основе фактических данных наблюдений за состоянием окружающей среды, а также данных содержащихся в различных государственных фондах данных [5].

Наблюдения за состоянием окружающей среды для установления нормативов качества следует осуществлять на территории эталонного участка в пределах исследуемой территории, при этом желательно, чтобы он располагался на землях ООПТ.

При этом методика определения эталонного участка в настоящее время не разработана. В ПП-149 отсутствует механизм определения нормативов качества почв по данным из государственных фондов данных. Таким образом, с выходом данного постановления задача определения диапазона значений показателей химических и свойств почв эталона сравнения, установленного по фондовым данным, становится актуальной.

В настоящее время существует три основных подхода к определению эталона сравнения:

- выбор «фоновых» территории для каждого конкретного исследования;
- законодательно установленные показатели качества почвы, как компонента окружающей природной среды (ПДК, ОДК);
- региональные эталоны.

Тем не менее, методика выбора или определения эталона сравнения для целей нормирования качества почвы, как компонента окружающей природной среды, законодательно не утверждена. И.А. Соколов [7] отмечал важность разработки «центральных образцов почв», ко-

---

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-34-90131.

© С.С. Огородников, 2021

торые приобретают количественные характеристики, обусловленные особенностями регионального почвообразования».

Ученые начали разрабатывать подходы к определению эталонов почв ещё в прошлом веке. Д.С. Булгаков [1] сформулировал определение «Региональный эталон состояния плодородия почв». В рамках его подхода региональный эталон устанавливался на основе анализа почв в наиболее эффективных агрохозяйствах. Это был эмпирический диапазон показателей.

В настоящее время для установления региональных эталонов активно используется логико-математический метод [4]. Однако помимо рассмотренных подходов, для определения эталонов почв на наш взгляд можно использовать метод главных компонент.

## ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

По своей математической сути метод главных компонент позволяет уменьшить число переменных, выбрав из них самые близкие по степени связи и перейти к новым переменным. Метод позволяет перейти от реальной системы координат (например,  $a_1, a_2, \dots, a_i$ ) к новой системе координат ( $b_1, b_2, \dots, b_i$ ). Новые координаты называются главными компонентами (ГК). Новые координаты выбираются так, чтобы главная компонента имела максимальную дисперсию. Следующая главная компонента выбирается так, чтобы она имела максимальную дисперсию из всех оставшихся компонент и т.д. [2].

Сумма квадратов весов любой ГК должна равняться единице.

Особенность метода заключается в том, что новые переменные не коррелированы между собой (хотя исходные переменные могут быть коррелированы).

По мнению В.А. Рожкова [6] данный метод может использоваться для целей классификации почв. Опытным путем установлено, что «если первые две компоненты описывают около 70 % варьирования, разделение объектов на группы будет достаточно выраженным».

Рассмотрим возможность применения метода главных компонент на конкретном примере.

Исходные данные о почвенных свойствах взяты из Очерка почв совхоза «Тихий Дон» Куркинского района, Тульской области и рекомендации по их использованию [3].

На данной территории, в соответствии с классификацией почв 1977 года, согласно [3] выделяются следующие типы почв: дерновые почвы, черноземы (подтипы оподзоленный и выщелоченный), аллювиальные (дерновые) и лугово-болотные почвы.

Группирующей переменной являлось название почвы, а признаками, по которым проводился анализ, были: реакция среды (рН сол.), гидролитическая кислотность (Н), сумма поглощенных оснований по Каппену, степень насыщенности оснований (V), подвижный фосфор ( $P_2O_5$ ), обменный калий ( $K_2O$ ), содержание гумуса. Поскольку мониторинг почв чаще всего проводится только для верхней толщи глубиной 0–20 см, были взяты результаты, характеризующие поверхностный горизонт А1 или Апх.

Несмотря на то, что степень насыщенности оснований рассчитывается по данным значений гидролитической кислотности и суммы поглощенных оснований, мы можем использовать её как отдельную переменную, поскольку метод позволяет работать с коррелируемыми переменными.

Первые две компоненты описывают 67 % варьирования. Для того чтобы определить число главных компонент, необходимо построить «График каменистой осыпи» (рис. 1). На графике отображена последовательность собственных значений. Искомое число главных компонент определяется по собственному значению, начиная с которого график теряет свою кривизну и выходит на примерно постоянный уровень [2]. Число главных компонент отложено на оси X. В рассматриваемом случае максимальное различие наблюдается между первой и второй главной компонентой.



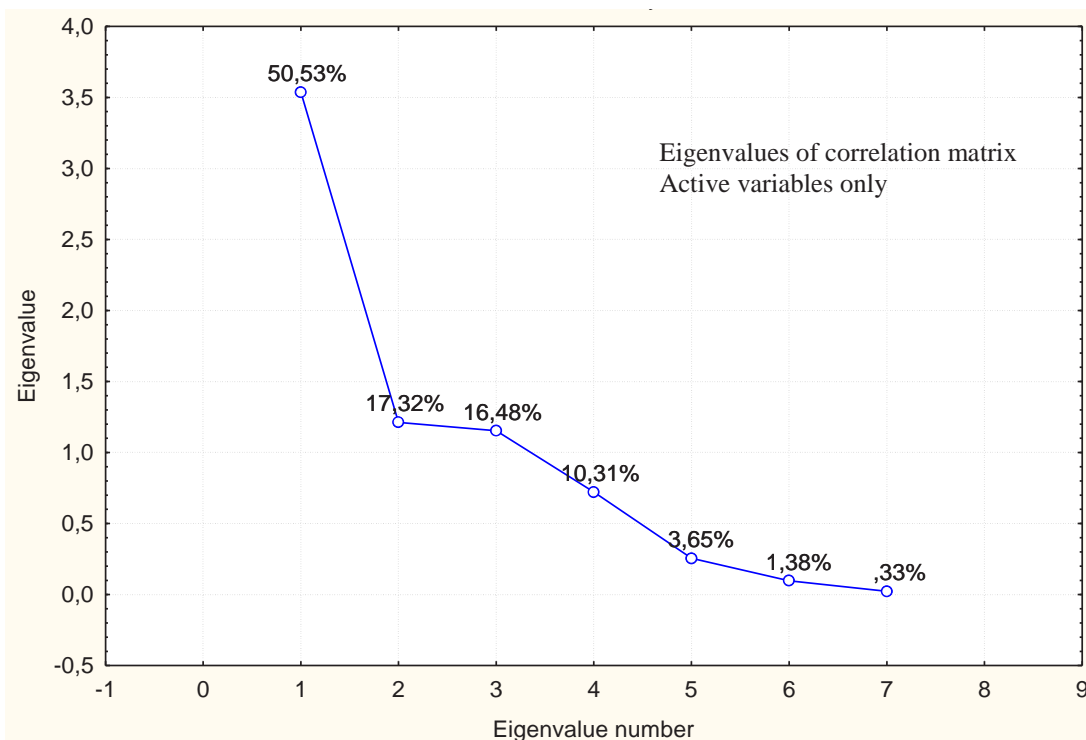


Рисунок 1. «График» каменной осыпи.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 2 показана проекция переменных на ось главных компонент. Чем ближе переменная расположена к красной окружности, тем лучше она воспроизводится в данной системе координат. На рисунке видно, что лучше всего выбранная система координат учитывает такие показатели как гидролитическая кислотность, сумма поглощенных оснований, степень насыщенности оснований. Значения рН и содержание гумуса также учитывается достаточно хорошо. Видно, что хуже всего система координат учитывает содержание подвижного фосфора и обменного калия.

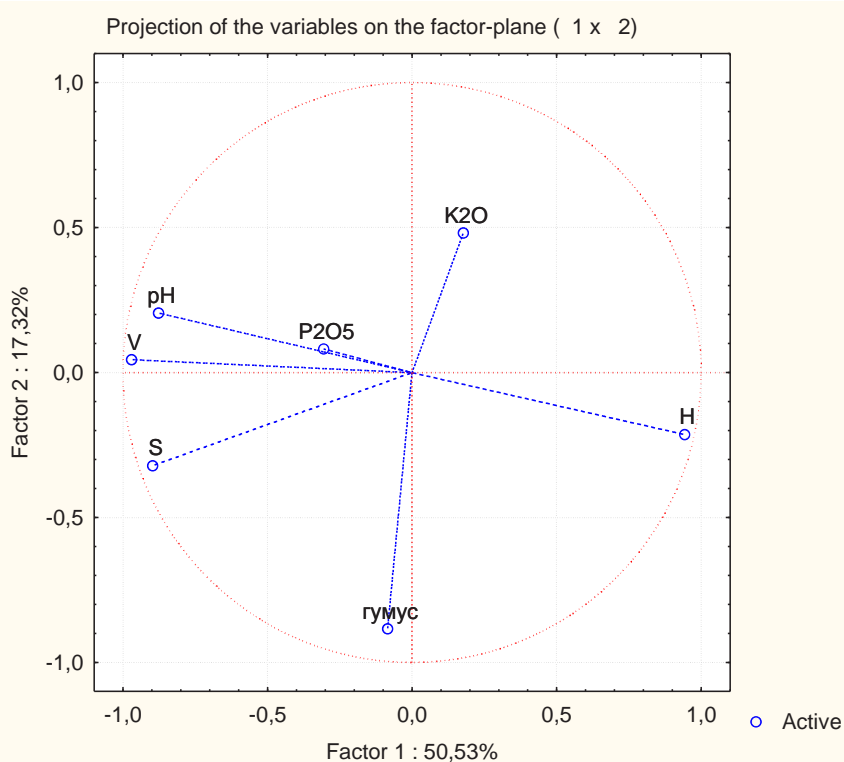


Рисунок 2. Проекция переменных на факторную плоскость.

На рис. 3 показана проекция наблюдений на факторную плоскость. Использование проекции позволяет определить насколько близко расположены образцы, относящиеся к одному и тому же типу почв, в факторном пространстве.

Видно, что лугово-болотная (Луг-бол) почва находится на некотором удалении от остальных почв. Черноземы выщелоченные малогумусные (ЧВ2) и черноземы оподзоленные расположены в верхней части графика, а черноземы выщелоченные ЧВ, тяготеют к центру графика. Большая часть дерновых почв находится в верхнем правом углу графика.

Полученные результаты показывают наличие закономерности расположения проб почв на факторной плоскости в зависимости от типа к которому они относятся.

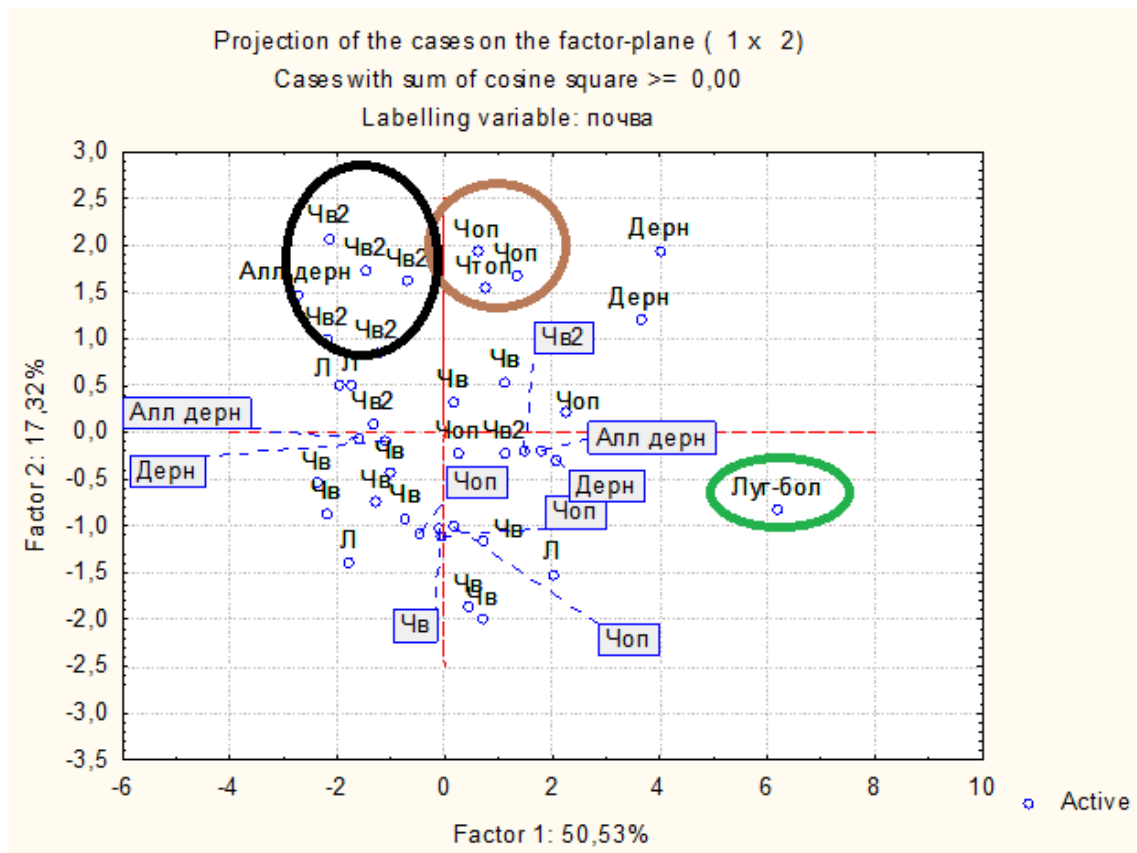


Рисунок 3. Проекция изучаемых почв на факторную плоскость.

## ВЫВОДЫ

Таким образом, для целей мониторинга метод главных компонент может использоваться двумя способами:

– Если по результатам измеренных характеристик новые мониторинговые точки не попадают в «облако точек» характерной для них таксономической группы, можно говорить об отклонении данной почвы от центрального образа.

– Значения физических и химических характеристик почв, составляющих «облако точек» могут являться граничными значениями, с которыми должны сравниваться новые результаты мониторинга.

Безусловно, для реализации такого подхода требуется намного большее количество данных. В данной работе показана возможность применения метода главных компонент для решения задачи выбора эталонов сравнения.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Булгаков Д.С. Методология агроэкологической оценки почв земледельческой территории дисс. ... д.с.-х.н., Москва, 1999. 428 с.

2. Мешалкина Ю.Л., Самсонова В.П. Математическая статистика в почвоведении: Практикум. М.: МАКСПресс, 2008. 84 с.
3. Очерк почвы совхоза «Тихий Дон» Куркинского района, Тульской области и рекомендации по их использованию. 1992. 87 с.
4. Пивоварова Е.Г., Кононцева Е.В., Хлуденцов Ж.Г., Аверьянова И.П. Математические модели региональных эталонов в агрохимическом мониторинге почв // Вестник Алтайского государственного Аграрного университета. № 8 (178). 2019. С. 54–62.
5. Постановление Правительства РФ от 13 февраля 2019 г. N 149 «О разработке, установлении и пересмотре нормативов качества окружающей среды для химических и физических показателей состояния окружающей среды, а также об утверждении нормативных документов в области охраны окружающей среды, устанавливающих технологические показатели наилучших доступных технологий» // СПС «Консультант Плюс».
6. Рожков В.А. Классификация почв – не место для дискуссий // Бюллетень Почвенного института им В.В. Докучаева. Вып. 72. 2013. С. 47–64.
7. Соколов И.А. Теоретические проблемы генетического почвоведения / И.А. Соколов. – Новосибирск, 2004. 296 с.

Работа рекомендована д.б.н., заслуженным профессором, зав. каф. «Земельных ресурсов и оценки почв» МГУ имени М.В. Ломоносова А.С. Яковлевым.

## METHODOLOGICAL APPROACHES TO SETTING SOIL QUALITY STANDARDS ON THE EXAMPLE OF THE TULA REGION

S.S. Ogorodnikov

Lomonosov Moscow State University

The article deals with the problems of determining the soil standard for monitoring and controlling the state of the environment in the light of the release of the Government decree PP-149. It is shown that the principal component method can be used to determine the value of soil quality standards based on stock data.

*Keywords:* benchmark, soil, method of main components

УДК 633.2:631.8

## ВЛИЯНИЕ МИКРОЭЛЕМЕНТОВ (Cu, Zn, Mn) НА РОСТ И РАЗВИТИЕ ГАЗОННЫХ ТРАВ

С.В. Огородникова

Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова

Статья посвящена влиянию удобрений и микроэлементов на рост и развитие газонных трав. Объектами исследования являются райграс пастбищный (*Lolium perenne*) и овсяница красная (*Festuca rubra*). Полученные результаты показывают, что внесение удобрений и микроэлементов в почву положительно влияет на развитие овсяницы красной и приводит к росту биомассы более, чем в 2 раза по сравнению с контролем. Внесение марганца под райграс пастбищный приводит к снижению его продуктивности в 2 раза по сравнению с контролем.

*Ключевые слова:* марганец, *Lolium perenne*, *Festuca rubra*.

### ВВЕДЕНИЕ

Газонные травы играют важную экологическую роль, очищают воздух, закрывают оголенную поверхность земли, предотвращая ее распыление, эрозию. В строящихся массивах городов в настоящее время проводится озеленение больших площадей с использованием газонных трав. Такие газоны должны иметь определенные качества: хорошую энергию прорастания, износоустойчивость, засухоустойчивость, теневыносливость и т. д. Известно, что при

закладке газона используются грунты на 70 % состоящие из торфа. Такие грунты, как правило, обеднены микроэлементами. На кафедре агрохимии и биохимии растений показано, что при выращивании газонных трав на таких грунтах растения страдают от недостатка микроэлементов [1, 4]. Микроэлементы выполняют важные функции в растениях, улучшая протекание физиолого-биохимических процессов. Поэтому важно изучить влияние микроэлементов на формирование травяного покрова, его качество и устойчивость в условиях мегаполиса. В литературе такие данные практически отсутствуют. Не установлено оптимальное содержание микроэлементов в газонных травах, не изучено влияние микроэлементов на основные показатели качества газонных трав.

## ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Объектами исследования являются райграс пастбищный (*Lolium perenne*) и овсяница красная (*Festuca rubra*).

Вегетационный опыт был заложен на базе вегетационного домика факультета Почвоведения МГУ в июне 2019 года. Использовались сосуды на 5 кг почвы. В каждый сосуд на высоту 10 см набивали почву, а затем грунт слоем 10 см, создавали систему конструктором по аналогии с принятой технологией закладки газонов в г. Москве. Для создания органогенного горизонта конструктора был использован навалый грунт (аналог сертификата «Московского Экологического Регистра» (МЭР), состав которого включал 30 % очищенного песка и 70 % низинного торфа

Схема вегетационного опыта включала следующие варианты: 1. Контроль (без добавления удобрений). 2. NPK. 3. NPK+Cu. 4. Cu. 5. NPK+Zn. 6. Zn. 7. NPK+Mn. 8. Mn.

9. NPK+Cu+Zn+Mn. 10. Cu+Zn+Mn. Повторность опыта – трехкратная.

Норма высева семян 20 г/м<sup>2</sup>. Используемое удобрение – нитроаммофоска (16:16:16) 0.1 г/кг почвы.

Микроэлементы вносили в форме сернокислых солей CuSO<sub>4</sub>·5(H<sub>2</sub>O), ZnSO<sub>4</sub>, MnSO<sub>4</sub>·5(H<sub>2</sub>O) в виде раствора в дозе 25 мг/кг почвы.

Первый учет биомассы (срезка) трав был проведен через 30 дней после появления всходов. Далее биомассу учитывали через каждые 20 дней в течение лета. Всего проведено 4 учета. Таким образом, для каждого варианта эксперимента получены результаты 12 взвешиваний свежей биомассы трав.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты учета зеленой массы Овсяницы красной свидетельствуют о том, что в контрольном варианте биомасса имеет самые низкие значения. Применение меди, цинка и марганца привело к достоверному увеличению биомассы по сравнению с контролем.

Наибольшее положительное влияние оказало внесение марганца. Общая биомасса в контроле за все укосы составила 12 г, в варианте с внесением марганца биомасса составила 23.6 г. Использование микроэлементов на фоне минеральных удобрений оказало существенное положительное влияние на биомассу овсяницы по сравнению с контролем и соответствующими вариантами применения микроэлементов без минеральных удобрений.

Средние значения биомассы, полученные для каждого укоса (табл. 1) показывают, что для всех вариантов максимальная биомасса была зафиксирована во втором укосе, при этом все варианты во втором укосе достоверно отличаются от контроля (НСР 2.1).

Применение меди и цинка не оказало существенного влияния на формирование биомассы райграса по сравнению с контролем. Внесение NPK, а также применение цинка и меди на их фоне привело к достоверному росту биомассы (табл. 2).

Внесение марганца, в том числе совместно с другими микроэлементами, приводило к снижению биомассы райграса. Применение минеральных удобрений в вариантах с марганцем не обеспечило повышения биомассы райграса по сравнению с контролем. При этом биомасса растений на этих вариантах была существенно ниже, чем на варианте NPK (табл. 2).

Таблица 1. Влияние элементов питания на сырую массу побегов овсяницы красной (*Festuca rubra*), г/сосуд.

Варианты	1 укос	2 укос	3 укос	4 укос	Общая масса побегов за 4 укоса
Контроль	1.2	4.7	3.2	2.9	12.0
Cu	1.0	7.4	5.0	4.2	17.6
Zn	1.7	8.4	4.4	5.1	19.6
Mn	1.6	10.4	5.1	6.0	23.1
Cu+Zn+Mn	1.3	9.9	6.1	5.6	22.9
NPK	1.3	9.4	5.1	5.4	21.2
NPK+Cu	1.7	10.2	5.5	6.0	23.4
NPK+Zn	1.9	12.4	9.1	7.1	30.5
NPK+Mn	2.6	14.1	7.9	8.4	33.0
NPK+Cu+Zn+Mn	2.0	11.9	8.8	7.0	29.7
НСП	0.4	2.1	2.7	1.0	5.8

Таблица 2. Влияние элементов питания на сырую массу побегов райграса пастбищного (*Lolium perenne*), г/сосуд.

Варианты	1 укос	2 укос	3 укос	4 укос	Общая масса побегов за 4 укоса
Контроль	14.5	11.1	9.0	7.5	42.1
Cu	12.9	10.1	8.9	7.6	39.5
Zn	12.0	8.8	10.1	8.4	39.3
Mn	8.8	5.5	3.1	1.8	19.2
Cu+Zn+Mn	5.2	5.9	3.6	2.2	16.9
NPK	18.7	13.0	12.3	10.5	54.5
NPK+Cu	14.7	14.8	17.3	11.1	57.9
NPK+Zn	15.3	12.6	14.7	10.9	53.5
NPK+Mn	11.3	7.4	8.7	5.1	32.5
NPK+Cu+Zn+Mn	9.7	9.1	9.8	6.2	34.8
НСП	3.6	1.8	3.2	2.1	5.5

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенное исследование показывает, что в целом внесение меди, цинка и марганца под Овсяницу красную (*Festuca rubra*) и меди и цинка под Райграс пастбищный (*Lolium perenne*) совместно с минеральными удобрениями привело к достоверному увеличению их биомассы по сравнению с контролем.

Влияние марганца на продуктивность исследуемых трав зависело от их биологических особенностей. Внесение в грунт марганца отдельно и на фоне NPK, позитивно влияло на развитие Овсяницы красной и приводило к росту биомассы более чем в 2 раза по сравнению с контролем. А его применение под Райграс пастбищный привело к снижению продуктивности в 2 раза по сравнению с контролем. Внесение NPK не сняло отрицательного влияния марганца на формирование биомассы райграса.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Госсе Д.Д., Панина М.А., Егоров В.С. Влияние гуминовых удобрений на рост и развитие газонных трав в условиях мегаполиса // Гуминовые вещества в биосфере: Материалы VII Всероссийской научной конференции с международным участием и III Международной научной школы «Методы оценки биологической активности гуминовых продуктов»; 4–8 декабря 2018, МАКС Пресс, тезисы, с. 130–131.
2. Доспехов Б.А. Методика полевого опыта (с основами статистической обработки результатов исследований). – 5-е изд., доп. и перераб. – М.: Агропромиздат, 1985. 351 с.
3. Мешалкина Ю.Л., Самсонова В.П. Математическая статистика в почвоведении: Практикум. – М.: МАКС Пресс, 2008. 84 с.

4. Шуришин К.А., Большева Т.Н. Эффективность минеральных удобрений при выращивании газонных трав на осушенных верховых торфяниках // Проблемы агрохимии и экологии. – № 3. – 2011. С. 30–35.

Работа рекомендована д.б.н., профессором В.С. Егоровым.

## INFLUENCE OF MICROELEMENTS (Cu, Zn, Mn) ON THE GROWTH AND DEVELOPMENT OF LAWN GRASSES

S.V. Ogorodnikova

Lomonosov Moscow State University

The article is devoted to the influence of fertilizers and trace elements on the growth and development of lawn grasses. The objects of research are *Lolium perenne* and *Festuca rubra*. The results show that the introduction of fertilizers and trace elements into the soil has a positive effect on the development of red Fescue and leads to the growth of biomass by more than 2 times compared to the control. Introduction of manganese under perennial Rye grass leads to a reduction of productivity in 2 times in comparison with the control.

*Keywords:* manganese, *Lolium perenne*, *Festuca rubra*.

УДК 631.4

## АРХИВЫ ЛЕСНЫХ ПОЖАРОВ В ПОЧВАХ КАРСТОВЫХ РАЙОНОВ АРХАНГЕЛЬСКОЙ ОБЛАСТИ

Д.Г. Петров, Н.С. Мергелов, Э.П. Зазовская

Институт географии РАН, Москва, Старомонетный переулок, д. 29, 119017

Карстовые воронки на севере Архангельской области представляют собой геоморфологические ловушки, малоизученные с точки зрения палеорекоkonструкций. Поэтому нами проводится изучение пирогенных горизонтов в почвах воронок. Абсолютный возраст углей коррелирует с крупнейшими пирогенными событиями голоцена. Откалиброванный по  $^{14}\text{C}$  возраст древесного угля из самых низких горизонтов составлял  $(10261 \pm 36) - (9778 \pm 75)$  cal BP лет; возраст древесного угля из самых молодых пирогенных горизонтов –  $(120 \pm 77) - (82 \pm 64)$  cal BP лет. Выяснено, что результаты датирования по  $^{14}\text{C}$  связаны с климатическими изменениями в голоцене.

*Ключевые слова:* абсолютный возраст, пирогенное событие, межпирогенные циклы, морфоны, пирогенные почвы.

### ВВЕДЕНИЕ

Вопросы, с которыми мы столкнулись в ходе изучения почвенных пирогенных архивов, касались, с одной стороны, сложности в интерпретации полученной информации об абсолютном возрасте пирогенных слоев разных карстовых воронок, с другой, сложных зависимостей между выявленной частотой пожаров в Пинежском районе Архангельской области и изменением климата в течение голоцена. В ходе работы удалось найти связь между особенностями воронок (глубиной, диаметром и, как следствие, началом образования) и возрастом пирогенных событий, а также тенденцию между колебаниями климата и количеством пожаров. Кроме того, было определено направление почвообразования в межпирогенные циклы.

Несмотря на то, что летописи пожара имеют два основных источника изучения – почвы и осадочные отложения, большинство работ посвящено именно последним [12, 15]. С расположением и возрастом углей, в пределах 22 тыс. лет, можно ознакомиться на сайте [17]. Скорее всего, это может быть связано со сложностью изучения абсолютного возраста пирогенных событий, записанных в почвах. Такая сложность обязана палимпсестовому типу почвенной па-

мяти, при которой чем больше событий происходило в почвенном профиле, тем сложнее в них разобраться, [4]. Из-за указанных выше сложностей, большинство почвоведов-исследователей опираются в своих работах на изучение специфических почвенных структур – морфонов. Это даёт высокую вероятность того, что все угли будут одного возраста. Примеры ученых, работающих, с определением возраста углей в России – А.П. Чевычелов в Восточной Сибири [5, 6, 7] и М.В. Бобровский на Европейской территории России [1, 9] Для определения возраста пирогенных событий, карстовые воронки являются очень удобным объектом исследования, так как имеют четко определяемые морфоны в виде углистых горизонтов.

Кроме определения абсолютного возраста, представляется важным изучение морфологии макроугля под микроскопом. Эта процедура, проведенная с использованием антракологического атласа, раскроет анатомические особенности сгоревшей растительности и поможет определить её видовой состав, что можно использовать в палеореконструкциях [15]. Важным в этом отношении представляется нахождение зависимости температуры пожара от отражающей способности углей, что даст возможность раскрыть интенсивность горения в прошлом [11].

Конец пожара сопровождается интенсивной эрозией, которая ведет к погребению почвенного и органического материала в местах аккумуляции [8, 13]. В период между суровыми пожарами, называемый межпирогенным циклом, начинается образование новой почвы [10]. Направление почвообразования между пирогенными событиями тоже является важным источником палеоинформации. Макроугли (около 1 см) часто используются для анализа интервалов между пожарами и установления абсолютного возраста пирогенных событий, с помощью радиоуглеродного анализа по  $^{14}\text{C}$ .

Мы предполагаем, что подробное изучение пирогенного архива Архангельской области может помочь в уточнении палеореконструкций.

## ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Район исследований расположен в 110 км к востоку от г. Архангельска, поблизости от Пинежского заповедника, на левом берегу р. Кулой. Широкое распространение карста на данной территории обуславливает некоторые особенности рельефа и почвенного покрова. Климат территории умеренно континентальный влажный. В районе холодная зима, короткое лето. Средняя температура января от  $-12\text{ }^{\circ}\text{C}$  на юго-западе Архангельской области до  $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$  на северо-востоке. Средние температуры июля от  $16\text{--}18\text{ }^{\circ}\text{C}$  на юге до  $8\text{--}10\text{ }^{\circ}\text{C}$  на севере.

Растительный покров в местах заложения разрезов представлен ельником кустарничково-зеленомошным. В выбранном регионе основу древесного яруса составляет ель сибирская *Picea obovata*. Встречается примесь сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris*). Кустарничковый покров образует в основном черника (*Vaccinium myrtillus*) и брусника (*Vaccinium vitis-idaea*). В мохово-лишайниковом покрове доминирует зеленмошник (*Pleurozium schreberi* и др.), встречаются редкие пятна лишайника – кладонии альпийской (*Cladonia alpestris*) [3].



Рисунок 1. Показан район исследований и типичный участок территории, подверженной влиянию гипсового карста.

Нами было заложено три почвенных разреза на расстоянии 300–400 метров друг от друга с координатами соответственно N:  $64^{\circ}44'47''$ ; E:  $43^{\circ}23'10''$ , N:  $64^{\circ}44'51''$ ; E:  $43^{\circ}23'12''$  и N:  $64^{\circ}44'49''$ ; E:  $43^{\circ}23'11''$ . Разрезы были приурочены к карстовым воронкам округлой формы различной глубины (от 1 до 4–5 м). Почвы были представлены подзолами иллювиально-

гумусово-железистыми на гипсовом карсте с разной мощностью элювиального горизонта (Классификация и диагностика почв России, 2004).

Для заложения разрезов были выбраны карстовые воронки разной морфологии (рис. 2). В первом разрезе (N: 64°44'47"; E: 43°23'10") был осуществлен отбор образцов со всех стенок каждые 10 см. В остальных разрезах были отобраны пирогенные горизонты и почвенный материал между ними.

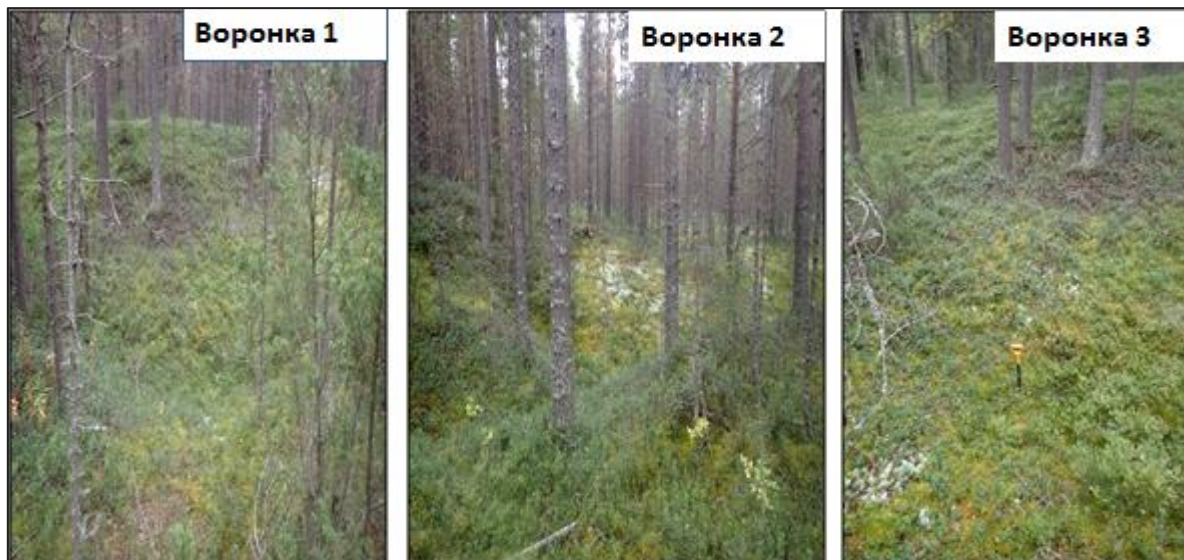


Рисунок 2. Воронки, выбранные в качестве мест объектов исследования

Было проведено полное морфологическое описание профилей почв. Для отдельных погребенных горизонтов при помощи 14С ускорительной масс-спектрометрии был определен радиоуглеродный возраст древесных углей размером от 1–2 мм до 1 см (Работы выполнены в ЦКП «Лаборатория радиоуглеродного датирования и электронной микроскопии» Института географии РАН). Использована программа OxCal для калибровки радиоуглеродного возраста [18].

### РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Как показано на рис. 3, был определен возраст и количество пирогенных событий в объектах исследования.



Рисунок 3. Абсолютный возраст пирогенных горизонтов в объектах исследования. Римскими числами отмечен порядок пирогенного события в профиле (данные о возрасте предоставлены Зазовской Э.П.). Для каждого разреза последовательность пирогенных событий посчитана отдельно.



Возраст пожаров совмещен со схемой температуры в течение голоцена по Климанову, (рис. 4).

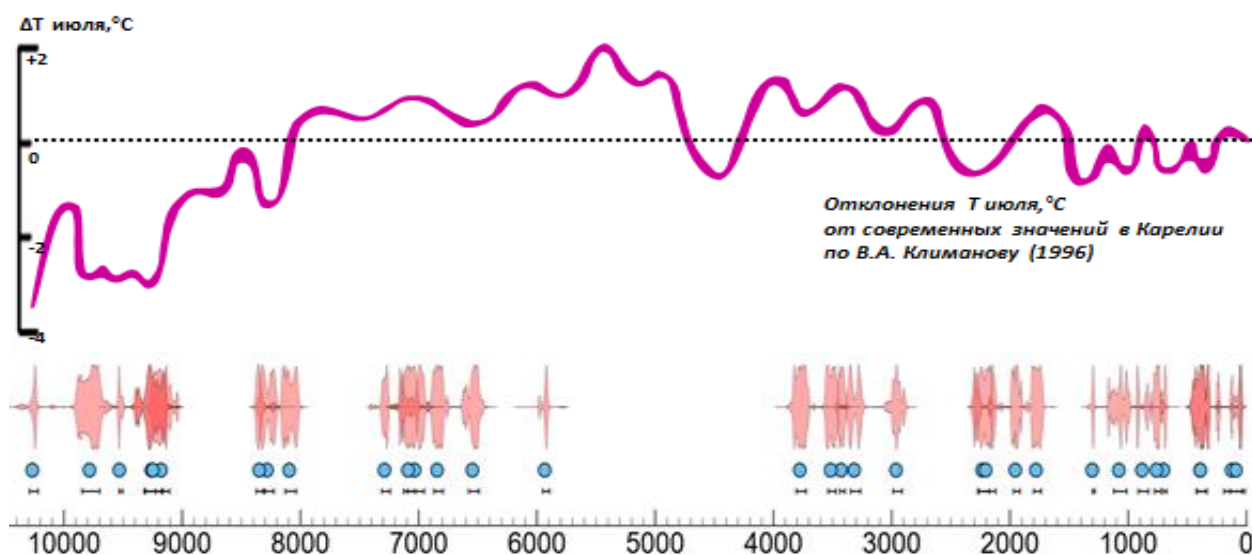


Рисунок 4. Распределение интервалов калиброванного по  $^{14}\text{C}$  возраста (cal BP) углистых частиц в пяти комплементарных пирогенно-почвенных архивах (материал предоставлен Н.С. Мергеловым).

Калиброванный возраст углей из самого нижнего горизонта в первом разрезе составил  $10261 \pm 36$  cal BP, а углистый материал верхнего из пирогенных горизонтов имел возраст  $385 \pm 18$  cal BP (рис. 3). Профиль второго разреза был описан в более молодой воронке с крутыми склонами. Калиброванный возраст углей из самого нижнего горизонта составил  $1949 \pm 27$  cal BP, а самого верхнего  $120 \pm 77$  cal BP. Третий разрез имел наименьший возраст верхнего горизонта  $82 \pm 24$  cal BP и промежуточное значение нижнего  $3771 \pm 42$  cal BP.

Таким образом, можно заметить, что самая глубокая воронка (рис. 2), как оказалось, имеет и наименьший возраст последнего пожара, соответствующего цифре V, что соответствует и нашим представлениям об её возрасте. Можно сделать предположение, что более древние воронки носят в себе следы большего количества пирогенных событий, но в ходе вывалов деревьев, динамики карста и естественных процессов миграции происходит полное или частичное уничтожение читаемых следов более ранних пирогенных событий.

На рисунке 4 мы можем видеть большой пробел в динамике пирогенных событий между 4000 и 5700 лет назад. По температурной кривой Климанова В.А. видно, что в это время происходило снижение температуры июля. Заметно, что всплеск пожаров соответствует положительным колебаниям температуры.

## ВЫВОДЫ

Карстовые воронки просадочного происхождения и формирующиеся в них почвы являются источником информации о локальных лесных пожарах, происходивших на протяжении почти всего голоцена.

На севере Архангельской области почвообразование в межпирогенные стадии сохраняло единое направление на протяжении как минимум 10 тысяч лет – профили подзолов регулярно реплицировались.

Во всех изученных пирогенно-почвенных архивах отсутствовали маркеры пожарной активности в интервале 5700–4000 cal BP, что может быть связано как с плохой сохранностью архивов именно для этого периода, так и с реальным снижением числа пожаров.

На изучаемой территории происходили пожары разной длительности и интенсивности, что выражено в различной мощности пирогенных горизонтов и количестве углей в них.

В исследуемых разрезах не всегда сохранялось последовательное увеличение возраста углей с глубиной, что обусловлено, вероятно, нефронтальным действием карстовых процессов и вывалами после пожаров предыдущих лет.

Выражаю благодарность С.В. Горячкину, Н.С. Мергелову и Э.П. Зазовской за помощь в выполнении работы.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. *Бобровский М.В.* Лесные почвы Европейской части России: биотические и антропогенные факторы формирования. М.: Товарищество научных изданий КМК. 2010. 481 с.
2. *Классификация и диагностика почв России* / Авторы и сост. Шишов Л.Л., Тонконогов В.Д., Лебедева И.И., Герасимова М.И. Смоленск, Ойкумена, 2004. 342 с.
3. *Горячкин С.В., Пучнина Л.В., Рыков А.М., Рыкова С.Ю., Сивков А.В., Шаврина Е.В.* Биогеографическая характеристика природного комплекса Пинежского заповедника (Архангельская область) // Природное и историко-культурное наследие Северо-Запада России. Петрозаводск. 2000. С. 79–127.
4. *Таргульян В.О.* Теория педогенеза и эволюции почв. М.: ГЕОС, 2019. 296 с.
5. *Чевычелов А.П.* География, состав и свойства пирогенно-трансформированных мерзлотных почв Якутии // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований, 2013. 8. С. 193–196.
6. *Чевычелов А.П.* Пирогенез и горно-таежное континентальное гумидное автоморфное почвообразование на северо-востоке Азии (на примере Южной Якутии). Дисс... канд. биологических наук: 03.00.27. Новосибирск: СО РАН. 1997.
7. *Чевычелов А.П., Шахматова Е.Ю.* Постпирогенные полициклические почвы в лесах Якутии и Забайкалья // Почвоведение, 2018. № 2. С. 243–252. doi: 10.7868/s0032180x18020120
8. *Abney R.B., Berhe A.A.* Pyrogenic carbon erosion: implications for stock and persistence of pyrogenic carbon in soil // *Frontiers in Earth Science*, 2018. Vol. 6 № 26. pp. 1–16. doi: 10.3389/feart.2018.00026
9. *Bobrovsky M.V., Kupriaynov D.A., Khanina L.G.* Anthracological and morphological analysis of soils for the reconstruction of the forest ecosystem history (Meshchera Lowlands, Russia) // *Quaternary International*. 2018. pp. 1–13. doi: 10.1016/j.quaint.2018.06.033
10. *Certini G.* Effects of fire on properties of forest soils: a review // *Oecologia*, 2005. 143(1). P. 1–10. doi: 10.1007/s00442-004-1788-8.
11. *Jones T.P., Scott A.C., Cope M.* Reflectance measurements against temperature of formation for modern charcoals and their implications for the study of fusain // *Bulletin de la Société Géologique de France*, 1991. № 162. pp. 193–200.
12. *Marlon J.R., Kelly R., Daniau A.L., Vannièrè B., Power M.J., Bartlein P. & Feurdean A., Graciela G.R., Virginia I., Yoshi M.S., Brian M., Colin J. Courtney M., Tonishtan Z.* Reconstructions of biomass burning from sediment charcoal records to improve data-model comparisons // *Biogeosciences (BG)*, 2016. № 13. pp. 3225–3244. doi:10.5194/bg-13-3225-2016.
13. *Robin V., Nelle O.* Contribution to the reconstruction of central European fire history, based on the soil charcoal analysis of study sites in northern and central Germany // *Vegetation history and archaeobotany*, 2014. 23(1). P. 51–65. doi: 10.1007/s00334-014-0438-2.
14. *Shakesby R.A., Doerr S.H.* Wildfire as a hydrological and geomorphological agent // *Earth-Science Reviews*, 2006. 74. pp. 269–307. doi: 10.1016/j.earscirev.2005.10.006
15. *Scott A.C., Jones T.P.* Microscopical observations of recent and fossil charcoal // *Microscopy and Analysis*, 1991. 25. P. 13–15.
16. *Talon B.* Reconstruction of Holocene high-altitude vegetation cover in the French southern Alps: evidence from soil charcoal // *The Holocene*, 2010. Vol. 20 № 1. pp. 35–44. doi: 10.1177/0959683609348842
17. *International Paleofire Network* [Электронный ресурс] [www.paleofire.org](http://www.paleofire.org) (дата обращения: 28.04.2019).

18. *OxCal* [Электронный ресурс] <https://c14.arch.ox.ac.uk/oxcal.html> (дата обращения: 28.04.2020).

Работа рекомендована д.г.н., зав. отд. «Географии и эволюции почв» С.В. Горячкиным.

## ARCHIVES OF FOREST FIRES IN THE SOILS OF THE KARST AREAS OF THE ARKHANGELSK REGION

Petrov D. G., Mergelov N. S., Zazovskaya E.P.

Institute of Geography, Russian Academy of Sciences, Moscow, Staromonetny lane, 29, 119017

Karst funnels in the north of the Arkhangelsk region are geomorphological traps, poorly understood from the point of view of paleoreconstructions. Because, we study pyrogenic horizons in the soils of funnels. The data correlate with the largest Holocene pyrogenic events. The calibrated  $^{14}\text{C}$  age of charcoal from the lowest horizons was  $(10261\pm 36) - (9778\pm 75)$  cal. years old; the age of charcoal from the youngest pyrogenic horizons is  $(120\pm 77) - (82\pm 64)$  cal. years. It was found that the results of  $^{14}\text{C}$  dating are associated with climatic changes in the Holocene.

УДК 631.4

## БИОЛОГИЧЕСКАЯ АКТИВНОСТЬ КУЛЬТУРНОГО СЛОЯ АРХЕОЛОГИЧЕСКОГО ПАМЯТНИКА ЭПОХИ БРОНЗЫ КСИЗОВО-1 (XXII–XXIV ВВ. ДО Н.Э.)

А.В. Потапова, Н.Н. Каширская

ФИЦ ПНЦБИ РАН

В работе представлены результаты исследования модельного участка поселения Ксизово-1 среднедонской катакомбной культуры (XXIV–XXIII вв. до н.э.) в лесостепной зоне. Объект исследования расположен в Задонском районе Липецкой области на размываемом крае первой террасы левого берега р. Снова (правый приток р. Дон). Задачей исследования была оценка варьирования химических и микробиологических характеристик культурного слоя в отдельных слоях толщиной 10 см, по всей площади раскопа. Источник поступления фосфора и способы его поступления в культурный слой не установлены. В связи с этим, фосфаты в культурном слое могут иметь как биологическую природу, при накоплении остатков пищи и других органических субстратов, так и минеральную, при поступлении в культурный слой с костями и золой. Поэтому в отобранных образцах было принято решение определять отдельные формы органических и минеральных фосфатов, а также оценку фосфатазной активности. Выполнена статистическая обработка результатов. Сравнение полученных данных с распределением археологических объектов и находок на территории раскопа позволило установить особенности химических и биологических свойств культурного слоя, соответствующего основному периоду функционирования поселения и финалу существования поселения. Установлено, что в период функционирования памятника имело место подкисление почвы, снижение биологической активности и резкое увеличение поступления в почву фосфора, в первую очередь за счет минеральных форм фосфатов – золы и костей. В период запустения поселения увеличивалась доля органических фосфатов за счет активизации всех биологических процессов на месте расположения памятника. В пласте, подстилающем культурный слой, антропогенный след проявлялся только в области очагов, где было зафиксировано поступление в почву фосфатов, как биологической, так и минеральной природы.

*Ключевые слова:* культурный слой, поселение, эпоха бронзы, среднедонская катакомбная культура, фосфор, фосфатазная активность.

---

Работа выполнена в рамках Госзадания № АААА-А18-118013190175-5 «Развитие почв в условиях меняющегося климата и антропогенных воздействий».

Микробиологические исследования выполнены за счет средств гранта РФФИ 17-29-04257 офи\_м «Археологическая микробиология: теория и практика выявления исходного присутствия органических материалов в археологических исследованиях».

© А.В. Потапова, Н.Н. Каширская, 2021

## ВВЕДЕНИЕ

Культурные слои древних поселений относятся к основным объектам археологических исследований. При исследовании процессов, происходящих в почвенной толще, при изучении археологических памятников и культурных слоев целесообразно понятие «археологическое вещество». В состав археологического вещества входят фрагменты разных размеров, образовавшиеся при разрушении керамики, строительных и других материалов, костей, орудий и отдельных мелких предметов прошлых эпох. Археологический материал приуроченный к определенным поверхностям (в том числе и погребенным) и местоположениям, в дальнейшем перераспределяется в почвенной толще под воздействием различных процессов. К таким процессам относятся денудация, эрозия, аккумуляция, формирование эрозионной сети, крип-, зоо-, фито-, крио-, ксеротурбация и другие. Перемещение археологического материала в глубь почвенного профиля можно объяснить следующими процессами: засыпанием по трещинам, биотурбационным погружением в результате деятельности дождевых червей и других беспозвоночных. Из нижней части культурного слоя археологический материал может попадать в подстилающие слои [2], материал может перемещаться во время весеннего оттаивания втапываться в нижние слои почвы и переноситься грызунами и другими животными.

Культурный слой поселений очень неоднороден. Наиболее полную информацию об этих объектах можно получить, проанализировав образцы, отобранные с каждого квадратного метра на одном уровне зачистки. Изменение химических и биологических свойств в плане (с каждого квадратного метра, которого отбирались почвенные образцы) и профиле площадки раскопок позволяет определить горизонт, связанный с периодом активного функционирования населенного пункта.

Фосфор является уникальным среди элементов в качестве чувствительного и постоянного индикатора человеческой деятельности. Он давно представляет интерес для археологов, благодаря способности информировать их о наличии прошлой человеческой деятельности, и предлагать подсказки относительно ее типа и интенсивности [4]. Обогащение культурного слоя фосфатами может быть в сотни раз больше по сравнению с фоном [5]. Фосфатные методы используются для определения размеров и границ населенных пунктов. Кроме того, эти методы могут быть использованы для выявления областей определенных видов антропогенной деятельности в пределах населенного пункта [4, 6, 7].

Культурный слой может содержать как фосфаты биологического происхождения (из-за накопления остатков пищи, бытовых отходов, экскрементов и других органических субстратов), так и минеральные фосфаты (из-за попадания костей и золы в культурный слой). Поэтому необходимы методы раздельного определения органического и неорганического фосфора [8]. В дополнение к отдельной оценке содержания биологических и минеральных форм фосфора, может быть предложен метод оценки фосфатазной активности культурного слоя. Фосфатазы катализируют гидролиз сложных эфиров и ангидридов фосфорной кислоты, которые содержатся в растительных и животных материалах. Эти ферменты обладают широкой специфичностью и повсюду присутствуют в почвах [9] и культурных слоях [10].

Целью данной работы было выявление слоев, связанных с периодом активного функционирования поселения бронзового века, по содержанию органических и минеральных форм фосфора и фосфатазной активности.

## ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Поселение Ксисово-1 расположено в Липецкой области на пойменной террасе левого берега реки Сновы вблизи ее впадения в Дон. В геоморфологическом отношении территория представляет собой часть Окско-Донской низменности. Климат умеренно континентальный, с четко выраженными сезонами. Почвенный покров включает черноземы и серые лесные почвы.

В настоящее время продолжают археологические работы, начатые в 2014 году, в ходе раскопок была вскрыта площадь более 400 м<sup>2</sup>. Остатки поселения сохранились за счет аллювиальных отложений, накопление которых происходило в течение последних лет. Эти отло-

жения образовались под воздействием аллювиальных отложений и эрозии вследствие интенсивной вспашки второй надпойменной террасы, у подножия которой расположено поселение. Слой отложений подстилается древним погребенным черноземом (I–II вв. н.э.).

Отбор почвенных образцов производился из пяти точек каждого квадратного метра в одной плоскости, на каждом уровне зачистки. Отбор почвенных образцов проводился на четырех уровнях зачистки, в слоях толщиной 10 см. В верхнем слое, расположенном на глубине 2 м под аллювиальными отложениями и погребенным черноземом, археологические находки были редки. В следующем слое отдельные фрагменты керамики и костей животных наблюдались чаще. В третьем слое было найдено много археологических артефактов, а также скопления кухонного и бытового мусора в районе очагов. Среди археологических находок встречались кремниевые отщепы, развалы сосудов и фрагменты керамики, кости животных. В самом глубоком, четвертом слое, археологический материал был обнаружен только в южной части раскопа и встречался крайне редко.

Содержание органических и минеральных фосфатов оценивали по методу Сандерса и Уильямса [8]. Активность фосфатазы определяли с помощью метода Галстяна – Арутюнян [11]. Полученные данные были обработаны с использованием метода главных компонент в программе «Статистика».

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Содержание валового фосфора является наиболее информативной характеристикой культурного слоя. Традиционно фосфатный метод используется археологами для решения вопросов установления границ археологических памятников, выявления их инфраструктурных признаков и реконструкции интенсивности использования территории [4]. Однако природа фосфора и способы его поступления в культурный слой остаются неизвестными. В связи с этим, фосфаты в культурном слое могут иметь как биологическую природу, при накоплении остатков пищи и других органических субстратов, так и минеральную, при поступлении в культурный слой с костями и золой. Поэтому в данном исследовании мы определяли отдельно органический и минеральный фосфор.

На рис. 1 представлены результаты определения органического фосфора по уровням зачистки и отбора образцов. Напомним, что органический фосфор связан с поступлением в почву органических материалов – продуктов питания, бытовых отходов и т.д. Первый и второй уровень показали наиболее высокие значения органического фосфора. Третий и четвертый уровни в целом характеризовались низкими величинами данного показателя. В нижней части третьего и четвертого уровней была выявлена небольшая фосфатная аномалия, которая фиксировалась по месту обнаружения мелкого прокала и концентрации керамики. Наличие аномалии может указывать на использование данного участка для приготовления пищи, вследствие чего в почву поступало большое количество продуктов белковой и жировой природы. В целом, на соответствующих уровнях фиксации, ареалы повышенных значений органического фосфора совпадают с ареалами концентрации кухонно-бытовых остатков.

Иная ситуация складывается при определении содержания минерального фосфора (рис. 2). Если в случае с органическим фосфором наибольшие значения были отмечены на первом и втором уровнях, то в случае с минеральным фосфором максимальные его величины фиксировались на третьем уровне. В образцах первого и четвертого уровней высокие значения минеральных форм фосфора не были зафиксированы. На втором и третьем уровнях ареал повышенных значений перекрывал зону скопления кухонно-бытовых остатков в южной части раскопа. Аномально высокие значения минерального фосфора сохранялись на третьем уровне в местах с резкими включениями мелкого прокала, угольков и керамики. Таким образом, почва поселения во время его существования обогащалась преимущественно минеральным фосфором.

Наиболее высокое содержание валового фосфора (рис. 3) было зафиксировано в образцах второго и третьего уровней зачистки. Основной вклад в увеличение содержания валового фосфора вносят его минеральные формы – в первую очередь, это зола и костные остатки. Аномально высокие значения минерального фосфора прослеживались только в районе про-

калов очагов в южной части раскопа. Напомним, что валовый фосфор складывается из значений минеральных и органических форм фосфатов. В целом, содержание валового фосфора менее информативно, чем содержание минеральных и органических фосфатов. Поэтому раздельное определение органического и минерального фосфора позволяет более детально выявлять особенности функционирования памятников.

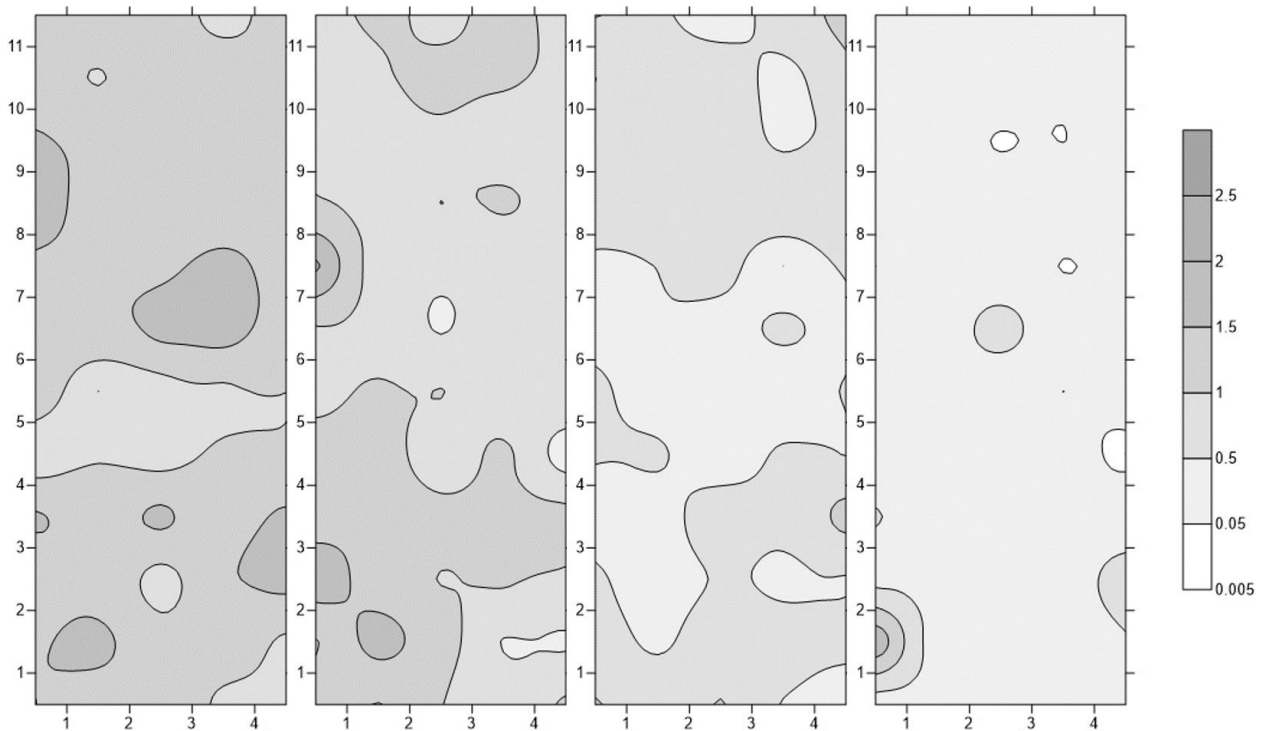


Рисунок 1. Распределение органического фосфора по уровням отбора образцов, мг  $P_2O_5$ /г почвы.

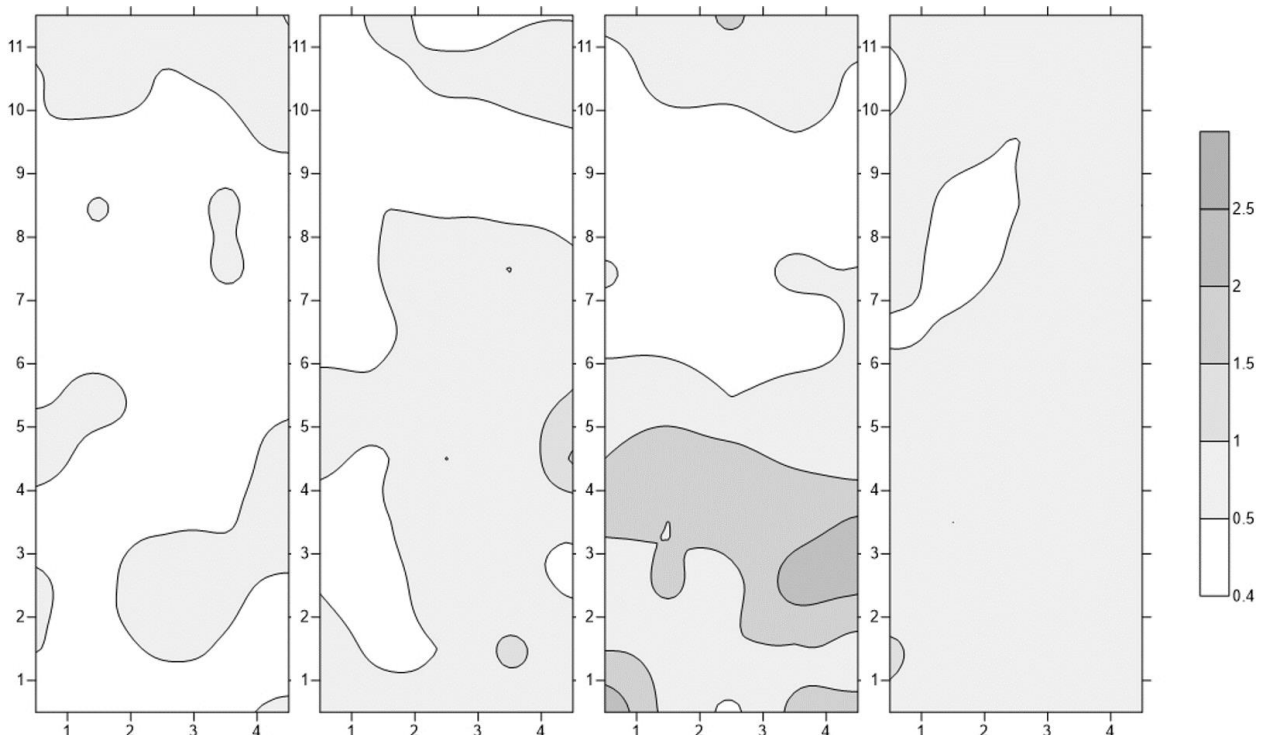


Рисунок 2. Распределение минерального фосфора по уровням отбора образцов, мг  $P_2O_5$ /г почвы.

Данные, представленные на рис. 4 и 5, получены в программе Statistica с помощью метода главных компонент. Верхний пласт, затронутый современным почвообразованием, которое привело к формированию чернозема, впоследствии погребенного под аллювиальными

отложениями, представлен на факторной плоскости в виде компактной группы, за счет высоких значений органического фосфора и фосфатазной активности, которые показывали положительную корреляцию с коэффициентом 0.79. Во втором пласте увеличивается степень разброса данных; для ряда наблюдений преимущественное значение приобретает содержание минерального фосфора, увеличение которого смещает факторные координаты в отрицательную область по обеим осям. В пласте 3, соответствующем основному периоду функционирования поселения, эта тенденция заметно усиливается. В пласте 2 (период запустения) отмечается более высокая доля органических фосфатов по сравнению с пластом 3, за счет уменьшения антропогенной нагрузки и активизации биологических процессов. Наиболее глубокий пласт характеризуется плотной группировкой данных, вследствие предельно низких значений фосфатазной активности и органического фосфора. Здесь антропогенный след проявляется только в области очагов, где фиксируется поступление в почву фосфатов, как биологической, так и минеральной природы.

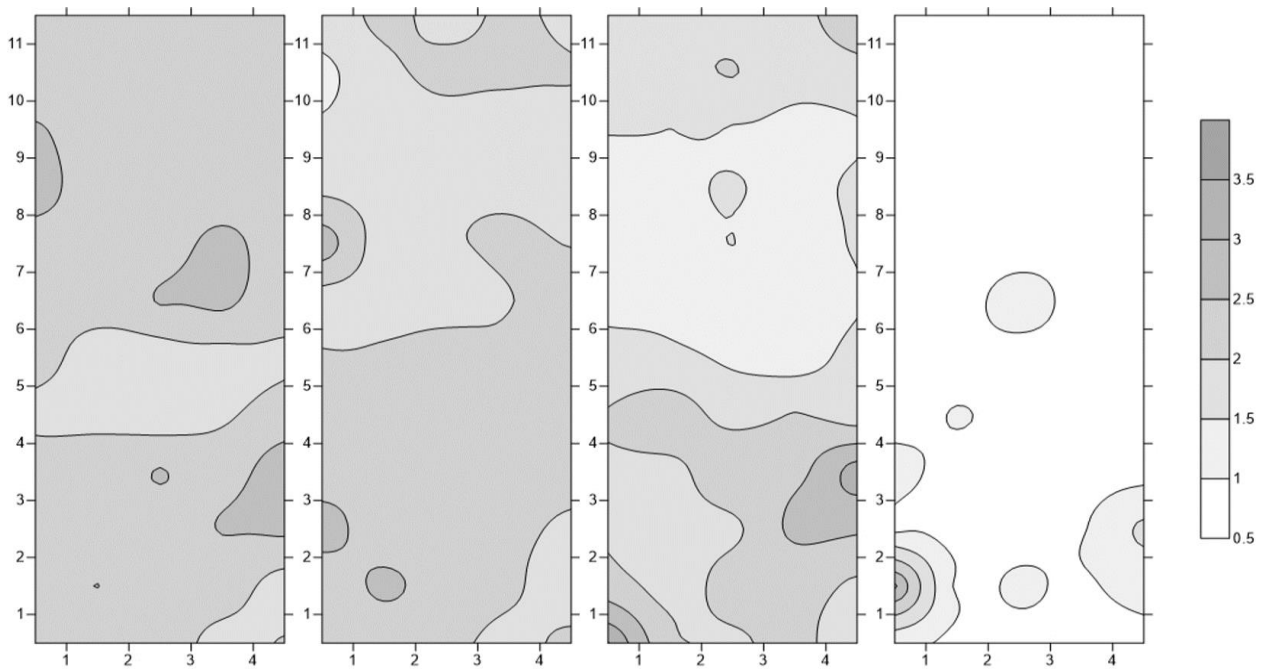


Рисунок 3. Распределение валового фосфора по уровням отбора образцов, мг  $P_2O_5$ /г почвы.

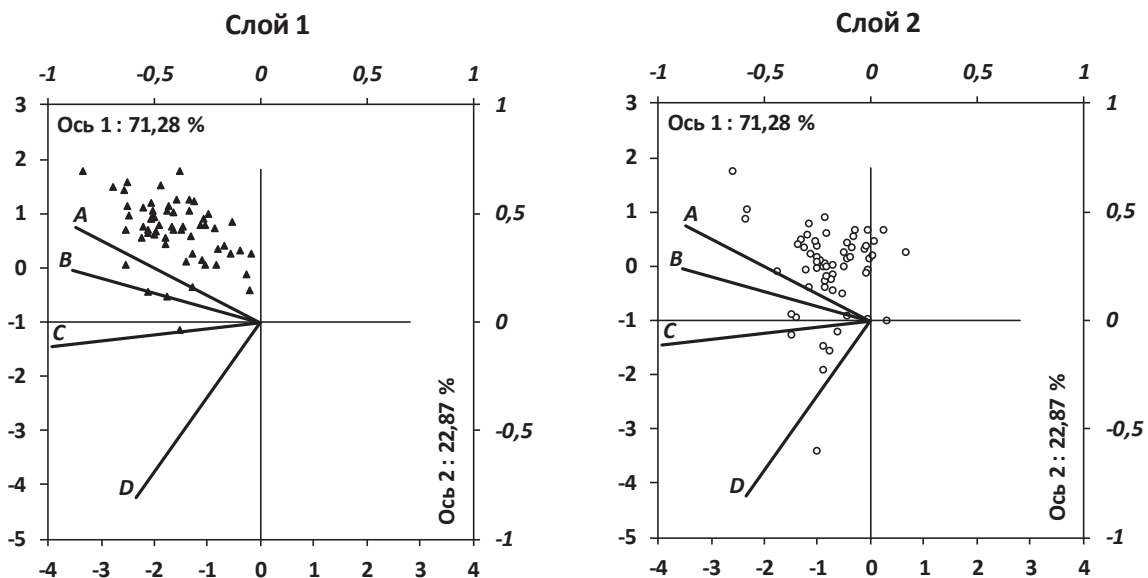


Рисунок 4. Статистическая характеристика культурных слоев 1 и 2 поселения Ксизово-1. Обозначения см. в примечаниях к рис. 5.

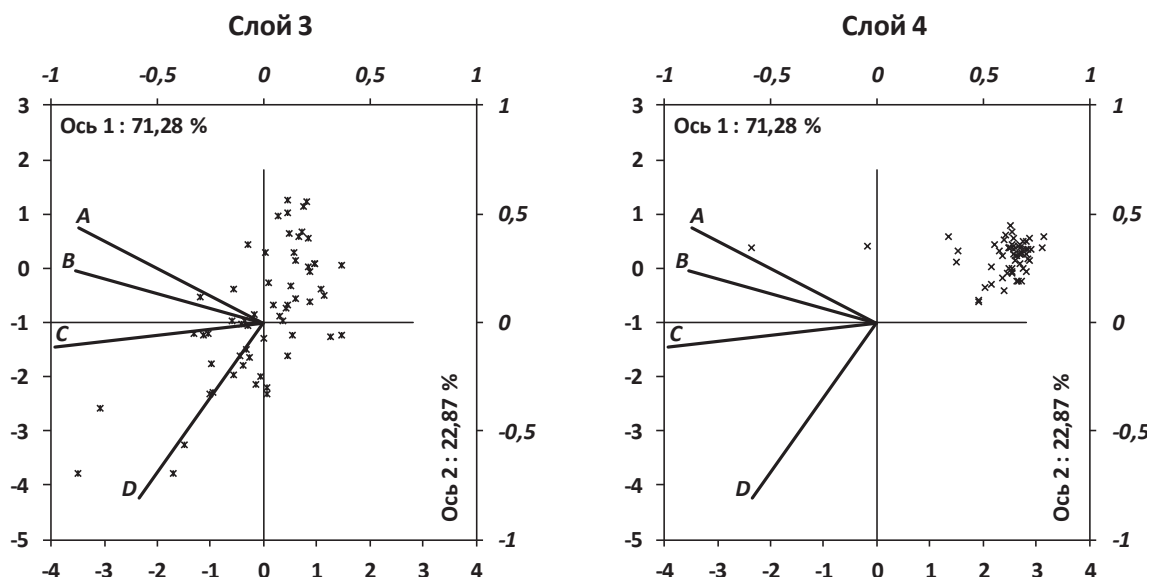


Рисунок 5. Статистическая характеристика культурных слоев 3 и 4 поселения Ксизово-1. Линиями обозначены координаты характеристик культурного слоя (верхняя горизонтальная и правая вертикальная оси): А – содержание органического фосфора, В – фосфатазная активность, С – содержание валового фосфора, D – содержание минерального фосфора. Точками обозначены координаты участков культурного слоя (нижняя горизонтальная и левая вертикальная оси).

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В период активного функционирования поселения Ксизово-1, происходило интенсивное накопление фосфора, преимущественно за счет его минеральных форм, о чем свидетельствует значительное увеличение их содержания в третьем пласте культурного слоя.

При этом во втором пласте, соответствующем периоду запустения, отмечается более высокая доля органических фосфатов по сравнению с третьим пластом за счет уменьшения антропогенной нагрузки и активизации биологических процессов.

В четвертом пласте, представляющем собой результат размывания культурного слоя, антропогенный след проявляется только в области очагов, где фиксируется поступление в почву фосфатов, как биологической, так и минеральной природы.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Сычева С.А. Культурные слои древних поселений как объект междисциплинарных исследований // Культурные слои археологических памятников. Теория, методы и практика исследований. Материалы научной конференции. – М.: ИГ РАН, ИА РАН, НИА-Природа. 2006. С. 45–54.
2. Иванов И.В. Геолого-почвенный метод палеогеографических реконструкций и концепция «Археологического вещества» (по результатам изучения стоянки срубного времени «Песчаный Дол-II») // Сборник научных работ «Материальная культура населения бассейна реки Самары в бронзовом веке». – Самара: Изд-во СГПУ. 2003. – С. 147–163.
3. Golyeva A., Chichagova O., Bondareva J. Soil forming processes of ancient man-made soils (cultural layers) by the example of sites in humid (Dunino) and arid (Ar-Dolong) regions of Russia: A first approach // Quaternary international, 2016, V. 418, P. 22–27. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2015.11.093>
4. Holliday V.T., Gartner W.G. Methods of soil P analysis in archeology // Journal of Archaeological Science. 2007. V. 34. № 2. P. 301–333.
5. Alexandrovskaya E.I., Alexandrovskiy A.L. History of the cultural layer in Moscow and accumulation of anthropogenic substances in it // Catena. 2000. Volume 41. Issues 1–3. P. 249–259. [https://doi.org/10.1016/S0341-8162\(00\)00107-7](https://doi.org/10.1016/S0341-8162(00)00107-7).



6. *Conway J.S.* 1983. An investigation of soil phosphorus distribution within occupation deposits from British hut group. *J. Archaeol. Sci.*, 10, 17–28.
7. *Sahchez, A., Canabate, M.L.* Phosphorus analysis at archaeological sites: an optimization of the method and interpretation of the results // *Archeometry* 38, 1, 1996. P. 151–163.
8. *Saunders W. M. H., Williams E.G.* Observations on the determination of total organic phosphorus in soils // *Journal of soil science*. 1955. V. 6. Issue 2. P. 254–267. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.1955.tb00849.x>.
9. *Margalef O., Sardans J., Fernández-Martínez M., Molowny-Horas R., Janssens I. A., Ciais P., Goll D., Richter A., Obersteiner M., Asensio D., Peñuelas J.* Global patterns of phosphatase activity in natural soils // *Scientific Reports*. 2017. V. 7. P. 1337. DOI: 10.1038/s41598-017-01418-8.
10. *Каширская Н.Н., Плеханова Л.Н., Удальцов С.Н., Чернышева Е.В., Борисов А.В.* Механизмы и временной фактор функционирования ферментативной организации палеопочв // *Биофизика*. 2017. Т. 62. Вып. 6. С. 1235–1244.
11. *Хазиев Ф.Х.* Методы почвенной энзимологии. Москва. 2005. 256 с.

Работа рекомендована к.б.н. А.В. Борисовым.

PHOSPHORUS AND PHOSPHATASE ACTIVITY OF THE CULTURAL LAYER OF  
AN ARCHAEOLOGICAL MONUMENT OF THE ERA OF BRONZE KSIZOVO-1  
(XXII–XXIV CENTURIES BC)

A.V. Potapova  
FIC PNTSBI RAS

This paper presents the results of a study of a model site of the settlement of Ksizovo-1 of the Middle Don catacomb culture (XXIV–XXIII centuries BC) in the forest-steppe zone. The object of research is located in the Zadonsk district of the Lipetsk region on the eroded edge of the first terrace of the left bank of the river. Again (right tributary of the Don river). The objective of the study was to assess the variation in the chemical and microbiological characteristics of the cultural layer in separate layers 10 cm thick, over the entire excavation area. The nature of phosphorus and the methods of its entry into the cultural layer are unknown. In this regard, phosphates in the cultural layer can be of both biological nature, with the accumulation of food residues and other organic substrates, and mineral, when they enter the cultural layer with bones and ash. Therefore, in the selected samples, it was decided to determine the separate forms of organic and mineral phosphates, as well as to assess the phosphatase activity. Statistical processing of the results has been performed. Comparison of the obtained data with the distribution of archaeological objects and finds on the territory of the excavation made it possible to establish the peculiarities of the chemical and biological properties of the cultural layer corresponding to the main period of the settlement's functioning and the final of the settlement's existence.

It has been established that during the functioning of the monument, soil acidification, a decrease in biological activity and a sharp increase in the supply of phosphorus to the soil took place, primarily due to the mineral forms of phosphates – ash and bones. During the period of desolation of the settlement, the proportion of organic phosphates increased due to the activation of all biological processes at the site of the monument. In the stratum underlying the cultural layer, the anthropogenic footprint was manifested only in the area of the foci, where the entry of phosphates into the soil, both biological and mineral, was recorded.

## СОДЕРЖАНИЕ ПОДВИЖНЫХ ФОРМ ТЯЖЁЛЫХ МЕТАЛЛОВ В ПОЧВАХ МОНИТОРИНГОВЫХ УЧАСТКОВ о. ВАЛААМ

Г.А. Русаков, Л.Е. Дмитричева

Российский государственный гидрометеорологический университет, Санкт-Петербург

Остров Валаам является памятником природы с уникальной экосистемой, однако в последние годы антропогенная нагрузка на него только увеличивается. Целью данной работы является определение содержания подвижных форм тяжёлых металлов в почвах мониторинговых участков о. Валаам. По результатам работы определены элементы, имеющие максимальные концентрации. Также установлены участки наибольшего антропогенного воздействия и произведена оценка загрязнённости территорий.

### ВВЕДЕНИЕ

Географическое положение Валаамского архипелага сводит к минимуму негативное влияние материка на уникальные островные экосистемы, что длительное время позволяло рассматривать территорию островов в качестве объекта фонового мониторинга наземных и водных экосистем. На протяжении многих лет сотрудники и студенты РГГМУ проводят мониторинговые исследования наземных и водных экосистем на Валааме и прилегающих островах [2, 3, 5, 10, 11]. К сожалению, в последние годы, в связи с ростом хозяйственной деятельности Валаамского монастыря, увеличением количества паломников и туристов, антропогенная нагрузка на эту территорию значительно возросла.

Согласно ранее проведённым исследованиям фоновое содержание тяжёлых металлов в почвах во многом зависит от почвообразующих пород. Так, содержание Fe в почвах, сформированных на элювии габбро-диабазов, достигает 145000 мг/кг, а в почвах, сформированных на озёрных суглинках, находится в пределах 17500 мг/кг [12].

Целью данной работы является определение содержания подвижных форм тяжёлых металлов в почвах мониторинговых участков о. Валаам.

### ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В качестве объектов исследования были выбраны следующие территории: полигон ТКО, современные сельхозугодья и некоторые лесные участки. Выбранные площадки различаются по степени антропогенной нагрузки. Для определения содержания подвижных форм тяжёлых металлов на четырёх пробных площадках были отобраны четыре объединённые пробы верхних почвенных горизонтов. Глубина отбора зависела от мощности исследуемых почв.

В качестве почвообразующих пород на острове встречается переотложенный элюво-делювий габбро-диабазов, озерные аллювиальные отложения, разного механического состава и участки локальной морены [5]. На них формируются достаточно маломощные почвы.

Полигон ТКО (пробная площадка № 1) имеет форму пятиугольника, расположен в центральной части острова в километре от посёлка на озерном аллювии. Почва данного участка представляет собой техногенные грунты, со слабо выраженным дерновым процессом и гумусонакоплением, под рудеральной растительностью. На всю исследованную глубину они представляют собой песок, смешанный с бытовым мусором.

Водосбор Лещевого озера (площадка № 2), представлен дерновыми глееватыми и глеевыми суглинистыми маломощными почвами на озерных суглинках и глинах. Данная территория активно осушается открытым дренажем и используется под пастбище и сенокос, рядом пролегает основная автомагистраль. Отбор проб производился вдоль главной монастырской дороги и на расстоянии 180 метров от неё.

Третья пробная площадка находится в западной части острова на территории Германовского поля недалеко от главной Монастырской дороги. Пробы отбирались на окраине сельскохозяйственного поля, на границе с лесным массивом.

Четвёртая площадка находится на значительном расстоянии от сельскохозяйственных угодий и полигона ТКО и является частью лесного массива. На него оказывается минимальное антропогенное воздействие.

Отбор проб почвы проводился летом 2019 года отличающимся высоким уровнем выпадения осадков что наряду с промывным режимом почв могло повлиять на результаты анализа.

В качестве определяемых в почвах элементов был выбран спектр из четырнадцати тяжёлых металлов: Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, Sr, Ba, Pb, As, Se, Mo и Cd [1, 4, 6, 9, 12]. Анализ проводился согласно М–МВИ–80–2008 «Методика выполнения измерений массовой доли элементов в пробах почв, грунтов и донных отложениях методами атомно-эмиссионной и атомно-абсорбционной спектроскопии». Выбранная для исследования методика основана на кислотном разложении проб почвы раствором 0.5 молярной азотной кислоты. После экстракции содержание подвижных форм тяжёлых металлов определялось на атомно-эмиссионном спектрометре ICPE. Анализ проводился в сертифицированной лаборатории.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

По результатам анализа наиболее загрязнёнными оказались почвогрунты находящиеся на территории полигона ТКО, наибольшие концентрации элементов наблюдались в верхнем горизонте мощностью 0–6 см. Аккумуляции тяжёлых металлов в верхних горизонтах способствует высокое содержание органического материала, поступающего при захоронении органических отходов. Всего в почвах полигона были зафиксированы двенадцать элементов из четырнадцати: As, Ba, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Mn, Pb, Ni, Sr и Zn. Наибольших значений достигают концентрации: Fe (3175 мг/кг), Ba (410 мг/кг), Mn (108 мг/кг) и Zn (175 мг/кг). При этом самое высокое содержание наблюдалось для Fe и Ba, что фиксируется по всей глубине участка. Концентрации остальных элементов не столь значительны и в большинстве своём снижаются вниз по профилю. Общее распределение тяжёлых металлов неравномерно и неоднородно из-за техногенного происхождения грунтов. Результаты анализа показаны на рис. 1.

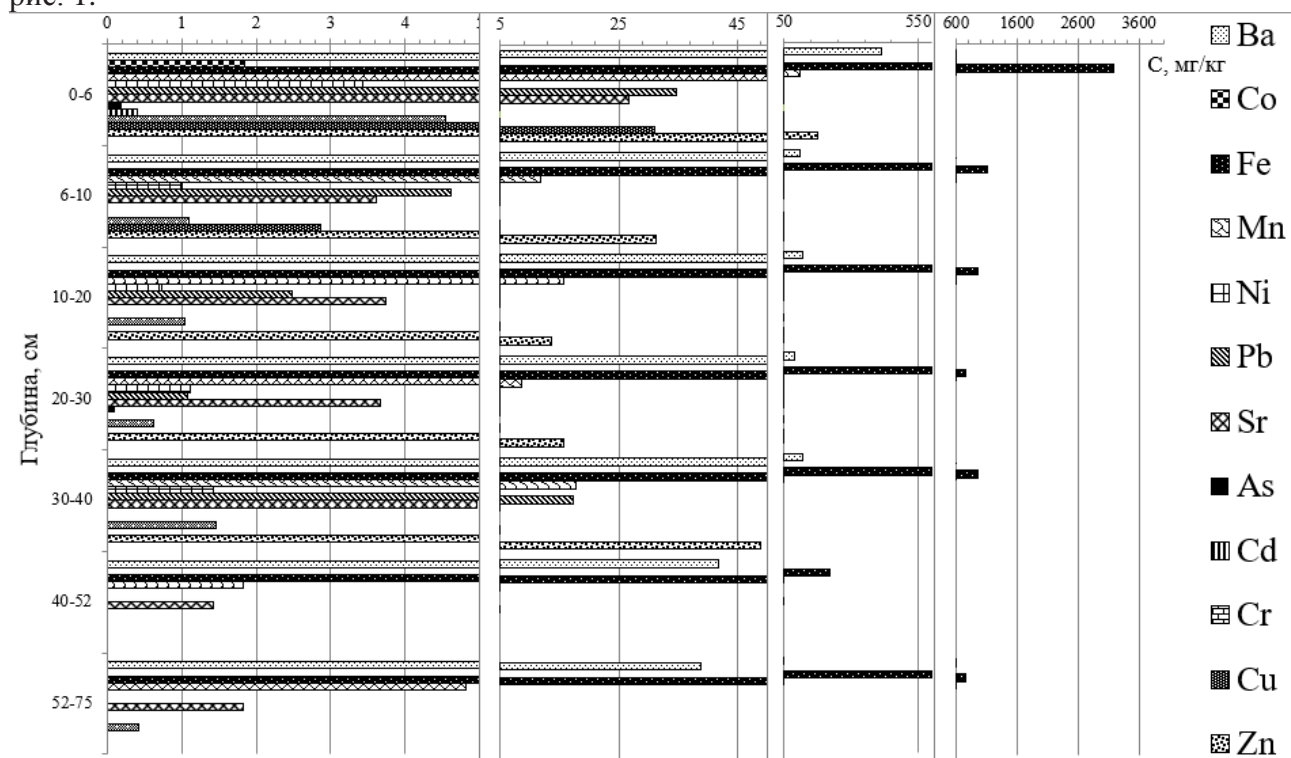


Рисунок 1. Содержание тяжёлых металлов для участка полигона ТКО.

Анализ показал, что в почвах Лещёвого луга находятся одиннадцать из четырнадцати элементов: As, Ba, Co, Cr, Cu, Fe, Mn, Ni, Pb, Sr и Zn. Максимальные концентрации отмечены у Fe (7195 мг/кг), Ba (866 мг/кг) и Mn (194 мг/кг). При этом самое высокое содержание всех

элементов фиксируются в промежуточном горизонте 15–41 см. Причиной аккумуляции элементов может быть переход с тяжёлых суглинков в данном слое на глины в нижележащем слое. Содержание тяжёлых металлов в почвах Лещёвого луга показаны на рис. 2.

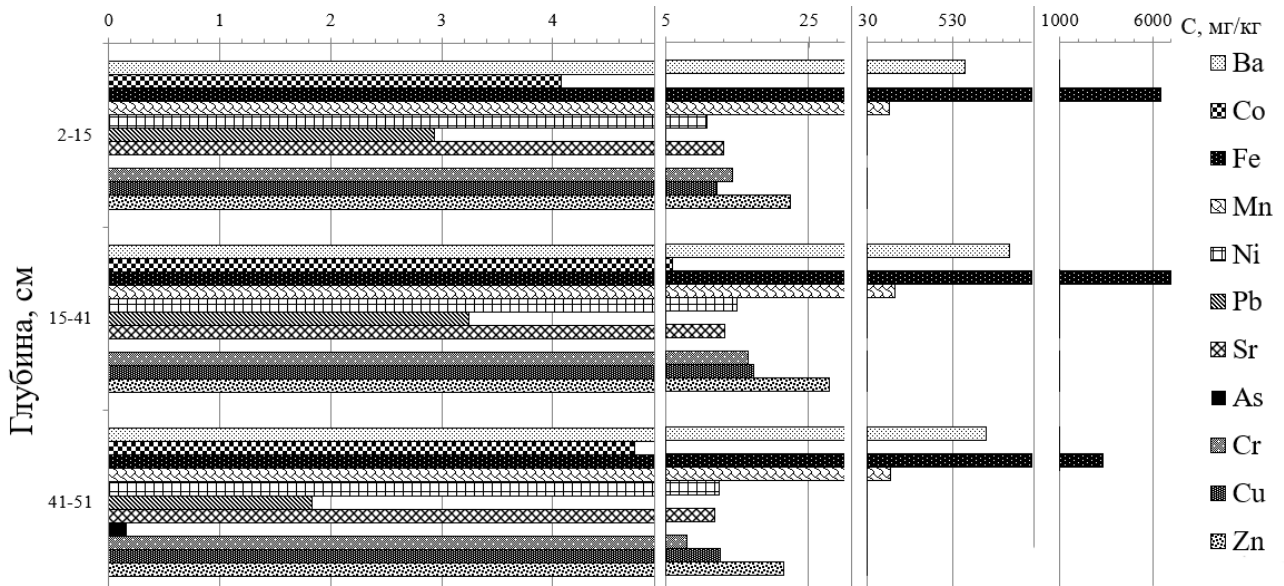


Рисунок 2. Содержание тяжёлых металлов для участка Лещёвого луга.

Аналогично с почвами Лещёвого луга для почв третьей площадки, Германовского поля, оказался свойственен тот же спектр тяжёлых металлов. Как и на предыдущей площадке, самые высокие концентрации отмечены для Fe (6480 мг/кг), Ba (632 мг/кг) и Mn (128 мг/кг). Результаты анализов представлены на рис. 3.

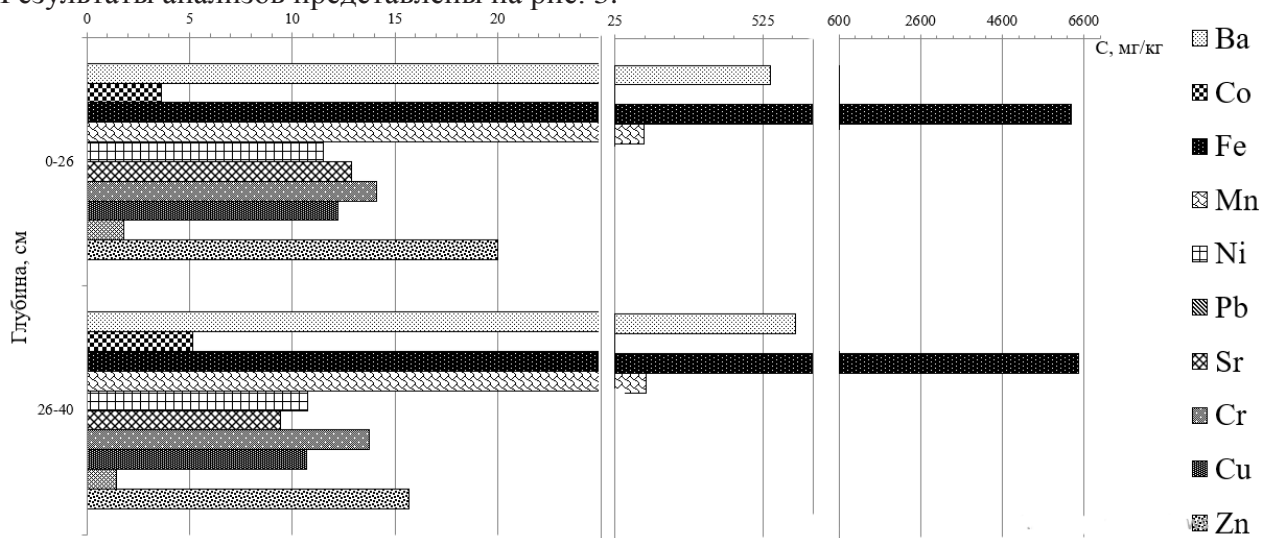


Рисунок 3. Содержание тяжёлых металлов для участка Германовское поле.

Как показали результаты анализа, почва лесного участка оказалась наименее загрязнённой. В ней были зафиксированы только шесть элементов из четырнадцати исследуемых, а именно: Fe, Ba, Co, Ni, Sr и Pb. При этом Pb присутствует исключительно в верхнем горизонте в незначительном количестве. Самое высокое содержание, как и на остальных площадках, было присуще Fe и Ba: 5486 мг/кг для Fe и 102 мг/кг для Ba. Результаты анализов представлены на рис. 4.

На основании данных результатов анализа можно сделать следующие выводы. Как и ожидалось, наиболее загрязнённой площадкой оказался полигон твёрдых коммунальных отходов. Аккумуляция и миграции тяжёлых металлов в почвах данного участка, на наш взгляд, определяются тем, что большая часть отходов, привозимых на полигон, длительное время

подвергалась захоронению без какой-либо подготовки и переработки; другая часть отходов открыто сжигается без очистки выбросов, вследствие чего поллютанты с дымом и сажей распространяются по округе.

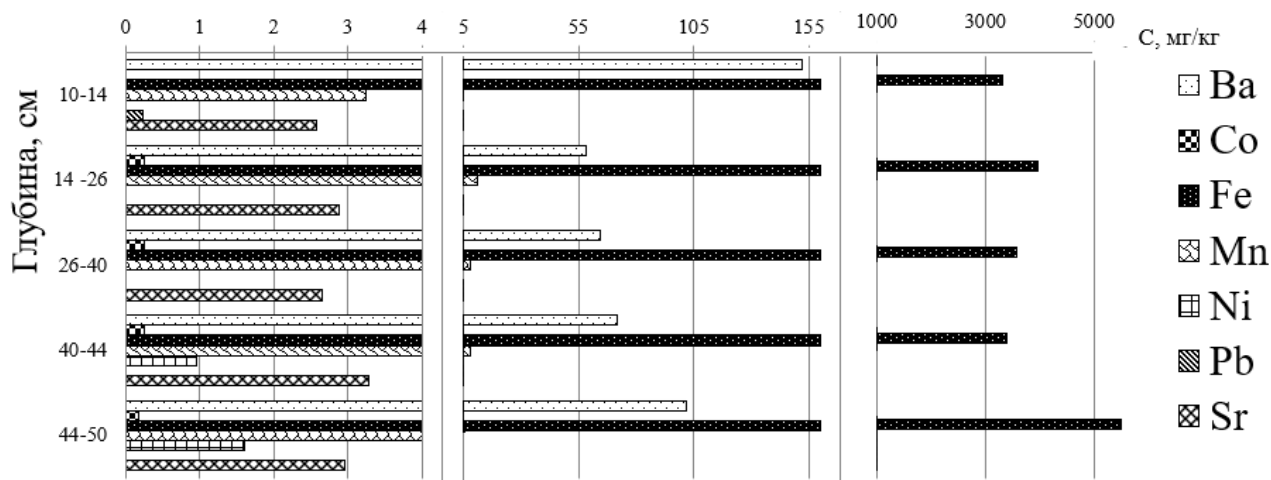


Рисунок 4. Содержание тяжёлых металлов в лесных почвах.

По результатам анализа было выявлено следующее: для почв сельскохозяйственных угодий Лещёвого луга и Германовского поля, оказалось свойственно накопление одних элементов, таких как: Ba, Co, Fe, Mn, Ni, Pb, Sr, Cr, Cu и Zn. При этом их концентрации оказались в принципе сопоставимы. Вероятно, это связано с тем, что эти участки имеют общий генезис почвообразования, сходство в строении профиля и почвообразовательных процессов, и сельскохозяйственного использования. Огромное влияние на аккумуляцию тяжёлых металлов в почвах оказывает то, что верхние пахотные горизонты богаты гумусом.

Как можно видеть из результатов анализа, в лесных почвах было зафиксировано наименьшее количество, из определяемых нами, тяжёлых металлов. Вероятнее всего это связано с тем, что на эти почвы оказывалось наименьшее, по сравнению с остальными участками, воздействие.

Почвам о. Валаам свойственен промывной тип водного режима, который обеспечивает миграцию тяжёлых металлов по всему почвенному профилю исследованных площадок. Кроме того, анализ показал, что всем исследуемым участкам свойственно высокое содержание Fe и Ba в почвах. Данный факт говорит о природном источнике происхождения этих элементов. Следовательно, их высокие концентрации можно считать фоновыми.

Основными горными породами, слагающими территорию острова, являются долериты, габбро-долериты, ферро-габбро и моноциты. В данных породах присутствует повышенное содержание  $Fe_2O_3$  и FeO, за счёт этого в почвах и наблюдаются высокие концентрации Fe. Кроме того, на о. Валаам есть выходы сиенитов и лейкогранитов, в которых также присутствует оксид и диоксид железа. Высокие концентрации Ba можно связать с наличием в горных породах, а также в сформированных ими почвах, биотита и барита. Присутствие Mn в почвах можно связать, как с его содержанием в качестве примеси в горных породах, как например в апатите [5, 7, 8, 12], так и с процессом оглеения, при котором происходило почвообразование на территориях Германовского поля и Лещёвого луга. Они расположены в районе водосборов, примыкающих к ним озёр, ранее данные территории были заболочены. Кроме того, источниками Mn в почвах служат захораниваемые отходы на полигоне ТКО и вносимые в сельскохозяйственные угодья минеральные удобрения. Содержание остальных элементов может говорить, как о наличии их в виде примесей в горных породах, так и об их антропогенном происхождении. По результатам анализа в почвах ни одной из исследуемых площадок нет As, Cd, Mo и Se.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для проведения исследования были выбраны территории разной степени антропогенной освоенности. Наиболее загрязнёнными оказались почвогрунты полигонов твёрдых коммунальных отходов, меньшее содержание, учитывая относительно высокое воздействие, оказывалось в почвах сельскохозяйственных угодий. Наименее загрязнёнными оказались почвы лесного массива.

Анализ спектра из четырнадцати элементов показал следующее: почвам всех участков свойственны высокие концентрации Fe и Ba (элементов, входящих в состав горных пород), а также то, что подвижные формы As, Cd, Mo и Se отсутствуют практически во всех пробных площадках. Содержание остальных элементов может свидетельствовать об их привнесении в почву из антропогенных источников. Кроме того, часть из них находятся в горных породах и минералах в качестве примесей.

Промывной режим почв обуславливает вымывание поллютантов из верхних горизонтов и их дальнейшему относительно равномерному распределению по всему почвенному профилю. Исключения составляют первая и третья площадки.

## ЛИТЕРАТУРА.

1. Болтунова А.Д., Смирнова С.В., Солтис В.В. Накопление тяжелых металлов в почвах под влиянием промышленного производства // *Современные проблемы науки и образования.* – 2017. № 4
2. *Влияние изменений климата и опасных природных явлений на природопользование европейского севера* / под ред. Касимова Н.С., Карлина Л.Н. СПб. 2013. 124 с.
3. Дмитричева Л.Е., Семенов Д.А., Степанова А.Б. Характеристика сезонной динамики температуры деятельного слоя почв острова Валаам / *Агрофизика.* 2020 № 4.
4. Водяницкий Ю.Н., Ладонин Д.В., Савичев А.Т. Загрязнение почв тяжелыми металлами. М., 2012.
5. Матинян Н.Н., Урусевская И.С. Почвы острова Валаам СПб 1999, 32 с.
6. Медведев И.Ф., Деревягин С.С. Тяжелые металлы в экосистемах / Саратов: «Ракурс», 2017. 178 с.
7. Свириденко Л.П. Ладожская вулкано-тектоническая структура (геология, вулканоплутанизм, тектоника) [монография] / Институт геологии КарНЦ РАН. – Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2019. 98 с.
8. Свириденко Л.П., Светов А.П. Валаамский силл габбро-долеритов и геодинамика котловины Ладожского озера. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2008. 123 с.: ил. 49, табл. 21. Библиогр. 191 назв.
9. Сердюкова А.Ф. Последствия загрязнения почвы тяжелыми металлами / А.Ф. Сердюкова, Д.А. Барабанщиков. – Текст: непосредственный // *Молодой ученый.* – 2017. № 51 (185). С. 131–135.
10. Степанова А.Б., Бабин А.В., Дмитричева Л.Е., Комолова С.А., Ерманова М.Г., Коровина А.С. Анализ антропогенного воздействия на наземные экосистемы о. Валаам // *Экосистемы Валаамского архипелага (Ладожское озеро) на рубеже 20 и 21 веков. Черты уникальности и современное состояние Атлас.* Санкт-Петербург, 2016. С. 18–31.
11. Степанова А.Б., Бабин А.В. О Валааме, станции и проекте // *Экосистемы Валаамского архипелага (Ладожское озеро) на рубеже 20 и 21 веков. Черты уникальности и современное состояние. Атлас.* Санкт-Петербург, 2016. С. 4–7.
12. Шильцова Г.В., Морозова Р.М., Литинский П.Ю. Тяжелые металлы и сера в почвах Валаамского архипелага. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2008. 109 с.

# CONTENTS OF MOBILE FORMS OF HEAVY METALS IN SOILS OF MONITORING SECTIONS OF VALAAM ISLAND

G.A. Rusakov, L.E. Dmitricheva

Russian state Hydrometeorological University, St. Petersburg

Valaam island is a natural monument with a unique ecosystem, but in recent years the anthropogenic load on it has increased. The aim of this work is to determine the content of mobile forms of heavy metals in the soils of monitoring sites Valaam island. According to the results of the work, elements taking the highest maximum concentrations were identified. The sites of the greatest anthropogenic pollution were also identified and the pollution of the territories was assessed.

УДК 631.45:631.82

## АГРОЭКОЛОГИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ПРИМЕНЕНИЯ БИОУГЛЯ В ПОВЫШЕННОЙ ДОЗЕ ПРИ МЕЛИОРАЦИИ АГРОДЕРНОВО-ПОДЗОЛИСТЫХ ПОЧВ

К.А. Смирнова, А.В. Гуртовая

Санкт-Петербургский государственный университет

Биоуголь является перспективным мелиорантом, который может использоваться в сельском хозяйстве. Предполагается, что его внесение в почву способно привести к повышению урожайности сельскохозяйственных культур и, кроме того, улучшить химические, физико-химические и микробиологические параметры почвы, в конечном счете, повышая её плодородие. Целью данной работы являлось изучение влияния биоугля на основные агрохимические показатели исследуемых почв, а также оценка объемов минерализации гумуса при внесении разных доз биоугля в лабораторном модельном эксперименте.

*Ключевые слова:* агроэкологические параметры, биоуголь, гумус, инкубационный эксперимент.

### ВВЕДЕНИЕ

Биоуголь (БУ) – это продукт, полученный путём термической деструкции растительного материала, содержащий большое количество углерода и благодаря своим свойствам являющийся перспективным мелиорантом почв. Считается, что конечные свойства БУ (пористость, зольность, общее содержание углерода, доступные питательные вещества) зависят от условий пиролиза, в которых он получен, а именно от температуры и давления [9, 15, 16]. Применение БУ как мелиоранта обусловлено его возможной способностью повышать урожайность культур и изменять некоторые физико-химические свойства почвы: водоудерживающую способность, рН, емкость катионного обмена, содержание питательных элементов и органического углерода [6, 8, 10].

### ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Объектами исследования являлись пахотные горизонты (0–20 см) окультуренных дерново-подзолистых почв Ломоносовского (почва 1) и Гатчинского (почва 2, 3) районов Ленинградской области. Почвы различались разной степенью окультуренности. Агрохимическая характеристика почв представлена в табл. 1.

Используемый в экспериментах БУ, был получен из древесины березы и осины при температуре 550 °С путем быстрого пиролиза. Содержание основных элементов в БУ и рН представлены в табл. 2.

30-дневный инкубационный эксперимент был поставлен для изучения влияния БУ на агрохимические свойства почв и на объемы минерализации гумуса. Образцы почв массой 200 г помещались в пластиковые сосуды при температуре 25 °С. БУ вносился в почву в следующих концентрациях: 0 (контроль), 1, 5 и 10 %, что соответствует 0, 24, 120 и 240 т/га.

---

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 18-016-00208а.

© К.А. Смирнова, А.В. Гуртовая, 2021

После чего почва тщательно перемешивалась и увлажнялась до 60 % от полной влагоемкости. Такая влажность поддерживалась в течение всего эксперимента. Все варианты были в 3-кратной повторности.

Таблица 1. Агрохимическая характеристика окультуренных дерново-подзолистых почв.

Вариант опыта	рН <sub>KCl</sub>	Гумус, %	N-NO <sub>3</sub>	N-NH <sub>4</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O
			мг/кг			
Слабо окультуренная						
Почва 1	5.3	1.98	10	12	68	99
Средне окультуренная						
Почва 2	5.0	2.41	16	24	82	88
Высоко окультуренная						
Почва 3	5.6	3.07	17	16	106	86

Таблица 2. Характеристика биоугля.

рН	С <sub>общ</sub>	N	H	N-NO <sub>3</sub>	N-NH <sub>4</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O
	%			мг/кг			
8.34	82.2	0.4	2.8	0.0	6.0	8.3	73

Основные агрохимические характеристики исследуемых почв определялись по стандартным методикам: содержание углерода по методу Тюрина, подвижного фосфора и обменного калия по методу Кирсанова, аммонийного азота колориметрическим методом, нитратного азота дисульфофеноловым методом, рН по методу ЦИНАО [2]. При переводе значений общего углерода в содержание гумуса использовался коэффициент 1.724.

Статистическая обработка данных проводилась с помощью пакета программ IBM SPSS Statistics, Version 25. Достоверность различий между средними оценивалась с помощью теста Стьюдента-Ньюмена-Келса (Student-Newman-Keuls test) при P < 0.05. Равенство дисперсий оценивалось с помощью критерия Ливиня (Levene test).

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЯ

В литературе рекомендуют различные дозы внесения БУ от совсем низких [17, 18] до очень высоких [11, 12]. Результаты воздействия не всегда однозначные. Наиболее часто в инкубационных экспериментах используются концентрации 1–2 %, поэтому для оценки влияния БУ на агроэкологические показатели агродерново-подзолистых почв была выбрана концентрация 1 %.

В результате проведенных исследований было выявлено, что внесение БУ в дерново-подзолистые почвы не вызвало достоверных изменений актуальной кислотности по сравнению с контролем (табл. 3).

Таблица 3. Влияние БУ на агроэкологические свойства дерново-подзолистых супесчаных почв, концентрация БУ 1 %.

Вариант опыта	рН <sub>KCl</sub>	Гумус, %	C:N	N-NO <sub>3</sub>	N-NH <sub>4</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O
				мг/кг			
Слабо окультуренная							
Контроль	5.3±0.02a	1.90±0.03b	13	19±1c	7±2a	65±2a	102±2a
Биоуголь	5.4±0.02a	1.74±0.06a	14	16±1b	8±1a	63±2a	109±3b
Средне окультуренная							
Контроль	5.1±0.00a	2.35±0.03b	14	26±0c	12±1a	84±3b	84±2a
Биоуголь	5.4±0.03a	2.20±0.04a	15	20±1b	14±1a	75±2a	98±3b
Высоко окультуренная							
Контроль	5.5±0.03a	2.91±0.04b	13	30±2c	7±1a	98±3a	80±5a
Биоуголь	5.8±0.02a	2.71±0.05a	15	22±1b	4±1a	100±4a	96±3b

Примечание. ± – стандартное отклонение; разными буквами обозначены средние значения, различающиеся между собой при P < 0.05



Однако, как тенденцию можно отметить некоторое снижение кислотности почв под влиянием БУ, особенно в средне и высоко окультуренной почвах. Это соответствует результатам исследований ряда отечественных [3, 4] и зарубежных авторов [13, 14], свидетельствующих о положительном влиянии БУ на изменение рН кислых почв в сторону подщелачивания.

Кроме того, использование БУ привело к снижению содержания нитратного азота в почве. Значительного влияния БУ на содержание аммонийных форм азота и обменного фосфора выявлено не было. При этом, следует отметить повышение значений C/N. Иными словами количество органических форм углерода превышало количество органических форм азота. Следовательно, в ходе инкубации скорость минерализации соединений азота была выше, чем соединений углерода, и степень гумифицированности органического вещества почвы понижалась.

По-видимому, при компостировании катионы аммония, образуемые в результате минерализации органического вещества, могут сорбироваться отрицательно заряженными функциональными группами биоугля [7]. В итоге, нитрификация лимитируется количеством субстрата (аммония), доступного нитрифицирующим бактериям, и содержание нитратного азота уменьшается [5].

Количество обменного калия, наоборот, возросло под действием БУ по сравнению с контролем, что безусловно является положительным результатом, особенно для бедных калием супесчаных дерново-подзолистых почв. Схожие результаты, показывающие повышение содержания калия в результате внесения БУ, получены в работе Б.Р. Григорьяна и соавторов [1].

Из рассматриваемых показателей наиболее значительно под влиянием БУ изменялось содержание гумуса. Было установлено, что минерализация органического вещества под влиянием БУ протекает на 6–8 % интенсивнее, чем в контроле. В целом, за весь период инкубации минерализация органического вещества почвы составила 9–12 % от исходного содержания, что может привести к довольно значительной потере гумуса. В почвах, которые изначально характеризуются низким содержанием органического вещества, а такие почвы доминируют в почвенном покрове Северо-Западного региона России, потери гумуса прогнозируемых масштабов негативно скажутся на их агроэкологическом состоянии.

В связи с этим более подробно было изучено влияние различных доз БУ на количество углерода в почве (табл. 4).

Таблица 4. Влияние биоугля на содержание органического углерода в агродерново-подзолистых почвах разной степени окультуренности.

Почва	С, % к почве				С, % от исх.			
	Контроль	БУ, 1 %	БУ, 5 %	БУ, 10 %	Контроль	БУ, 1 %	БУ, 5 %	БУ, 10 %
Слабо окультуренная	1.10	1.05	0.97	1.01	97	91	84	88
Средне окультуренная	1.36	1.26	1.22	1.26	97	90	87	90
Высоко окультуренная	1.69	1.57	1.46	1.53	95	88	82	86

Установлено, что во всех вариантах опыта под влиянием БУ минерализация органического вещества возрастала, причем независимо от степени гумусированности. Наиболее интенсивно она протекала при добавлении в почву БУ в концентрации 5 %. Это вызвало снижение содержания общего углерода на 17–18 % от исходного содержания. Последующее повышение концентрации БУ (до 10 %) не привело к такому же значительному усилению данного процесса – минерализация органического вещества составила 11–14 % от исходного содержания. По-видимому, это связано с меньшей доступностью для микроорганизмов минеральных и органических веществ, поскольку они могут сорбироваться на поверхности БУ.

Поэтому повышенные дозы БУ, вероятно, вызывают снижение микробиологической активности и, как следствие, скорости минерализации органического вещества.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, на основании результатов проведенного краткосрочного инкубационного эксперимента отрицательного влияния БУ на такие агрохимические показатели почв, как обменная кислотность, содержание аммонийного азота, обменного калия и фосфора не было выявлено. В то же время, БУ оказал негативное воздействие на содержание нитратного азота и гумуса. В процессе инкубации наблюдалась интенсификация процессов минерализации почвенного органического вещества. Внесение повышенных доз БУ в качестве мелиоранта в агродерново-подзолистые почвы может привести к дегумификации, снижению плодородия и отрицательно сказаться на их агроэкологическом состоянии. Для решения вопросов использования БУ в почвах Северо-Запада России требуется проведение детальных натуральных экспериментов.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Григорьян Б.Р., Грачев А.Н., Кулагина В.И., Сунгатуллина Л.М., Кольцова Т.Г., Рязанов С.С. Влияние биоугля на рост растений, микробиологические и физико-химические показатели мало гумусированной почвы в условиях вегетационного опыта // Вестник технологического университета. – 2016. – т. 19, № 11. С. 185–189.
2. Крейер К.Г., Банкина Т.А., Орлова Н.Е., Юрьева Г.М. Практикум по агрохимическому анализу почв: Учеб. пособие. СПб.: Изд-во С.-Петербур. ун-та, 2005. 88 с.
3. Литвинович А.В., Хаммам А.А.М., Лаврищев А.В., Павлова О.Ю. Мелиоративные свойства и удобрительная ценность различных по размеру фракций биоугля (по данным лабораторных экспериментов) // Агрохимия. – 2016. – № 9. С. 46–53.
4. Соколик Г.А., Овсянникова С.В., Иванова Т.Г., Попеня М.В., Войникова Е.В. Характеристики дерново-подзолистых почв после внесения биоугля // Весці нацыянальнай акадэміі навук беларусі. – 2015. – № 2. С. 87–94.
5. Шахназарова В.Ю., Орлова Н.Е., Орлова Е.Е., Якконен К.Л., Рижия Е.Я., Кичко А.А. Изменения таксономического состава и структуры прокариотного сообщества агродерново-подзолистой почвы при внесении биоугля // Сельскохозяйственная биология. 2020, 55, 1. С. 163–173.
6. Al-Wabel M.I, Hussain Q., Usman A.R.A., Ahmad M., Abduljabbar A., Sallam A.S., Ok Y.S. Impact of biochar properties on soil conditions and agricultural sustainability: A review. Land Degradation and Development, 2017, vol. 29 (7), pp. 2124–2161. DOI: 10.1002/ldr.2829
7. Amonette J.E., Joseph S. Characteristics of biochar: microchemical properties. Biochar for environmental management: science and technology, 2009, Earthscan, London-Sterling, VA, pp. 33–52.
8. Bohara H. Influence of poultry litter and biochar on soil water dynamics and nutrient leaching from a very fine sandy loam soil. Soil Tillage Research, 2019, vol. 189, pp. 44–51. DOI: 10.1016/j.still.2019.01.001
9. Enders A.; Hanley K.; Whitman T.; Joseph S.; Lehmann J. Characterization of biochars to evaluate recalcitrance and agronomic performance. Bioresource Technology, 2012, vol. 114, pp. 644–653. DOI: 10.1016/j.biortech.2012.03.022.
10. Igalavithana A.D., Ok Y.S., Usman A.R.A., Al-wabel M.I., Oleszczuk P., Lee S.S. The Effects of Biochar Amendment on Soil Fertility. Agricultural and Environmental Applications of Biochar: Advances and Barriers, 2015, vol. 63, pp. 123–144. DOI: 10.2136/sssaspecpub63.2014.0040.
11. Jalal F., Arif M., Akhtar K., Khan A., Naz M., Said F., Zaheer S., Hussain S., Imtiaz M., Khan M.A., Ali M., Wei F. Biochar Integration with Legume Crops in Summer Gape Synergizes Nitrogen Use Efficiency and Enhance Maize Yield. Agronomy, 2020, vol. 10, no. 1, 58 p. DOI: 10.3390/agronomy10010058.

12. Jeffery S., Verheijena F.G.A., van der Velde M., Bastos A.C. A quantitative review of the effects of biochar application to soils on crop productivity using meta-analysis. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2011, vol. 144, no. 1, pp. 175–187. DOI: 10.1016/j.agee.2011.08.015.
13. Kätterer T., Roobroeck D., Andrén O., Kimutai G., Karlton E., Kirchmann H., Nyberg G., Vanlauwe B., Röing de Nowina K. Biochar addition persistently increased soil fertility and yields in maize soybean rotations over 10 years in sub-humid regions of Kenya, *Field Crops Research*, 2019, vol. 235, pp. 18–26. DOI: 10.1016/j.fcr.2019.02.015.
14. Liu Z., He T., Cao T., Yang T., Meng J., Chen W. Effects of biochar application on nitrogen leaching, ammonia volatilization and nitrogen use efficiency in two distinct soils. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 2017, vol. 17, no. 2, pp. 515–528. DOI: 10.4067/S0718-95162017005000037.
15. Manyà J.J., Azuara M., Manso J.A. Biochar production through slow pyrolysis of different biomass materials: Seeking the best operating conditions. *Biomass and Bioenergy*, 2018, vol. 117, pp. 115–123. DOI: 10.1016/j.biombioe.2018.07.019.
16. Méndez A., Terradillos M., Gascó G. Physicochemical and agronomic properties of biochar from sewage sludge pyrolysed at different temperatures. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 2013, vol. 102, pp. 124–130. DOI: 10.1016/j.jaap.2013.03.006.
17. Saletnik B., Zagula G., Bajcar M., Czernicka M., Puchalski C. Biochar and Biomass Ash as a Soil Ameliorant: The Effect on Selected Soil Properties and Yield of Giant Miscanthus (*Miscanthus x giganteus*). *Energies*, 2018, vol. 11, no. 10, 2535 p. DOI: 10.3390/en11102535.
18. Yang Y., Ma S., Zhao Y., Jing M., Xu Y., Chen J. A Field Experiment on Enhancement of Crop Yield by Rice Straw and Corn Stalk-Derived Biochar in Northern China. *Sustainability*, 2015, vol. 7, no. 10, pp. 1–13. DOI: 10.3390/su71013713.

Робота рекомендована к.б.н., доц. Н.Е. Орловой.

## AGROECOLOGICAL ASSESSMENT OF HIGH-DOSE BIOCHAR USE DURING THE MELIORATION OF AGRO-PODZOLIC SOILS

K.A. Smirnova, A.V. Gurtovaya

St. Petersburg State University

Biochar is a promising ameliorant that can be used in agriculture. It is assumed that its introduction into the soil can lead to an increase in the yield of agricultural crops and in addition improve the chemical, physicochemical and microbiological properties of the soil, increasing its fertility. The aim of this work was to study the effect of biochar on the main agrochemical properties of the agro-podzolic soils, as well as to assess the volume of humus mineralization under different doses of biochar in a laboratory model experiment.

*Keywords:* agroecological parameters, biochar, humus, incubation experiment.

АНАЛИЗ И ОЦЕНКА СОВРЕМЕННОГО СОСТОЯНИЯ  
АЛЛЮВИАЛЬНЫХ ПОЧВ ДЕЛЬТЫ ДОНА

К.С. Сушко

Южный научный центр РАН  
Южный федеральный университет, г. Ростов-на-Дону

На основе морфолого-генетического описания почвенных профилей, а также физико-химических характеристик (гранулометрический состав, гумус, карбонаты, показатели засоления и др.), изучены условия, определяющие современное состояние и закономерности образования аллювиальных почв дельты Дона, а также изменение структуры почвенного покрова при возрастающей антропогенной нагрузке в современный период. Анализ современного состояния почв района исследования выполнен на основе обобщения полученных за предыдущие годы натуральных данных и обработки фондовых материалов.

*Ключевые слова:* аллювиальные почвы, острова, дельта Дона, зарегулирование стока, антропогенное воздействие, деградация почв

## ВВЕДЕНИЕ

Дельта реки Дон представляет собой уникальную природную экосистему, которая характеризуется наличием практически не затронутых антропогенным воздействием эталонных ландшафтов, высоким биологическим разнообразием, наличием уникальных местообитаний. Дельта Дона участвует в формировании биоресурсного потенциала Азовского моря и Таганрогского залива, а также является резервом земельного фонда, особенно актуальным для устойчивого развития региона. Дельта Дона является важнейшим транспортным узлом морских грузоперевозок, важным сельскохозяйственным районом, центром рекреации. Помимо этого, здесь сохранились уникальные местообитания видов растений и животных, занесенных в Красную книгу РФ.

Особую актуальность в исследовании почв региона обуславливает планируемое активное гидротехническое строительство на Нижнем Дону, что повлечет изменение твердого и жидкого стока [7, 8].

Северо-восточное Приазовье по строению рельефа и новейших отложений обнаруживает с одной стороны черты террасового комплекса долины Дона, с другой стороны – лиманного и дельтового устьевого комплекса. В конце плиоцена и в антропогене, в связи с колебанием уровня вод в приемном бассейне, дельты Дона и рек донского бассейна мигрировали на широком пространстве от г. Новочеркаска до Керченско-Таманской зоны [7].

Это привело к формированию на территории региона сложно организованного аллювиального комплекса, включающего в себя русловые, пойменные, дельтовые и лиманные отложения.

Почвенный покров дельты Дона и северного Приазовья отличается сложностью и комплексностью, которая связана с совокупностью природных факторов и разнообразием форм антропогенного воздействия на почвы. Большинство исследователей относят почвы дельты Дона к группе типов аллювиальных пойменных и дельтовых почв. Отличительной чертой почв является регулярное затопление паводковыми водами и отложением слоев аллювия. Периодическое затопление паводками и близость грунтовых вод обуславливают особенности водного режима и генезиса, что отражается в специфике их строения [5].

## ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Современная дельта Дона представляет заболоченную низину, пересеченную прирусловыми валами современных рукавов и множеством водотоков с нестабильным режимом

---

Работа выполнена при поддержке РФФИ, грант № 18-05-80022 «Реконструкция и изменение палеоландшафтов в эпоху голоцена под влиянием природных и антропогенных процессов на примере акватории Таганрогского залива и прилегающего участка дельты Дона».

© К.С. Сушко, 2021

стока (ериков). В центральной части дельты возвышаются останцы надпойменной террасы – песчаные холмы до 5–6 м высотой. Множество мелких островов ограничивают дельту со стороны Таганрогского залива Азовского моря (рис. 1).

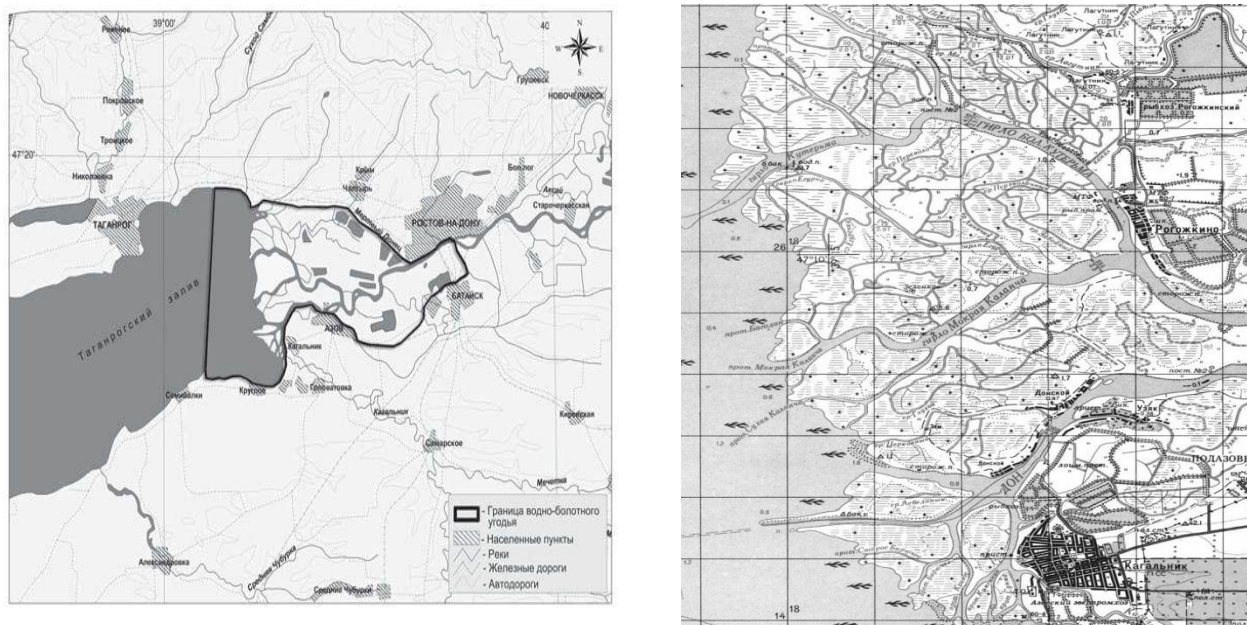


Рисунок 1. Географическое положение района исследований.

В настоящее время изучение водных и наземных экосистем дельты Дона входит в число важнейших направлений научных работ Южного научного центра РАН. Для проведения комплексных исследований была создана Научно-экспедиционная база «Кагальник», которая располагается на берегу одной из протоков в юго-западной части дельты. В марте 2017 г. создан полевой стационар «Дельта Дона», расположенный в центральной части острова Свиной [7].

Объектами исследования стали почвы островной и прибрежной частей дельты Дона (гирло Мериновое, гирло Кутерьма, гирло Широкое, река Мертвый Донец, ерик Церковный, гирло Свиное). При изучении почвенного покрова использовались стандартные методы полевых и лабораторных исследований: сравнительно-географический, эколого-ландшафтного профилирования, а также физико-химические.

Заложены 6 почвенно-литологических профилей на островах дельты Дона. Также сделаны почвенные разрезы (8 шт.) на островах Донской и Свиной.

Образцы отбирали послойно на глубину 0–20 и 20–50 см (определение почвенных показателей проводили в 3-кратной повторности). Выполнены анализы агрофизических показателей почв островов дельты Дона (гумус и его запасы, плотность, содержание агрономически ценных агрегатов и коэффициента структурности, сухой остаток на засоленность, влажность и др.) Плотность измеряли в образцах почв ненарушенного сложения буром Качинского послойно каждые 5 см [1, 2].

При установлении степени засоления почв пользовались классификацией Н.И. Базилевич и Е.Н. Панковой [2].

Содержание гумуса определялось методом Тюрина в модификации Орлова [2] в лабораториях ЮНЦ РАН.

При исследовании прибрежных и островных ландшафтов отбор почв и грунтов производился с использованием почвенного бура. Всего было заложено 26 шурфов на глубину 1.21–1.82 м. Образцы почв отбирались послойно каждые 40 см. Всего отобрано 127 образцов почв и аллювиальных отложений. Все образцы высушены, упакованы и подготовлены к дальнейшим лабораторным анализам.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЯ

В результате проведенных комплексных экспедиционных исследований 2014–2019 гг. установлено, что почвы островов северной части дельты Дона представлены 5 типами и подтипами: аллювиальными, аллювиально-луговыми, лугово-аллювиальными, луговыми и слоистыми песчаными почвами дельтовых песков на почвообразующих породах различного генезиса [6, 9].

Распространение почвообразующих отложений в островной части дельты Дона подчинено определенным закономерностям. Русловые пески располагаются на островах, омываемых крупными рукавами, такими как гирло Широкое, Кутерьма, Мериново. По мере удаления от водотоков русловые пески сменяются пойменными и старичными песками. По площади они занимают значительную долю островной части дельты Дона, ими сложены массивы островов Свиной, Донской, Кутерьма и др. Дельтовые пески занимают северную и южную зону в западном сегменте современной дельты Дона [7].

Краткое морфологическое описание почв островной и прибрежной частей дельты Дона представлено в табл. 1.

Таблица 1. Физико-химические характеристики почв прибрежных и островных ландшафтов дельты Дона.

Глубина отбора, см	Влажность почвы, %	Плотность, г/см <sup>3</sup>	Вскипание от 10 %, HCl	Гранулометрический состав	pH
Разрез № 1 (гирло Мериново)					
0–40	3.14	1.12	+	Легкий суглинок	7.38
40–80	4.16	1.2	–	Средний суглинок	7.62
80–120	8.12	1.37	–	Супесь	7.73
>120	12.1	1.18	–	Супесь	7.82
Разрез № 2 (гирло Кутерьма. юг острова)					
0–40	4.1	1.12	+	Средний суглинок	7.16
40–80	4.5	1.22	+	Средний суглинок	7.51
80–120	7.3	1.44	+	Супесь	7.91
>120	11.0	1.2	–	Супесь	7.82
Разрез № 3 (гирло Кутерьма. север острова)					
0–40	2.9	1.23	–	Средний суглинок	7.23
40–80	4.3	1.28	+	Легкий суглинок	7.16
80–120	5.8	1.41	+	Средний суглинок	7.3
>120	7.3	1.25	–	Супесь	7.8
Разрез № 4 (гирло Кутерьма. центр острова)					
0–40	2.7	1.12	+	Тяжелый суглинок	7.29
40–80	3.9	1.27	+	Средний суглинок	7.32
80–120	5.9	1.32	–	Средний суглинок	7.82
>120	8.63	1.1	–	Легкий суглинок	7.65
Разрез № 5 (гирло Широкое)					
0–40	3.7	1.12	–	Средний суглинок	7.31
40–80	4.8	1.18	+	Средний суглинок	7.42
80–120	7.2	1.25	–	Супесь	7.72
>120	8.7	1.11	–	Супесь	7.84
Разрез № 6 (ер. Церковный)					
0–40	3.2	1.15	+	Средний суглинок	7.37
40–80	4.9	1.28	+	Тяжелый суглинок	7.42
80–120	7.9	1.32	+	Тяжелый суглинок	7.7
>120	8.1	1.1	+	Средний суглинок	7.84
Разрез № 7 (Мертвый Донец)					
0–40	2.3	1.14	+	Легкий суглинок	7.11
40–80	3.9	1.21	+	Средний суглинок	7.42
80–120	8.1	1.18	–	Супесь	7.62
>120	8.5	1.19	–	Супесь	7.74

Интегральным показателем почвенного плодородия является содержание гумуса. Распределение гумуса по профилю изученных почв дельты Дона тесно связано с условиями почвообразования в степной зоне, для них характерно повышенное содержание гумуса в верхних горизонтах и постепенное уменьшение его вниз по профилю.

Содержание гумуса в верхних горизонтах не превышает 3.27–3.36 %, вниз по профилю отмечено постепенное уменьшение до 0.79–1.02 %. Отмечены затеки гумуса по почвенному профилю до глубины 107 см. Ареалы наибольшей дегумификации почв дельты Дона связаны с непосредственным развитием сельского хозяйства, а также абразионным разрушением берегов.

Уплотнение верхних почвенных горизонтов отмечается в центральных частях островов дельты Дона, в особенности это характерно для ареалов сильных ландшафтных пожаров, обрамляющих селитебные ландшафты дельты (х. Петров, х. Донской, остров Свиной). Все почвы, примыкающие к селитебным зонам, характеризуются переуплотнением (свыше 1.2 г/см<sup>3</sup>).

При зарегулировании речного стока реки Дон Цимлянским водохранилищем в 1952 г. исчезла прерывистость и слоистость почвообразования в почвах островной и прибрежной части дельты Дона. Паводки перестали промывать почвы дельты от солей, аккумулируемых в послепаводковые периоды из грунтовых вод. Повсеместно расширяются деградационные процессы засоления, осолонцевания, слитизации и др. Немалую роль играют антропогенные факторы среды, к которым относятся различные гидротехнические сооружения, стоки, пастбищная нагрузка и иные источники антропогенного воздействия [3, 4, 9].

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных исследований выявлено, что в настоящее время происходит перераспределение, а также изменение структуры песчаного аллювия по профилю почв дельты Дона. В почвенном профиле отмечаются четкие признаки гидрогенной аккумуляции веществ и дельтовых условий почвообразования. Физико-химические свойства аллювиальных почв связаны с условиями развития почвообразовательных процессов – поемного, аллювиального, дернового и глеевого. В структуре почвенного покрова дельты Дона произошли изменения – луговые и лугово-аллювиальные почвы крупных водотоков преобразовались в маломощные аллювиальные слоистые почвы, сформированные на пойменных и старичных песках, в результате заиления и перераспределения стоков твердых наносов.

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Александрова Л.Н., Найденова О.А.* Лабораторно-практические занятия по почвоведению. Л.: Агропромиздат, 1986. 295 с.
2. *Аринушкина Е.В.* Руководство по химическому анализу почв. М.: Изд-во МГУ, 1970. 487 с.
3. *Безуглова О.С., Хырхырова М.М.* Почвы Ростовской области. Ростов-на-Дону: Изд-во ЮФУ, 2008. С. 123–124.
4. *Григоренко К.С., Матишов Г.Г.* Маловодье и роль грунтовых вод в осолонении авандельты Дона // Доклады Академии наук. 2018. Т. 483. № 4. С. 442–446. DOI: 10.31857/S086956520003284-5.
5. *Матишов Г.Г., Польшин В.В., Дюжова К.В., Сушко К.С., Титов В.В.* Результаты комплексных исследований голоценовых отложений Азовского моря // Наука юга России, 2017. Т. 13. № 4. С. 43–59. DOI: 10.23885/2500-0640-2017-3-4-43-59.
6. *Розанов Б.Г.* Морфология почв: учебник для высшей школы. М.: Академический проект, 2004. 432 с.
7. *Сушко К.С., Ильина Л.П.* Особенности развития деградационных процессов в ландшафтах дельты Дона // В сборнике: Закономерности формирования и воздействия морских, атмосферных опасных явлений и катастроф на прибрежную зону РФ в условиях глобальных климатических и промышленных вызовов («Опасные явления»). Материалы Международной научной конференции. Ростов-на-Дону. 2019. С. 243–246.

8. Li Y., Zhang Q., Lu J., Yao J., Tan Z. Assessing surface water-groundwater interactions in a complex river–floodplain wetland-isolated lake system // River Research and Applications. 2019. Т. 35. № 1. С. 25–36. DOI: 10.1002/rra.3389
9. Minkina T.M., Fedorenko G.M., Nevidomskaya D.G., Fedorenko A.G., Chaplygin V.A., Mandzhieva S.S., Sushkova S.N., Hassan T.M., Pol'shina T.N. Bioindication of soil pollution in the delta of the Don river and the coast of the Taganrog bay with heavy metals based on anatomical, morphological and biogeochemical studies of macrophyte (*Typha australis* Schum and Thonn // Environmental Geochemistry and Health. 2019. DOI: 10.1007/s10653-019-00379-3.

Работа рекомендована д.г.н., профессором Беспаловой Л.А.

## ANALYSIS OF THE CURRENT STATE OF ALLUVIAL SOILS IN THE COASTAL AND ISLAND PARTS OF THE DELTA OF THE DON RIVER

K.S. Sushko

Southern scientific center of RAS

Southern federal university; Rostov-on-Don

Based on the morphological and genetic description of soil profiles, as well as physical and chemical characteristics (granulometric composition, humus, carbonates, salinity indicators, etc.), the conditions determining the current state and patterns of formation of alluvial soils of the delta of river Don, as well as changes in the structure of the soil cover under increasing anthropogenic load in the modern period are studied. The analysis of the current state of soils in the research area is based on the generalization of field data obtained in previous years and the processing of stock materials.

*Keywords:* alluvial soils, Islands, delta of the Don river, flow regulation, anthropogenic impact, soil degradation

УДК 631.432.3

## НЕУСТОЙЧИВОСТЬ ФРОНТА ВПИТЫВАНИЯ КАК КЛЮЧЕВОЙ ФАКТОР ЗАГРЯЗНЕНИЯ ПОДЗЕМНЫХ ВОД

К.Д. Толстыгин, А.В. Смагин

Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова

В работе раскрываются вопросы образования неустойчивости фронта впитывания и процессы пальцеобразования. Приводится анализ существующих математических моделей этих процессов и рассматривается вопрос их применимости. В работе раскрыта тема расчета коэффициента релаксации: приводится детальная методика лабораторного определения и дальнейшего расчета.

*Ключевые слова:* пальцеобразование, математическое моделирование, уравнение Ричардса, почвенно-гидрологические константы, релаксация, основная гидрофизическая характеристика.

### ВВЕДЕНИЕ

Актуальная экологическая проблема – угроза загрязнения и заражения подземных вод при негативных антропогенных воздействиях на поверхность почвы, включая аварии на промышленных объектах. Водорастворимые загрязнители попадают на поверхность почвы и быстро мигрируют к зеркалу грунтовых вод.

Анализ результатов многочисленных экспериментов [1, 2, 5, 14] позволяет сделать вывод, что в ненасыщенных грунтах движимый гравитацией однородный фронт пропитки, как правило, распадается на устойчиво развивающуюся систему потоков («пальцев»). Понимание причин, вызывающих неустойчивость таких фронтов, и учёт этого эффекта необходимы

---

Работа выполнена при поддержке РФФИ, грант № 19-29-05006/19.

© К.Д. Толстыгин, А.В. Смагин, 2021



для верного предсказания интенсивности переноса влаги и водорастворимых загрязнений от поверхности к зеркалу грунтовых вод.

Актуальность и практическая значимость диктуют необходимость разработки математической модели этого явления.

В физике почв движение влаги в ненасыщенной зоне описывается уравнением Ричардса [20]:

$$\frac{\delta s}{\delta t} = \frac{\delta}{\delta x} (D(s) \frac{\delta s}{\delta x}) \quad (\text{B.1})$$

Здесь  $s$  – влажность исследуемой почвы (пористой структуры)  $t$  – время,  $x$  – пространственная координата,  $D(s)$  – коэффициент диффузивности,  $D(s) = K\delta\psi/\delta s$ , где  $K$  – коэффициент влагопроводности,  $\psi = \psi(s)$  – капиллярный потенциал влажности исследуемой почвы (пористой структуры).

Характерной особенностью «пальцев» является немонотонность профилей давления и насыщенности их в поперечном сечении. Эта немонотонность приводит к тому, что насыщенность в теле пальца оказывается выше, чем насыщенность вне его. В то же время поток влаги, определяемый градиентом давления, оказывается направлен к оси пальца. В сложившейся ситуации высоконасыщенный палец не отдает влагу окружающей среде, а, напротив, иссушает её [14, 17, 18].

Подобная тенденция подтверждается рядом экспериментов [1, 5], что ставит под сомнение возможность применения модели Ричардса для описания переноса влаги в ненасыщенной пористой среде. Таким образом, традиционные модели (в том числе и модель Ричардса) оказываются малопригодными в ситуации описания процессов пальцеобразования. В работе [3] доказывается полная устойчивость модели Ричардса, что фактически подтверждает изложенную ранее гипотезу о ее неприменимости.

Наибольший вклад в теорию нестационарных течений внес S. Majid Hassanizadeh. В работах [15, 16, 17] он предлагает необходимое ограничение, накладываемое на возможные релаксационные модификации модели Ричардса в виде энтропийного неравенства:

$$\frac{\delta s}{\delta t} (p - P(s)) \geq 0 \quad (\text{B.2})$$

Им также была предложена одна из таких модификаций, известная как модель P-релаксации:

$$\tau \frac{\delta s}{\delta t} = p - P(s) \quad (\text{B.3})$$

Здесь  $\tau$  – коэффициент релаксации,  $s$  – влажность почвы (пористой структуры),  $p$  – давление жидкости,  $t$  – время.

В дальнейшем, улучшение данной модели было предложено Р.З. Даутовым и А.Г. Егоровым [4]. Модель S-релаксации, предложенная ими, вместо (B.3) использует релаксационный закон вида:

$$\tau \frac{\delta s}{\delta t} = S(p) - s \quad (\text{B.4})$$

Отличия этих моделей заключаются в следующем:

Традиционно для описания процесса влагопереноса в однородной ненасыщенной пористой среде используется модель Ричардса, которая представляет собой комбинацию уравнения неразрывности, закона Дарси и равновесной капиллярной зависимости. При отсутствии источников или стоков жидкости она имеет следующий вид:

$$\frac{\delta s}{\delta t} - \nabla(K(s)\nabla p) - \frac{\delta}{\delta z} K(s) = 0 \quad (\text{B.5})$$

Здесь  $s$  – относительная водонасыщенность ( $s \in [0,1]$ ),  $p$  – давление жидкости,  $K$  – относительная фазовая проницаемость,  $z$  – вертикальная координата, противоположная по направлению силе тяжести.

В работах ряда авторов [3, 16] уравнение (B.5) дополняется дифференциальным включением вида  $p = P(s)$ . Функция  $P(s)$  определяет равновесное капиллярное давление, отвечаю-

щее заданному уровню водонасыщенности. Для того, чтобы модель Ричардса работала и в полностью насыщенных областях, зависимость  $p = P(s)$  дополняется при  $s = 1$  вертикальным отрезком  $0 \leq p < \infty$ . При этом соотношение  $p = P(s)$  понимается как многозначное включение, что затрудняет математический анализ данной функции. Исходя из этого, удобно ввести обратную к  $P$  однозначную функцию  $S$ , записав её в виде:

$$S(p) = s \quad (B.7)$$

Введение этой функции позволяет решать уравнение (B.5) и его включение  $p = P(s)$  для давления как первичной переменной.

В работе [3] приводится подробный анализ устойчивости как модели Ричардса, так и моделей P- и S-релаксации. В заключение своей работы автор делает вывод о том, что, в виду как (B.7), так и проведенного им анализа, модель S-релаксации является наиболее применимой модификацией уравнения Ричардса.

Впрочем, автор делает вывод о том, что модель пока нельзя применять на должном уровне, поскольку для внятного ее применения, необходимо определять используемый в модели коэффициент  $\tau$ .

Попытки создания и модификации моделей дали определенное понимание некоторых аспектов проблемы, однако существует ряд проблем и недочётов. Ключевой проблемой является отсутствие прямых лабораторных измерений коэффициента релаксации в модификациях базовой модели Ричардса, учитывающих время релаксации к равновесию. Тем не менее, как уже было сказано выше, в данной работе было предложено решение данной проблемы с использованием метода центрифугирования для получения основной гидрофизической характеристики.

Целью данной работы является количественное исследование и моделирование эффекта гидродинамической неустойчивости массопереноса воды в естественных и сконструированных в лаборатории почвенных профилях (насыпных системах).

Для реализации поставленной цели сформулированы следующие задачи:

1. Систематизировать возможные случаи неустойчивости фронта впитывания на границах смены свойств почвенных горизонтов
2. Проанализировать существующие модели движения влаги в почве
3. Выбрать наиболее адекватную модель массопереноса влаги в почве с эффектом гидродинамической неустойчивости
4. Разработать методику количественной оценки параметра релаксации ОГХ к равновесию с использованием метода центрифугирования
5. Провести определение гидродинамических функций на образце крупнозернистого кварцевого песка как физической капиллярной модели водоудерживания.

## ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Исследуемым объектом стал образец крупнозернистого кремниевого песка.

Образцы песка в объемах  $40 \text{ см}^3$  были подвержены центрифугированию на центрифуге ЦЛС-3 (центрифуга лабораторная стационарная). Задавая различное количество оборотов, через определенные промежутки времени экспериментаторами определялась влажность ( $W, \%$ ) образцов песка. Сведения о данном эксперименте приведены в табл. 1.

Таблица 1. Результаты центрифугирования образцов песка.

Скорость центрифугирования, об/мин											
100		500		1000		2000		3000		4500	
$t$ , час	$W$ , %	$t$ , час	$W$ , %	$t$ , час	$W$ , %	$t$ , час	$W$ , %	$t$ , час	$W$ , %	$t$ , час	$W$ , %
0	28.92	0	25.15	0	7.76	0	5.55	0	4.56	0	4.00
1	25.6	1	16.55	1	6.59	1.5	5.16	1	4.44	3	3.55
2	25.17	2	11.73	2	6.16	3	4.96	3	4.23	6	3.26
3	25.15	5	8.31	4	5.61	5	4.67	5	4.17	8.5	3.20
		6	7.76	5	5.55	7.5	4.56	9	4.00	13.5	2.99

Примечание.  $t$  – время, час;  $W$  – влажность, %.

Согласно методу, описанному в [10, 21], производилось определение коэффициента релаксации  $\tau$ .

Для описания процесса центрифугирования используется линейная релаксационная модель вида:

$$\frac{dW}{dt} = k(W_p - W) \quad (0.1)$$

где  $W_p$  – равновесная влажность,  $k$  – кинетическая константа релаксации [21].

Если влажность почвы больше, чем равновесная влажность,  $\dot{\theta} < 0$ , образец будет иссушаться. В противном же случае, образец будет увлажняться. При  $\dot{\theta} = 0$ , в системе наступает динамическое равновесие. Решением дифференциального уравнения (0.1) служит зависимость:

$$W_t = W_p + (W_0 - W_p) * e^{(-kt)}, \quad (0.2)$$

где  $W_0$  – начальная влажность образца на данном этапе центрифугирования.

Применяя (0.1) и (0.2) к феноменологическому уравнению переноса влаги применительно к условиям центрифугирования [10, 21] при  $t = 0$ , получим:

$$k = \frac{K_{\text{ц}}(100\rho_i(P_{\text{ц}} - P_0))}{(W_0 - W_p)h^2\rho_b}, \quad (0.3)$$

Проводя ряд модельных экспериментов, можно вычислить значения коэффициента  $k$ , причем не только для одной равновесной ОГХ, но и для промежуточных стадий в виде функций давление (влажность), не достигших равновесия, для различных видов песков.

Зная величину коэффициента  $k$  легко рассчитать величину коэффициента  $\tau$ , поскольку они связаны между собой соотношением:

$$\tau = \frac{\ln W/W_0}{k}, \quad (0.4)$$

Данные, описанные в табл. 1, использовались для расчета. Путем деления влажности на полную влагоемкость получены величины  $s$ . Далее, в программе  $\Sigma$ -plot, зависимость  $s(t)$  аппроксимирована функцией вида  $f = a + (y_0 - a)e^{(-bx)}$ , где  $f = s$ ,  $t = x$ . Таким образом, для разных давлений получена величина константы  $b$ . По ней легко рассчитать параметр релаксации  $\tau$ .

$$\tau = \ln \frac{s_0 - s(p)}{0.01s(p)}, \quad (0.5)$$

где  $s_0$  – исходная влажность почвы. В начале опыта,  $s(p)$  – равновесная влажность (последнее значение влажности для данной скорости вращения).

Используя полученную величину  $\tau$  можно определить изображение релаксации основной гидрофизической характеристики через различные промежутки времени.

Взяв для расчета модель влажности (0.2) с известными теперь величинами  $k$ , можно рассчитать влажности через случайные промежутки времени. В данной работе это 15, 30, 60, 75 и 120 минут. Полученные значения влажности использовали для построения зависимостей  $P(W)$ , не достигших равновесия. Эти зависимости аппроксимировали уравнением ван-Генухтена.

Полученные параметры уравнения использовали для определения почвенно-гидрологических констант и распределения пор по размерам по методу, описанному в [10].

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В первую очередь, по уравнениям (0.7) и (0.8) и данным из табл. 1 определены последовательно величины коэффициентов  $k$  и  $\tau$  для разных давлений жидкости. Данные вычислений представлены в табл. 2.

Таблица 2. Величины коэффициентов  $k$  и  $\tau$  для разных давлений.

Давление		$k$	$\tau$
Оборотов в минуту	Рк-с. кПа		
100	0.3	2.09	4662.07
500	5	0.69	28236.96
1000	20	0.65	20398.70
2000	78	0.25	44278.53
3000	175	0.20	47649.16
4500	394	0.17	74453.91

Примечания: Рк-с – капиллярно-сорбционное давление жидкости,  $k$  – кинетическая константа релаксации,  $\tau$  – коэффициент релаксации.

Коэффициент релаксации показывает устойчивую зависимость от давления жидкости. Эту зависимость можно аппроксимировать уравнением показательной функции. График зависимости коэффициента релаксации от давления представлен на рис. 1.

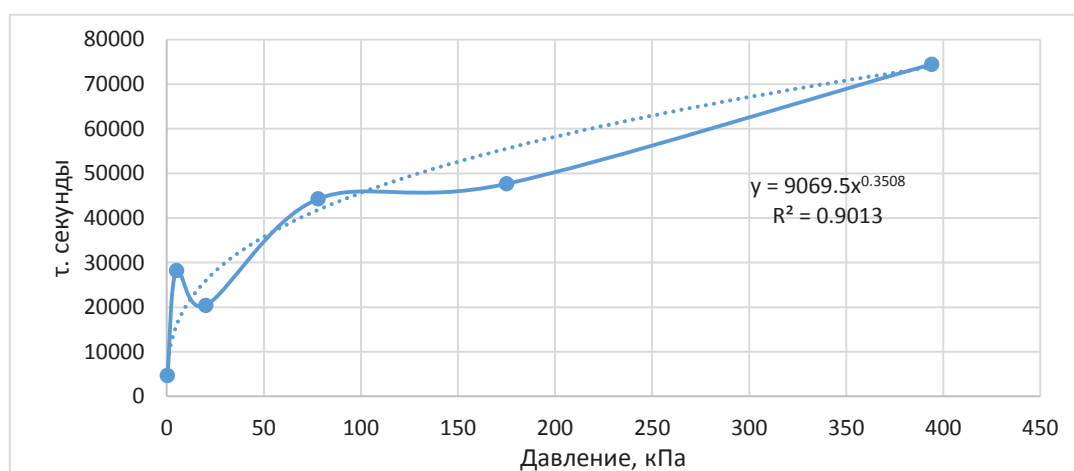


Рисунок 1. Зависимость  $\tau$  от давления.

Зная зависимость коэффициента релаксации от давления, можно, используя уравнение (0.2), рассчитать значения влажностей через произвольные промежутки времени. В работе такими промежутками были избраны 15, 30, 60, 75 и 120 минут.

После расчета влажностей, можно построить графики зависимостей  $P(W)$ , являющие собой графическое описание достижения основной гидрофизической характеристикой равновесия. Эти зависимости, равно как и равновесная ОГХ отображены на рисунках 2–4. Кроме того, полученные зависимости проверялись путем аппроксимации по уравнению ван-Генухтена. Как можно видеть на рисунках 2–4, степень аппроксимации весьма высока.

На рисунках можно отчетливо заметить постоянное изменение по мере установления равновесия основной гидрофизической характеристики, максимально выраженное в капиллярной области до  $P=10-30$  кПа. Именно эта область подвержена неустойчивости и в ней максимально выражен капиллярный гистерезис гидрофизических свойств почвы.

Для наглядности различий равновесной и неравновесных гидрофизических характеристик и связанных с ними свойств структурно-функциональных физических почвы проанализировали расчетные показатели распределения пор по размерам и почвенно-энергетические константы (ПЭГ), используя аппроксимацию ОГХ моделью ван-Генухтена и предложенные в [10] методики.

Как можно видеть на рис. 5, при стремлении к равновесию наблюдается постепенный сдвиг максимумов пор (доминирующего в спектре класса) в сторону укрупнения. В то же время доля мелких пор уменьшается. То есть неравновесные ОГХ имитируют более высокую водоудерживающую способность, присущую почвам более тяжелого гранулометрического состава и, соответственно, с доминирующими более мелкими порами в структуре порового пространства.

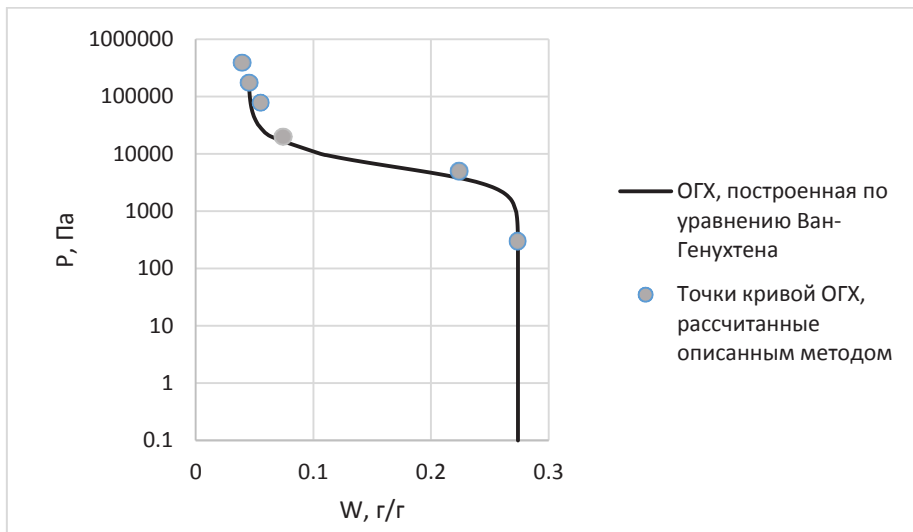


Рисунок 2. ОГХ для образцов через 15 минут после начала центрифугирования.

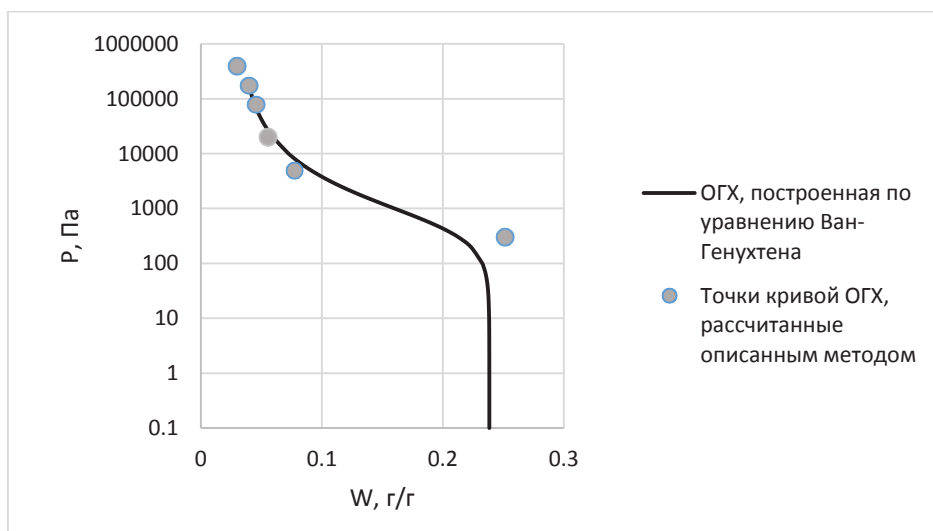


Рисунок 3. ОГХ, пришедшая в равновесие.

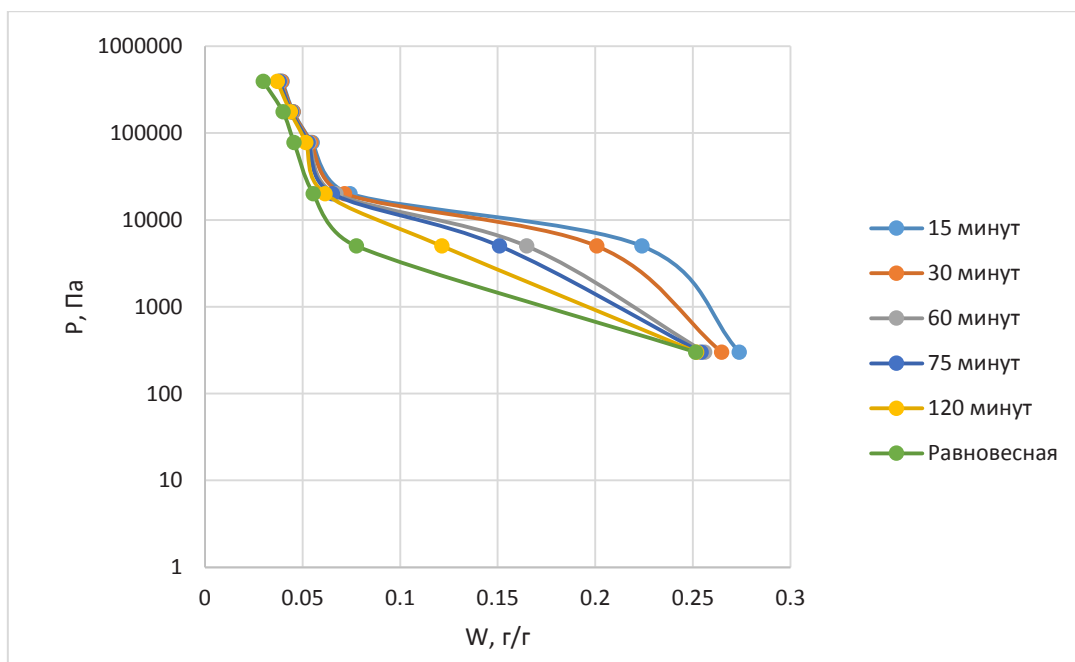


Рисунок 4. Установление равновесия ОГХ.

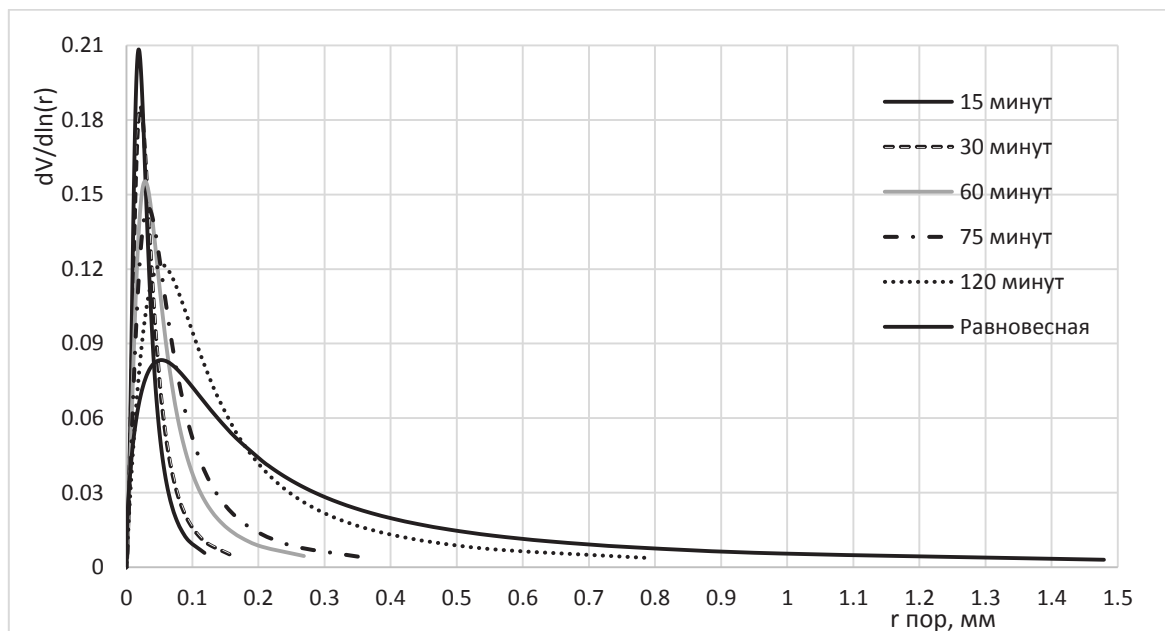


Рисунок 5. Распределение пор крупнозернистого по размерам в ходе релаксации ОГХ.

Сходным образом изменения в ОГХ по мере их движения к равновесию отражаются и на расчетных характеристиках почвенно-энергетических констант (рис. 6).

В области, где предположительно исчезает доминирование капиллярных сил исследуемого песчаного субстрата (более 10–20 кПа) неравновесные и равновесные кривые ОГХ становятся близкими друг к другу. Поэтому рассчитанные по секущим А.Д. Воронина почвенно-гидрологические константы (ПГК) (см. рис. 6) в принципе отличаются мало, и их различия находятся в пределах варьирования ПГК, известного для песков.

Смагин высказал сомнение в пригодности метода секущих Воронина для определения наименьшей влагоемкости (НВ) в песках [22], поскольку капиллярное давление в 14.7 кПа и более, используемое в качестве критического в этом методе явно удаляет в песках практически всю воду, занижая тем самым величину НВ. С его точки зрения правильнее использовать для определения НВ давление, эквивалентное высоте капиллярного поднятия, которое для данного песчаного субстрата составило 48 см ( $P=4.8$  кПа). Оцененная по такой секущей НВ менялась от 23 % (15 мин ОГХ) до 8 % (равновесная ОГХ). То есть по данному показателю неравновесное состояние также отличается существенным завышением, вплоть до значений, свойственных суглинистым почвам).

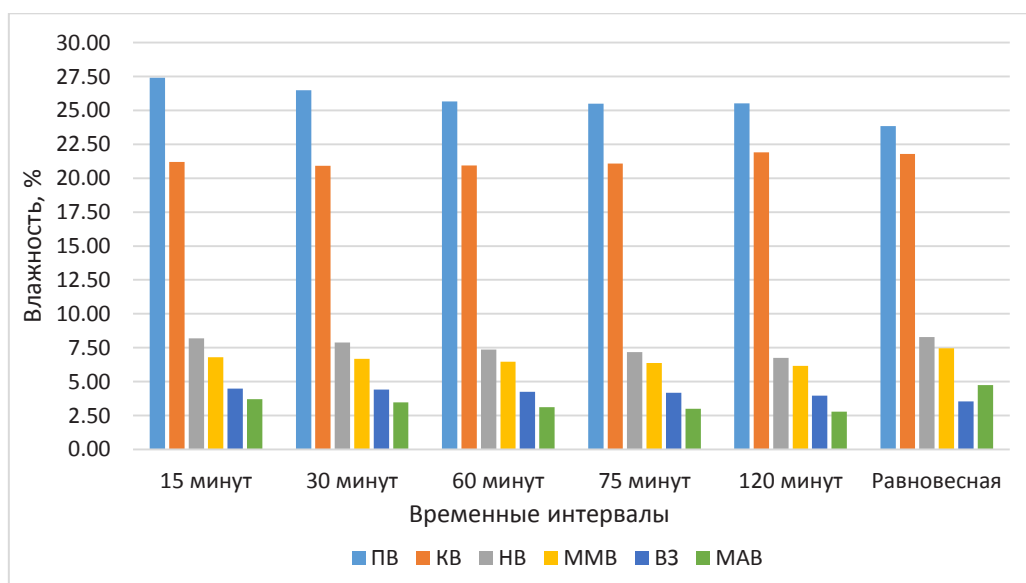


Рисунок 6. Изменение ПГК в ходе релаксации ОГХ

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результатом настоящей работы стало следующее:

1. Систематизированы возможные случаи неустойчивости фронта впитывания
2. Произведен анализ существующих моделей движения влаги в почве
3. Выбрана наиболее адекватная модель массопереноса влаги с эффектом гидродинамической неустойчивости
4. Разработана методика количественной оценки параметра релаксации ОГХ к равновесию с использованием метода центрифугирования
5. Проведено определение гидродинамических функций на образце крупнозернистого кварцевого песка как физической капиллярной модели водоудерживания.

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Абрамова М.М.* Опыты по изучению передвижения капиллярно-подвешенной влаги при испарении // Почвоведение. – 1948. № 1.
2. *Абрамова М.М.* Передвижение воды в почве при испарении // Труды Почв, ин-та им. В.В. Докучаева. – М., 1953. – Т. 41.
3. *Гоголашвили Б.Э.* Неустойчивость гравитационных фронтов пропитки и процессы пальцеобразования в ненасыщенной пористой среде: дис. ... канд. физ-мат. наук: 01.02.05. Казань, 2008. 121 с.
4. *Даутов Р.З., Егоров А.Г.* Моделирование неустойчивости влагопереноса в ненасыщенных пористых средах // Исследования по прикладной математике и информатике. – Казань: Казанский государственный университет, 2003. – Вып. 24. 180 с.
5. *Дмитриев С.И., Нечаев В.К.* К вопросу о применимости уравнения диффузии для изучения явления влагопроводности в почвогрунтах // Труды ЛГМИ. – 1962. – Вып. 13.
6. *Кулик В.Я.* Исследование уравнений движения почвенной влаги с точки зрения инвариантности относительно непрерывных групп преобразований // Исследование процессов обмена энергией и веществом в системе почва-растение-воздух: сб. ст. – Л.: Наука, 1972
7. *Лыков А.В.* Применение методов термодинамики необратимых процессов к исследованию тепло- и массообмена // Инженерно-физический журнал. – 1965. – Т. 9. – № 3.
8. *Роде А.А.* Основы учения о почвенной влаге / А.А. Роде. – Л.: Гидрометеиздат, 1965. – Т. 1. 663 с.
9. *Смагин А.В.* Теория и практика конструирования почв. М.: Издательство Московского университета, 2012. 544 с., ил.
10. *Смагин А.В., Садовникова Н.Б.* «Влияние сильнонабухающих полимерных гидрогелей на физическое состояние почв легкого гранулометрического состава». М.: МАКС-ПРЕСС, 2009, 208 с.
11. *Толстыгин К.Д., Смагин А.В.* Неустойчивость фронта впитывания как ключевой фактор загрязнения подземных вод // Почвоведение: Горизонты будущего 2020. Сборник тезисов докладов Четвертой открытой конференции молодых ученых Почвенного института им. В.В. Докучаева. – Москва: 2020. С. 63–64.
12. *Толстыгин К.Д., Смагин А.В.* Неустойчивость фронта впитывания как ключевой фактор загрязнения подземных вод // Сборник тезисов Международной научной конференции XXIII Докучаевские молодежные чтения «Почва в условиях глобального изменения климата». – СПб.: 2020.
13. *Юзефович Г.И., Янгарбер В.А.* Исследование нелинейного уравнения влагопереноса // Сб. трудов по агрономической физике. – Л., 1967. – Вып. 14.
14. *Glass R.J., Steenhuis T.S., Parlange J.-Y.* Mechanism for finger persistence in homogenous unsaturated, porous media: Theory and verification // Soil Sci. – 1989. – Vol. 148. P. 60–70.
15. *Hassanizadeh S.M.* Dynamic effects in the capillary pressure-saturation relationship // 4th Int. Conf. on Civil. Eng. – Teheran, Iran, 1997. – Vol. 4. – P. 141–149.
16. *Hassanizadeh S.M., Gray W.G.* Mechanics and thermodynamics of multiphase flow in porous media including interphase boundaries // Adv. Water Resour. – 1990. – Vol. 13. P. 169–186.

17. *Hassanizadeh S.M., Gray W.G.* Thermodynamic basis of capillary pressure in porous media // *Water Resour. Res.* – 1993. – Vol. 29. – P. 3389–3405.
18. *Hill S.* Channelling in packed columns // *Chem. Eng. Sci.* – 1952. – No. 1. – P. 247–253.
19. *Liu Y., Steenhuis T.S., Parlange J.-Y.* Formation and persistence of fingered flow fields in coarse grained soils under different moisture contents // *J. Hydrol.* – 1994. – Vol. 159. P. 187–195.
20. *Richards L.A.* Capillary conduction of liquids through porous mediums / L.A. Richards // *Physics.* – 1931. – Vol. 1. P. 318–333.
21. *Smagin A.V., Sadovnikova N.B., Mizun Maauia Ben Ali.* The Determination of the Primary Hydrophysical Function of Soil by the Centrifuge Method // *Eurasian Soil Science* Vol. 31. – 1998. – № 11. P. 1237–1244.
22. *Smagin A.V.* Theory and Methods of Evaluating the Physical Status of Soils // *Eurasian Soil Sci.*, 2003. Vol. 36, № 3, pp. 301.

## ABSORPTION FRONT INSTABILITY AS A KEY FACTOR IN GROUNDWATER POLLUTION

K.D. Tolstygin, A.V. Smagin

Lomonosov Moscow State University

The paper reveals the formation of instability of the absorption front and the processes of finger formation. The analysis of existing mathematical models of these processes is given and the question of their applicability is considered. The topic of calculating the relaxation coefficient is disclosed: a detailed technique for laboratory determination and further calculation is given.

*Keywords:* finger formation, mathematical modeling, Richards's equation, soil-hydrological constants, relaxation, water retention curve.

УДК 631.43

## ОЦЕНКА УСТОЙЧИВОСТИ ПОЧВЕННОЙ СТРУКТУРЫ НЕКОТОРЫХ ПОЧВЕННЫХ РАЗНОСТЕЙ о. КОЛГУЕВ К МЕХАНИЧЕСКИМ ВОЗДЕЙСТВИЯМ

А.Э. Тыниссон

Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова

В работе представлены результаты оценки почвенной структуры о. Колгуев механическим воздействием, в которые вошли реологические исследования, анализа гранулометрического состава почв острова Колгуев и построенные по итогам работы карты почв.

*Ключевые слова:* реология, межчастичные взаимодействия, гранулометрический состав.

### ВВЕДЕНИЕ

Изучение северных арктических регионов в настоящее время чрезвычайно актуально как в связи с глобальным потеплением, так и в свете экономического освоения Арктики. Также важны и научные исследования для заполнения пробелов в почвенной картографии и физике почв. Работа выполнена по материалам острова Колгуев, который не изучался ранее так детально.

### ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ

Целью работы была оценка почвенной структуры механическим воздействием. Задачами исследования стали: определение реологических свойств и гранулометрического состава, построение цифровой карты по полученным данным.



## ОБЪЕКТЫ

Объектами исследований стали 14 образцов из четырех почвенных разрезов: *подбур контактно-осветленный, глеезем криометаморфический перегнойный криогенно-ожелезненный, глеезем криотурбированный потечногумусовый, криометаморфическая глееватая почва*. Образцы отобраны Шматовой А.Г. В ходе экспедиции Института географии РАН летом 2018 г.

## МЕТОДЫ

Определение гранулометрического состава: метод лазерной дифракции

Для определения был применен метод лазерной дифракции частиц. Образцы почв подвергались воздействию ультразвука в течение 3 минут, затем анализировались на приборе «Analysette 22 comfort». Расшифровка полученной дифракционной картины позволила рассчитать процентное содержание частиц разного размера [1]. Область измерения составляет от 0.01 до 1250 мкм.

Определение реологических свойств: метод амплитудной развертки

Испытания проводились при капиллярном суточном увлажнении почвенных навесок на модульном компактном реометре MCR-302. Почвенные пасты были подготовлены из воздушно-сухих образцов почв о. Колгуев, предварительно просеянных через сито 1 мм. Перед началом испытания образцы почв выдерживались на влажной фильтровальной бумаге в течение суток. Прибор передает данные в вычислительную систему, которая выдает поведение исследуемого образца через комплекс параметров:  $G^*$  [Pa] – комплексный модуль,  $G'$  [Pa] – модуль накопления или модуль упругости,  $G''$  [Pa] – мера энергии деформации, израсходованной во время процесса сдвига и потерянной для образца.

Таким образом, в специальном программном обеспечении системой рассчитывается график зависимости  $G'$ ,  $G''$  и  $\gamma$  (деформация, %), по которому осуществляется анализ реологического поведения образца [3].

Почвенная картография

Для создания почвенной карты (работа выполнена Шматовой А.Г.) производилась дешифрирование космических снимков методом неконтролируемой классификации (IsoData), с экспертным присвоением значений содержания полученным классам, основанном на полевых данных. Для классификации снимков и первичной обработки использован программный пакет SCANEX Image Processor. Корректировка почвенных контуров в виде векторных полигонов и окончательная обработка карты производились на базе программ ArcGIS 10.5. (ArcMap).

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЯ

Определение гранулометрического состава

У глеезема криометаморфического гранулометрический состав довольно неоднороден по профилю (рис. 1). Так, в горизонте G<sub>0x</sub> (15–19 см) наблюдается наибольшее содержание мелкой пыли, а к нижнему горизонту увеличивается значение фракции тонкого песка. В целом, все особенности распределения частиц связаны с особенностями гранулометрического состава пород, которые представлены песчаными и супесчаными отложениями. Название почвы по классификации 1977 г. – тяжелый суглинок песчано-пылеватый.

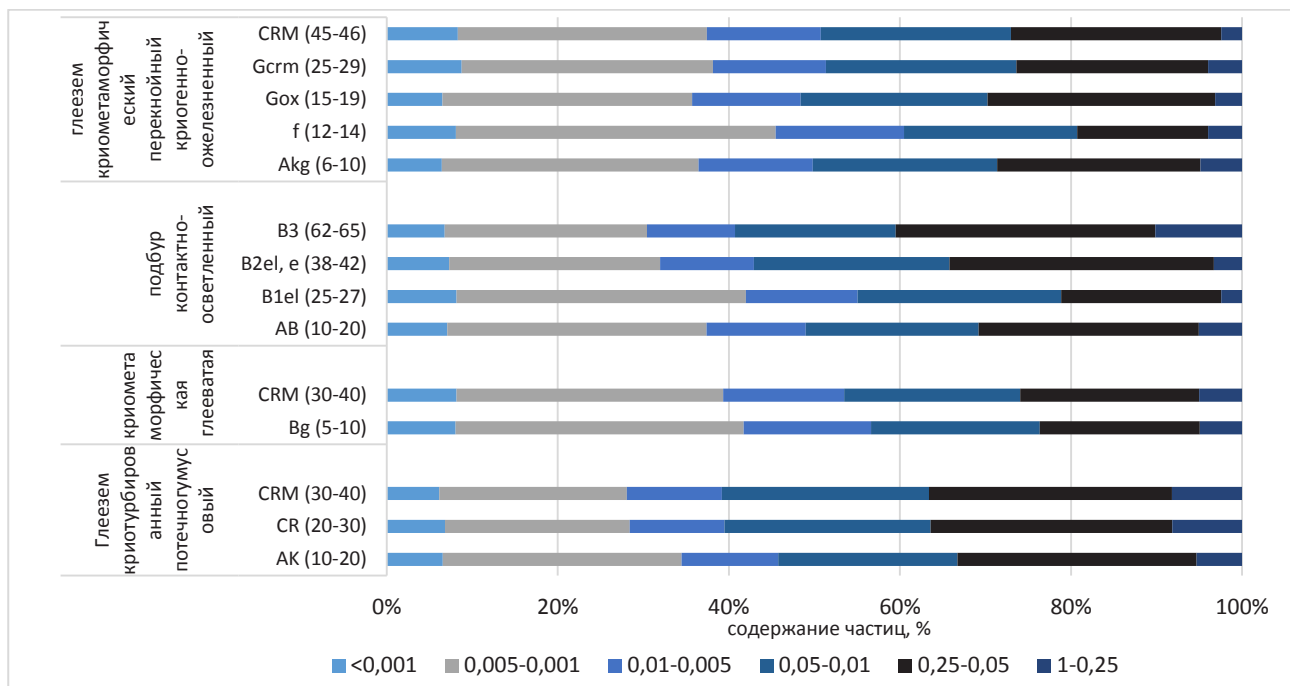


Рисунок 1. Распределение частиц по размерам в почвах.

У подбура контактно-осветленного в горизонте B1el (25–27 см) наблюдаются максимальные значения крупной пыли в профиле, а фракция песка резко увеличивается в нижележащем горизонте B2el (38–42 см). Связано это может быть с особенностями как почвообразовательного процесса (в профиле есть осветленный горизонт с признаками оподзоливания), так и с гранулометрическим составом пород – песчаные и супесчаные. По классификации 1977 г. – суглинок пылеватый.

У криометаморфической глееватой почвы в горизонте Bg преобладающая фракция – мелкая пыль, а в горизонте CRM – тонкий песок, т.е. вниз по профилю происходит укрупнение или облегчение гранулометрического состава (рис. 1). Связано это скорее всего с особенностями материнской породы, в составе которой преобладает песчаная фракция. По классификации 1977 г. – глина легкая песчано-пылеватая.

У глеезема криотурбированного потечногумусового в профиле больше всего содержится частиц фракции тонкого песка. С ростом глубины наблюдается уменьшение содержания физической глины и увеличение содержания физического песка, что связано с почвообразующими породами. По классификации 1977 г. – тяжелый суглинок пылевато-песчаный.

#### Реологический анализ

По значению диапазона линейной вязкоупругости все четыре почвы занимают практически равные позиции (рис. 2). Структура из состояния линейной вязкоупругости в состояние пластичного тела переходит довольно быстро по сравнению с такими зональными почвами, как, например, черноземы.

В автоморфных условиях на водоразделе наиболее упругие и прочные межчастичные контакты в диапазоне LVE-range формируются в подбуре контактно-осветленном, в частности, в горизонте B3. Об этом свидетельствуют высокие значения модуля упругости в диапазоне линейной вязкоупругости (рис. 3), низкое содержание гумуса и высокое – альфегумусовых соединений. Глеезем криометаморфический занимает промежуточное положение – высокое содержание органического вещества «компенсирует» структурное действие железа. Еще ниже значения модуля упругости в диапазоне линейной вязкоупругости – у глеезема криометаморфического, имеющего самое высокое содержание гумуса и железа, что объясняется положением разреза в понижении. Глеезем криотурбированный имеет низкие значения модуля упругости, что объясняется невысоким содержанием железа и довольно высоким содержанием гумуса.

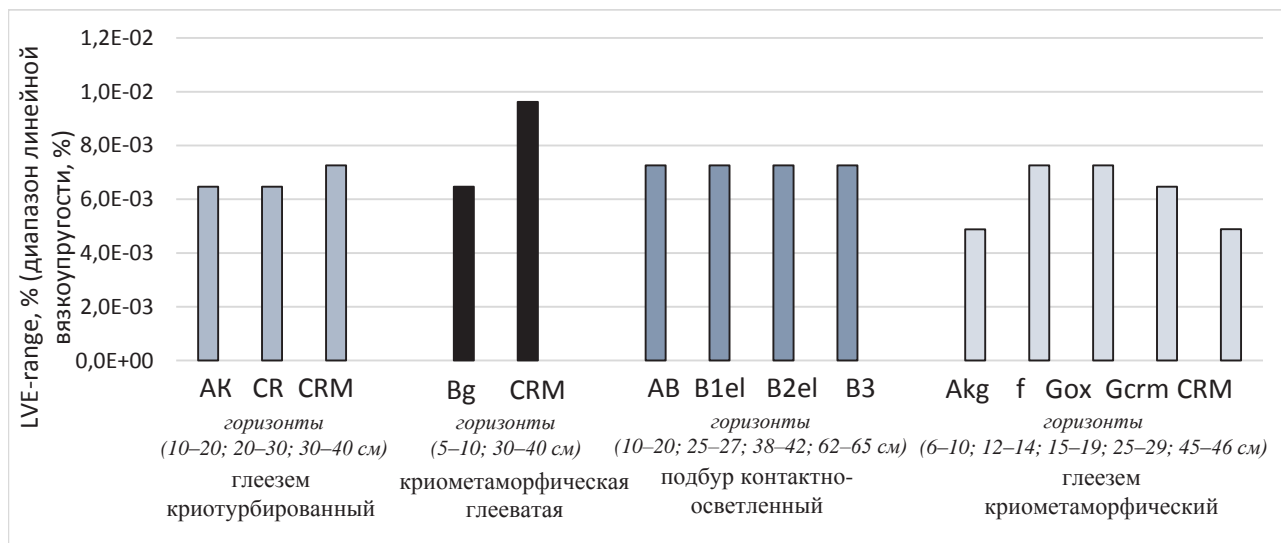


Рисунок 2. Распределение диапазона линейной вязкоупругости в почвах.

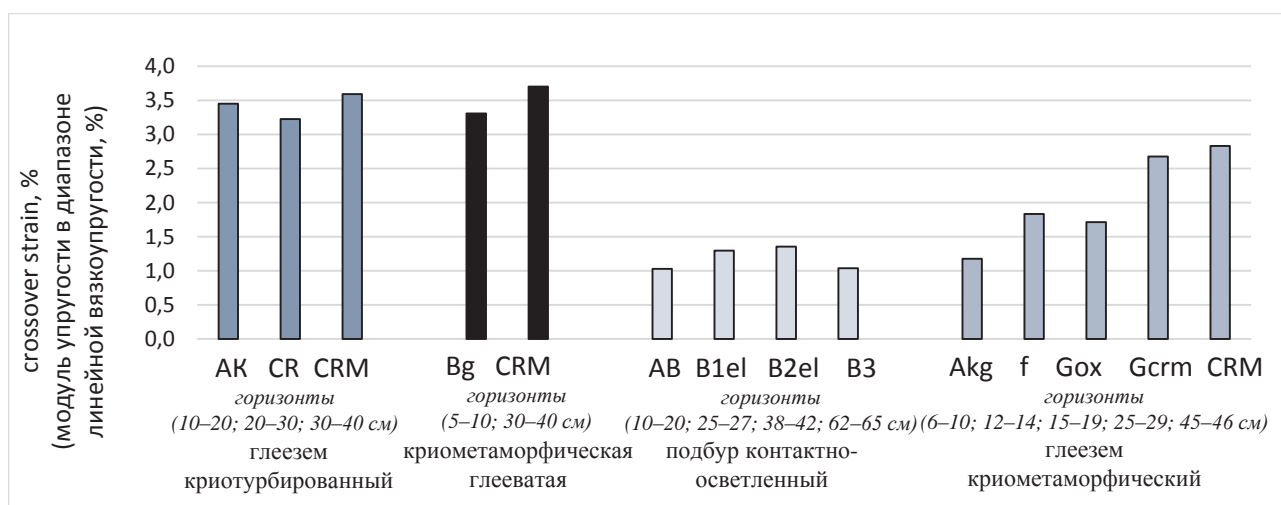


Рисунок 3. Распределение значения модуля упругости в диапазоне LVE-range Па в почвах.

Наименее устойчивая к деформации почва – подбур контактно-осветленный. Непрочная и ломкая структура почвы связана с упруго-хрупкими межчастичными взаимодействиями (рис. 4). Для значения деформации глеезема криометаморфического наблюдается несколько больший диапазон пластичного поведения, что объясняется высоким содержанием органического вещества и железа. Сцепленные органические компоненты действуют подобно пружине, увеличивая упругое сопротивление почвы в начале деформационного воздействия [2]. Однако при этом теряется общая жесткость структуры. Значение деформации для глеезема криотурбированного и криометаморфической глееватой почвы более высокие, чем у двух предыдущих почв.

Так как подбур контактно-осветленный наименее устойчив к деформации, при прочных межчастичных контактах, в силу малого содержания гумуса, опесчаненного гранулометрического состава, у этой почвы небольшой диапазон пластичного поведения и при увеличении нагрузки происходит хрупкое разрушение структуры (рис. 5). Несколько больший диапазон пластичного поведения наблюдается в глееземе криометаморфическом. Для глеезема криотурбированного и криометаморфической глееватой почвы характерны довольно низкие значения предела пластичности, при низких значениях модуля упругости в диапазоне линейной вязкоупругости и высоких деформации, т.е. почвы начинают разрушаться медленнее за счет упруго-пластичных свойств.

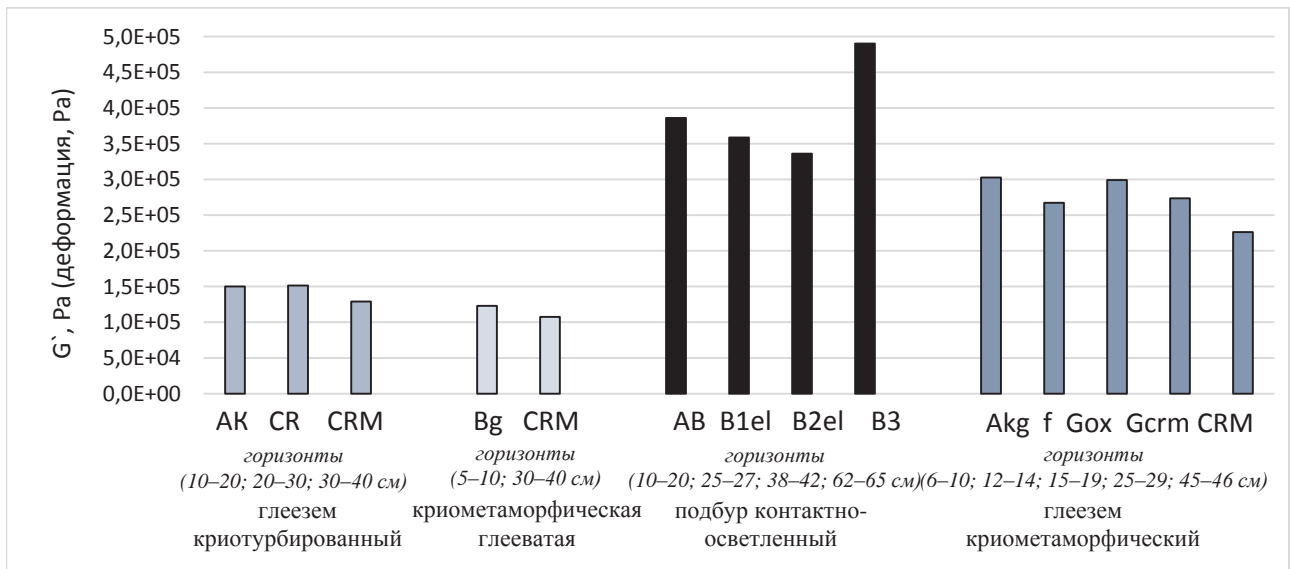


Рисунок 4. Значения деформации в точке равенства модулей в почвах.

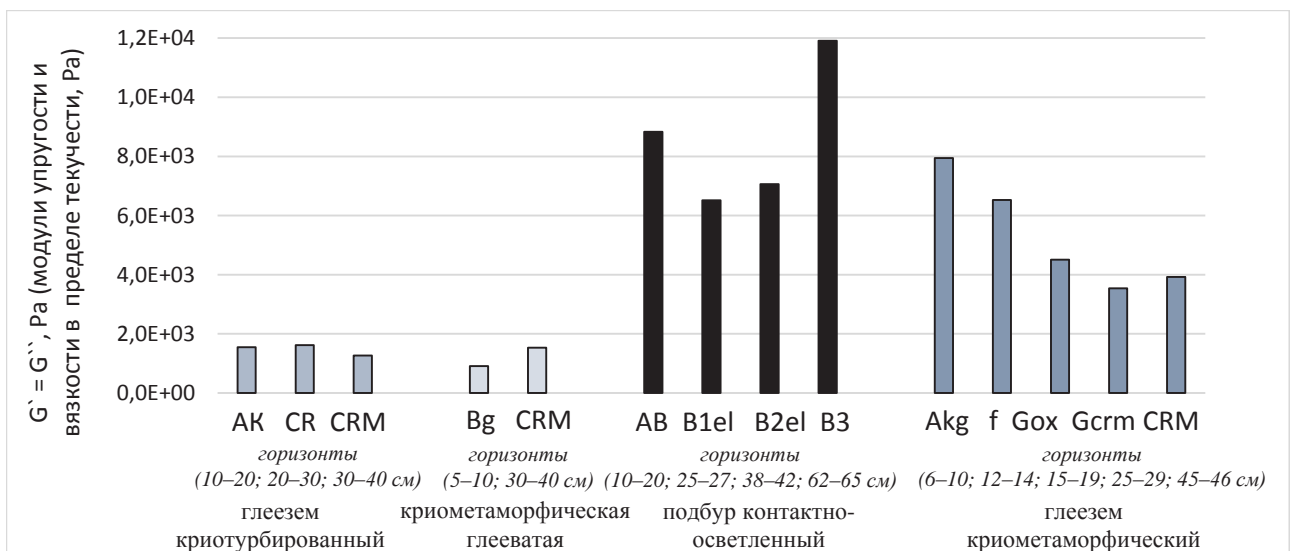


Рисунок 5. Значение модулей упругости и вязкостей пределе текучести в почвах.

### Картографирование территории

Согласно почвенной карте, составленной Шматовой А.Г., в центральной части острова Колгуев преобладают глееземы, торфяно-глееземы и криометаморфические почвы (рис. 6).

Результаты реологических исследований легли в основу карты модуля упругости в диапазоне линейной вязкоупругости (выполнено Шматовой А.Г.) (рис. 7). Поскольку глееземы, широко распространенные на исследуемой территории, имеют низкие значения данного параметра, соответственно, на большей части Центрального региона острова преобладают почвы со слабыми межчастичными взаимодействиями.

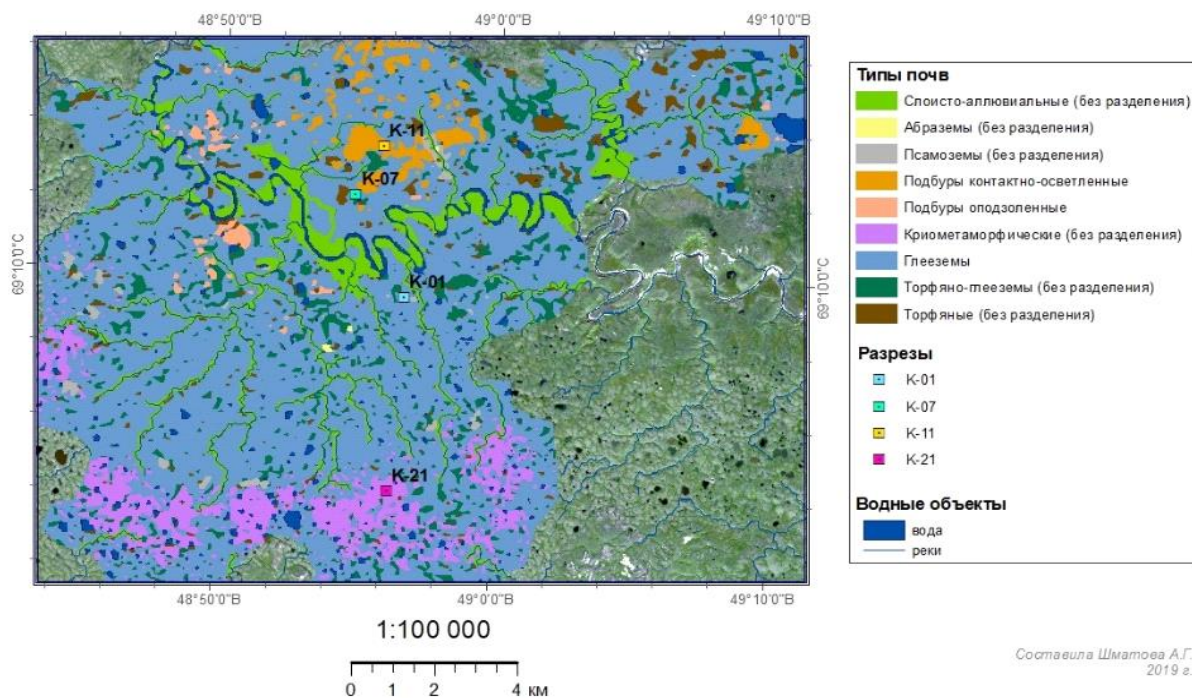


Рисунок 6. Почвенная карта острова Колгуев масштаба 1:100 000.

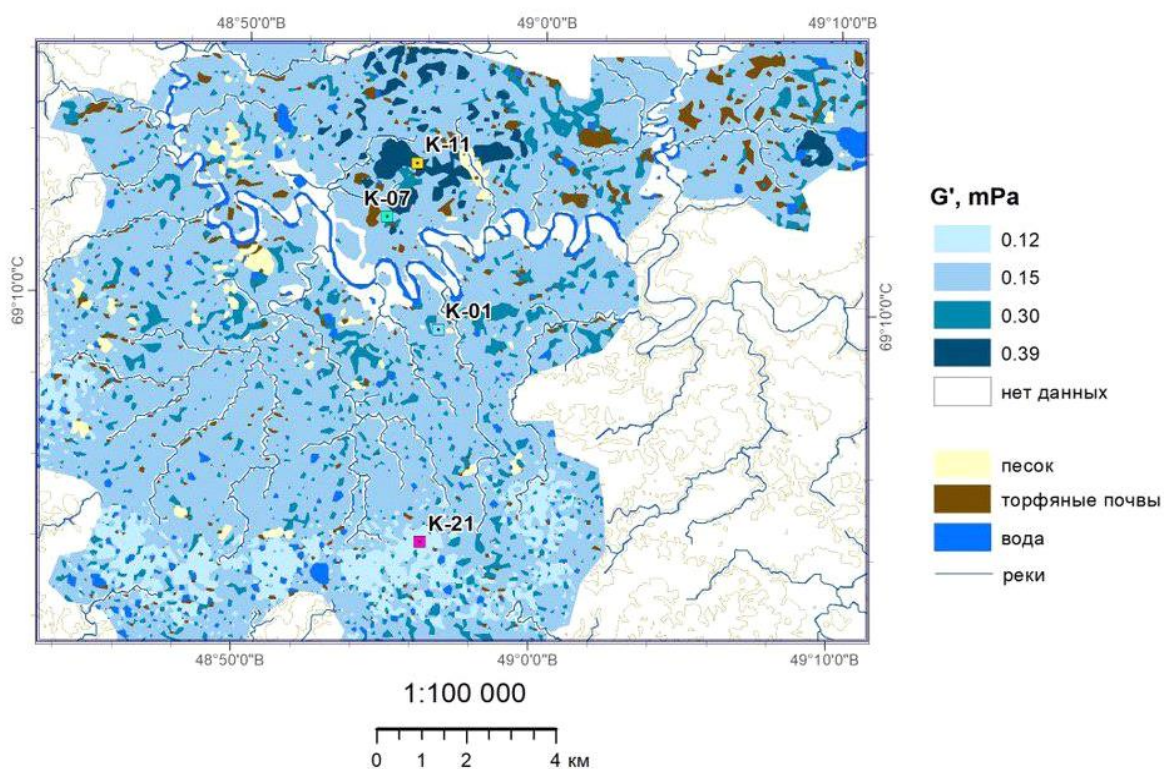


Рисунок 7. Почвенная карта Центральной части острова Колгуев по значению модуля упругости в диапазоне LVE-range.

## ВЫВОДЫ

1. В двух почвах (подбур контактно-осветленный и криометаморфическая глеевая) наблюдается прямая зависимость между почвообразующими породами и распределениями фракций по почвенному профилю – к нижним горизонтам падает содержание физической глины и растет содержание физического песка.

2. Все исследованные почвенные разности характеризуются слабыми коагуляционными связями и неустойчивы к внешним нагрузкам, о чем свидетельствует незначительный диапазон упругого поведения (LVE-range).

3. Сравнение модулей упругости в диапазоне упругого поведения показало, что наиболее жесткое сложение формируется в подбуре контактно-осветленном, данная почва не обладает пластичными свойствами и при внешних нагрузках проявляет хрупкое поведение. Глеезем криотурбированный и криометаморфическая глееватая почва характеризуются небольшим модулем упругости, при этом проявляют пластичные свойства, для них характерен повышенный предел текучести. Глеезем криометаморфический занимает промежуточное положение, для него характерно повышение предела текучести в горизонте CRM.

Согласно карте, построенной по значениям модуля упругости в диапазоне линейной вязкоупругости, в Центральной части острова Колгуев преобладают почвы с крайне слабыми межчастичными взаимодействиями.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. *Шеин Е.В. и др.* Гранулометрический состав: роль органического вещества в различиях данных седиментометрического и лазерно-дифракционного методов // Доклады по экологическому почвоведению. М., 2006 г.
2. *Шеин Е.В.* Курс физики почв. М., 2005 г.
3. *Шрамм Г.* Основы практической реологии и реометрии / Пер. с англ. И.А. Лавыгина; под ред. В.Г. Куличихина. М., 2003 г.

Работа рекомендована проф., доц. И.О. Алябиной и к.б.н., доц. Д.Д. Хайдаповой.

#### ASSESSMENT OF SOIL STABILITY STRUCTURES OF SOME SOIL DIFFERENCES OF KOLGUEV ISLAND TO MECHANICAL INFLUENCES

Tynisson Anastasia

Moscow state University

Nowadays, the study of the Northern regions is particularly relevant due to the global climate change and increasing use of permafrost soils. The purpose of this work was to assess the soil structure of four soils on Kolguev island reacting on mechanical load. In addition, textural analysis of all soil samples was carried out, and a map of the soil cover and a map of one of the rheological properties were constructed. The article presents the results of rheological studies, analysis of the textural composition of the soils of Kolguev island and soil maps based on the results of the study. In conclusion, we can say that the soils of the island have weak structural bonds and are not resistant to mechanical loading by deer.

## ИЗУЧЕНИЕ ЗАСОЛЕННЫХ ЛАНДШАФТОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДАННЫХ РАДИОЛОКАЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ НА ПРИМЕРЕ СОЛОНЧАКОВ ПРИМОРСКОЙ РАВНИНЫ ПРИКАСПИЯ

В.В. Хлюстова

Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова

В работе изучена возможность применения данных дистанционного зондирования, включая радиолокационные снимки, для исследования ландшафтов. Используются данные съемок в различных диапазонах длин волн Sentinel-1/2. Рассмотрены особенности отображения почв с разреженным растительным покровом на многозональных космических снимках. Отмечена возможность дешифрирования почв разной степени засоленности.

*Ключевые слова:* многовременной синтез, многозональный синтез, Sentinel, вегетационные индексы.

### ВВЕДЕНИЕ

Данные дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) в настоящее время являются важным компонентом ландшафтных исследований. Каждый вид космических снимков имеет свои преимущества при решении той или иной практической задачи. Наиболее полную информацию об исследуемом объекте можно получить, комбинируя различные дистанционные данные, а так же, используя результаты полевых обследований. С помощью многозональных синтезированных снимков появляется возможность проведения границ между типами растительности, участками скальных пород и почв [1]. Радиолокационные (РЛ) снимки несут в себе информацию о влажности и степени засоления почв [6]. Все сказанное указывает на актуальность разработки методик для эффективного использования многозональных снимков в целях мониторинга состояния окружающей среды, в т. ч. растительного и почвенного покровов.

Целью работы является изучение возможности применения данных РЛ космической съемки в исследованиях засоленных участков аридных ландшафтов.

В мае 2018 года во время полевых обследований были заложены и описаны почвенные разрезы, составлены ландшафтные и геоботанические описания.

### ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Исследуемая территория расположена в окрестностях с. Кочубей Тарумовского района республики Дагестан, в 200 км северо-западнее Махачкалы. По критериям ФАО/ЮНЕСКО данный участок относится к семиаридным территориям – годовое количество осадков составляет 200–400 мм, а испаряемость превышает 250 %, коэффициент увлажнения меньше 0.2. Устойчивый снежный покров образуется раз в 3–4 года на 1–7 дней [2]. В связи с этим создаются условия выпотного водного режима, что способствует аккумуляции легкорастворимых солей из грунтовых вод в почвенных горизонтах.

Почвенный покров представлен солончаками и солончаками темными, встречаются их сочетания с бурыми полупустынными и каштановыми почвами разной степени засоленности и солонцеватости. Комплексность почвенного покрова обусловлена микрорельефом. Для микроповышений характерно меньшее засоление, а в микропонижениях протекает процесс аккумуляции легкорастворимых солей. Гумусово-гидрометаморфические и перегнойно-гидрометаморфические типы почв развиты в прибрежной части и на участках, переувлажненных за счет близости грунтовых вод. Важно также отметить, что процесс миграции солей имеет обратимый характер, то есть наблюдается сезонная динамика: накопление солей в летний период и рассоление в осенне-зимний. Названия почв даны по «Классификации и диагностике почв России» 2004 г. [4].

Согласно ландшафтному районированию исследуемая территория относится к зоне пустынь континентального типа. Растительность фрагментарная, представлена преимущественно галофитами – растениями, произрастающими на сильно минерализованных субстра-

тах. Распространены полукустарнички – сведа мелколистная (*Suaeda microphylla*), поташник олиственный (*Kalidum foliatum*). Встречаются заросли многолетних трав (бескильница гигантская (*Puccinellia gigantea*), кермек каспийский (*Limonium caspium*) и однолетний злак – костер (*Bromus* sp.), свойственных умеренно засоленным почвам. Обширные площади покрыты порослью солянки заострённой (*Suaeda acuminata*). Вдоль береговой линии широкой полосой произрастает тростник обыкновенный (*Phragmites australis*).

В развитии растительности ярко выражены два пика продуктивности фитоценозов. Весеннее увеличение фитомассы связано с бурным развитием эфемеров в апреле–мае, когда устанавливаются оптимальные температуры воздуха и влажности почвы. Далее наблюдается период летнего полупокоя с июня по август, когда растительный покров сильно разрежен, напочвенный покров составляют высохшие эфемеры, жестколистные кустарнички, преимущественно экстремальные галофиты. С сентября начинается второй пик развития растительности и увеличение фитомассы галофитов. Это связано с тем, что в засушливый период водорастворимые соли подтягиваются к верхним горизонтам почвы, а в осенний период происходит оптимизация увлажнения, создавая условия для развития солелюбивой растительности.

В целом растительность формирует комплексный покров в связи с неоднородностью микрорельефа: на микроповышениях развиваются более устойчивые к дефициту влаги кустарнички и злаки под их пологом, в микропонижениях преобладают эфемерово-галофитные сообщества. Зачастую земля вовсе не покрыта растительностью, а на поверхности образуется плотная солевая корка. Установлено, что кустарниковая растительность способствует задержанию влаги, за счет чего осуществляется детоксикация – вымывание солей вниз по профилю, формирует особый микроклимат с повышенной влажностью воздуха относительно окружающего пространства, а также предохраняет травянистую растительность от выедания скотом [3].

Для исследования ландшафтов были отобраны 15 РЛ снимков со спутников Sentinel-1A/1B за 2018 год с интервалом 23–25 дней. Съёмка ведется активно (длина волны 5.6 см) в двух поляризациях (VV и VH) с пространственным разрешением 10 м [8]. Используемые снимки содержат информацию об амплитуде отраженного радиосигнала, позволяющую разделять объекты по величине коэффициента обратного рассеяния (УЭПР). На основе величины УЭПР формируется спектральный образ ландшафта [5]. Для обработки данных ДЗЗ использовано открытое программное обеспечение SNAP (The Sentinel Application Platform).

После первичной обработки исходных материалов были отобраны три изображения на опорные даты, определяющие характерные состояния ландшафтов в разные сезоны года. Первый маркерный период – весенний пик развития эфемеров, ему соответствует РЛ снимок от 30 апреля 2018 г. Второй опорной точкой выбран август, когда фитомасса минимальна вследствие иссушения растений в течение всего лета (снимок от 4 августа 2018 г). Периоду осеннего рассоления верхних горизонтов почв соответствует изображение от 15 октября 2018 г. На основе трех данных снимков синтезировано многовременное изображение. Проведена автоматизированная кластеризация полученного изображения методом k-среднее с выделением десяти участков, различных по величине УЭПР. Далее средние значения УЭПР в границах выделенных классов были извлечены для каждого из 15-ти снимков. Построен график спектрального образа каждого выделенного класса за исследуемый период.

Для интерпретации и сравнения результатов обработки РЛ изображений в работе использованы данные оптической съёмки Sentinel-2A/2B. Съёмка осуществляется в 13-ти спектральных каналах – в видимом и инфракрасном (ИК) диапазонах (длина волны от 443 нм до 2190 нм) с пространственным разрешением 10 м. Были отобраны три изображения на те же характерные сезоны года. Далее были рассчитаны вегетационные индексы NDVI (нормализованный вегетационный индекс) по оптическим данным и RVI (радиолокационный вегетационный индекс) по РЛ снимкам [7] по следующим формулам:

$$NDVI = \frac{NIR - R}{NIR + R}$$

где NIR – ближний инфракрасный канал, R – красный канал.



$$RVI = \frac{VV - VH}{VV + VH}$$

где VV – канал в согласованной поляризации, VH – канал в перекрестной поляризации.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЯ

В результате первичной и тематической обработки по многовременному РЛ снимку выделено десять классов объектов. Схема дешифрирования исследуемой территории представлена на рис. 1. Выявлены следующие закономерности. Отчетливо дешифрируются морская поверхность с самыми низкими значениями УЭПР (класс 1), что связано с особенностями зеркального отражения водой радиосигнала. Прибрежные заросли густой растительности обладают самыми высокими показателями коэффициента рассеяния (классы 9 и 10). Доминантным видом в данном фитоценозе является тростник обыкновенный (*Phragmites australis*). Это мощное высокое растение с крупными листьями. За счет большого числа переотражений радиосигнала от стеблей и листьев растений значение УЭПР для данных классов максимально. В этот же класс 9 попадает населенный пункт на юго-западе исследуемого участка. Большое количество построек также вызывает многократное отражение сигнала и увеличение яркости данного участка на снимке.

Однозначно выделяются водотоки, в том числе мелиоративные каналы и протока от заболоченного участка к морю (класс 7). Класс 6, в который попадают хорошо увлажненные территории вблизи каналов, характеризуется близкими значениями с УЭПР. В этот же класс попадают орошаемые поля.

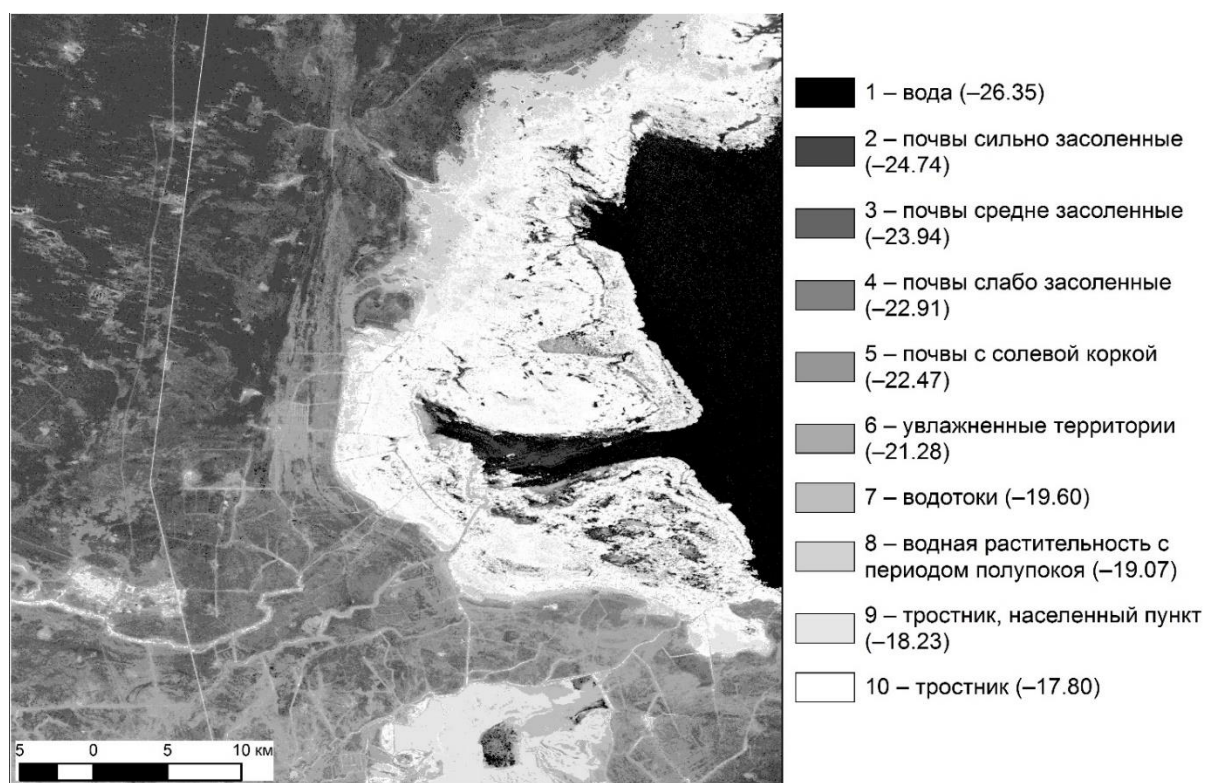


Рисунок 1. Схема дешифрирования (в скобках указаны среднегодовые значения УЭПР за 2018 г., дБ).

Для идентификации ландшафтов других классов была рассмотрена годовая динамика значений УЭПР (рис. 2). Вдоль тростникового пояса выделяется полоса водной растительности, характеризующаяся пиком в апреле–мае и значительным минимумом в августе (класс 8). Вероятно, в условиях высоких летних температур развитие растений угнетается.

Территорию на большем удалении от береговой линии занимают три класса: 2, 3, 4. Все они в начале апреля имеют примерно одинаковое значение УЭПР. Это говорит о том, что участок достаточно однородный после весенней промывки солей. В течение года территория

дифференцируется по степени увлажненности, что вызывает различия в плотности растительного покрова. Следовательно, класс 2 характеризуется наиболее низкорослой растительностью, а класс 4 – наиболее высокой и плотной. Интерес представляет класс 5 с наибольшим значением УЭПР из четырех рассматриваемых. Данные территории засолены главным образом оросительными водами, поверхность почвы зачастую покрыта плотной слоистой коркой, а растительность почти отсутствует.

Для сопоставления результатов, полученных по РЛ изображениям, с данными оптической съемки рассчитаны вегетационные индексы. Ярко выражена корреляция изображений RVI и NDVI за осеннее и летнее время. Заметные различия проявляются на изображениях за весенний период (рис. 3). Наивысшие значения RVI соответствуют влажным участкам морского побережья и заболоченным берегам озера. Это связано с тем, что на этих участках произрастает многолетняя растительность, сохраняющая высокую биомассу круглогодично. Однако в весенний период эти участки характеризуются низким значением NDVI в связи с тем, что все растения прошлогодние и пожелтевшие, еще не имеющие фотосинтетически активной биомассы. В целом RVI характеризуется невысокими значениями, поскольку в данной климатической зоне не развиваются экосистемы с высокой общей биомассой.

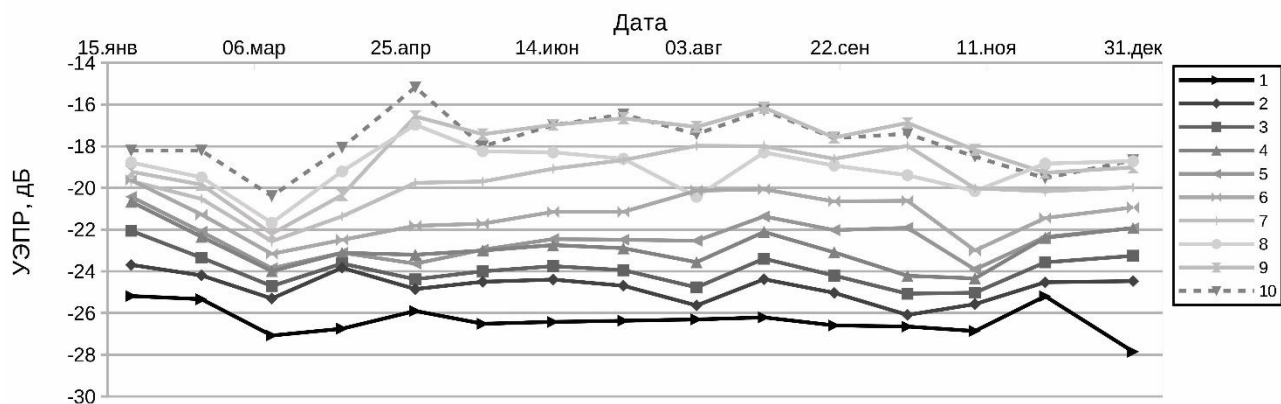


Рисунок 2. Годовой ход значений УЭПР по классам (номера соответствуют классам, выделенным на схеме дешифрирования рис. 1).

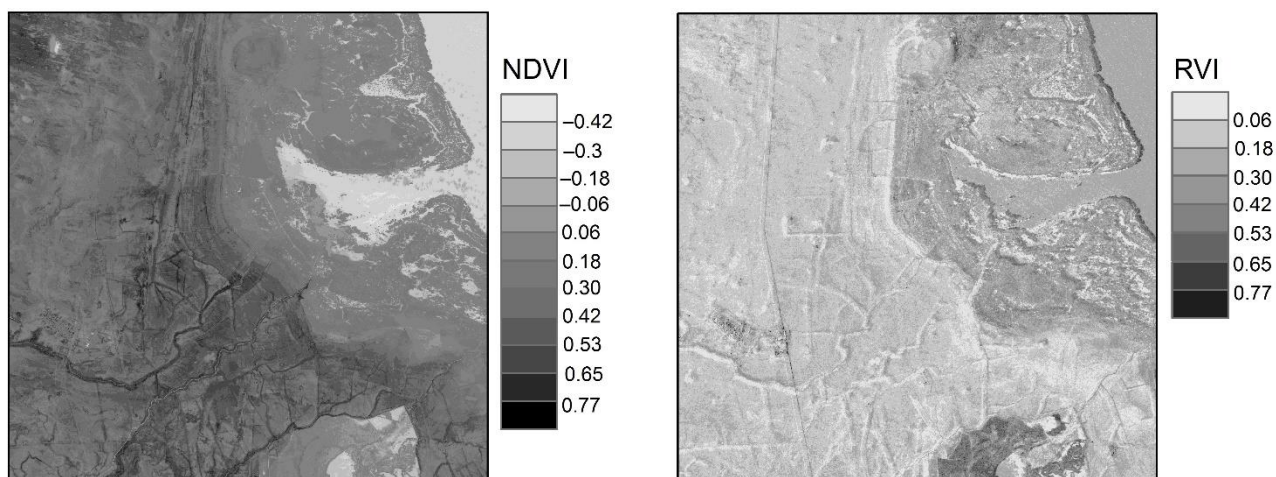


Рисунок 3. Нормализованный вегетационный индекс NDVI (27.04.2018) и радиолокационный вегетационный индекс RVI (30.04.2018).

## ВЫВОДЫ

1. На обратный радиосигнал влияют различные свойства подстилающей поверхности. Возможно проведение автоматизированной кластеризации с выделением участков, различных по степени засоленности почв. Данный алгоритм требует дальнейшего изучения для совершенствования автоматизированного районирования территории.

2. На основании данных радиолокационного зондирования возможен мониторинг развития растительности, распределения увлажнения в течение года.

3. По данным радиолокационной съемки возможна оценка общего объема растительности, тогда как по данным в оптическом диапазоне определяется объем фотосинтетически активной (зеленой) биомассы. В связи с этим наблюдается сходство распределения значений оптического и радиолокационного вегетационных индексов в летний и осенний периоды, а в весенний период выявлено различие в значениях этих индексов.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. *Анишаков Г.П., Журавель Ю.Н., Федосеев А.А.* Эффективность использования мультиспектральных и гиперспектральных данных дистанционного зондирования в задачах мониторинга окружающей среды // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета. – 2013. – № 4(42). 38–48 с.
2. *Гасанов Г.Н., Асварова Т.А., Гаджиев К.М. и др.* Динамика климатических условий Терско-Кумской низменности Прикаспия за последние 120 лет // Юг России: экология, развитие. – 2013. – № 4. – 96–103 с.
3. *Магомедов М.М.* Ценообразующая роль древовидных кустарников (*Tamarix meyeriboiss, T. ramosissimaledob*) аридных территорий северо-западного Прикаспия. – Автореф. дисс. ... канд. биол. наук. Махачкала, 2012.
4. *Классификация и диагностика почв России* / Шишов Л.Л., Тонконогов В.Д., Лебедева И.И., Герасимова М.И. – Смоленск: Ойкумена, 2004. 342 с.
5. *Трошко К.А.* Разработка методики использования радиолокационных данных для тематического картографирования. Автореф. дисс. ... канд. геогр. наук. Москва, 2018.
6. *Цымбал В.Н., Яцевич С.Е., Ефимов В.Б. и др.* Применение радиофизических методов и средств для дистанционного обнаружения подповерхностных объектов с борта самолета-лаборатории // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2010. – Т. 7. – № 4. 274–284 с.
7. *Kumar D., Rao S.S., Sharma J.R.* Radar vegetation index as an alternative to NDVI for monitoring of soybean and cotton // Conference: XXXIII INCA International Congress, At Jodhpur, Volume: Indian Cartographer, Vol. 33, 2013.
8. *ESA Sentinel Online* [Электронный ресурс] URL: <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/missions/sentinel-1/instrument-payload> (дата обращения 20.02.2019).

Работа рекомендована к.г.н., н.с. П.Г. Михайлюковой.

#### STUDY OF SALINE LANDSCAPES USING RADAR REMOTE SENSING DATA ON THE EXAMPLE OF SOLONCHAKS OF THE CASPIAN LOWLAND

V.V. Khliustova

Lomonosov Moscow State University

The paper considers the determination of soil and vegetation properties in saline landscapes using radar remote sensing data of Sentinel-1. The aim of the study is to establish the possibility of using radar images to determine the degree of soil salinity. The study includes expedition conducted in May 2018, when soils and vegetation in key areas were described. Radar images were obtained on the study territory. After the initial processing of the starting materials a synthesis was made based on images for three reference dates selected taking into account the climatic features of the area. The resulting image was clustered with ten plots distinguished. Next the graph of characteristics dynamics for the study period was constructed. Also vegetative indices NDVI (normalized vegetative index) from optical data and RVI (radar vegetative index) from radar images were calculated. Research findings about the degree of salinity of the landscapes made according to the results of the analysis of radar images are compared with descriptions of soils. The study shows the possibility of the successful application of radar remote sensing data in the landscapes study.

*Keywords:* multispectral synthesis, multi-period synthesis, Sentinel, vegetation indices.

## ВЛИЯНИЕ ТРАНСПОРТНОЙ НАГРУЗКИ НА СОДЕРЖАНИЕ И НАКОПЛЕНИЕ НЕФТЕПРОДУКТОВ В ГОРОДСКИХ ПОЧВАХ (НА ПРИМЕРЕ ПОЧВ ТЕРРИТОРИИ МГУ ИМ. М.В. ЛОМОНОСОВА НА ЛЕНИНСКИХ ГОРАХ)

А.М. Шакурова

Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова

В работе проведена оценка содержания и накопления нефтепродуктов в городских почвах с различной транспортной нагрузкой. Уровень транспортной нагрузки определялся расчётным методом, концентрация нефтепродуктов в почве определена методом инфракрасной спектроскопии. Дополнительно определено содержание углерода органических соединений. Полученные в результате исследования данные показали, что содержание нефтепродуктов в почвах пропорционально уровню транспортной нагрузки для почв «возрастом» 5 лет.

*Ключевые слова:* органические загрязнители, урбанозёмы, урбоэкосистемы.

### ВВЕДЕНИЕ

Современные урбоэкосистемы подвержены интенсивной антропогенной нагрузке, значительная часть которой обусловлена влиянием транспорта. Одними из основных загрязняющих веществ при повышенной транспортной нагрузке являются нефтепродукты (НП), главным аккумулятором которых становятся городские почвы. Поступая в почву, они нарушают ее свойства (химические, физические и т.д.), препятствуя выполнению её экосистемных функций [2].

Понятие «нефтепродукты» (НП) имеет два значения – техническое и аналитическое. В техническом значении нефтепродукты – это товарные сырые нефти, прошедшие первичную подготовку на промысле, и продукты переработки нефти, использующиеся в различных видах хозяйственной деятельности. В аналитическом значении к НП относят неполярные и малополярные углеводороды, растворимые в органических растворителях и не сорбирующиеся оксидом алюминия [5]. В условиях изучения экологического состояния городских объектов наиболее актуальным будет определение по ГОСТ 26098-84, так как определение характеристик городских почв так же проводится по ГОСТ.

Среди многочисленных веществ антропогенного происхождения, попадающих в компоненты городских экосистем, НП принадлежит одно из первых мест по степени воздействия на окружающую среду. Следует отметить, что для городских почв правильнее говорить о загрязнении НП чем, о загрязнении нефтью, хотя во многом их влияние на свойства почв схожи.

На загрязненных НП участках формируется высокая фитотоксичность почвы. Из-за трудной биодеструкции НП происходит угнетение микробного сообщества почвы [3]. Воздействие НП на почвенные экосистемы приводит к снижению биологической продуктивности почвы и фитомассы растительного покрова. Также привнесение в почву НП замедляет углеродный обмен через накопление в ней органического вещества и снижает трансформацию растительных отходов, что сокращает интенсивность нитрификации и азотфиксации в почве и, в конечном итоге, вызывает азотное голодание растений и снижает величину «дыхания почвы» [1].

По данным Департамента природопользования и охраны окружающей среды города Москвы [4], в Москве преобладают почвы со средним (4.1–6.0 %) и очень высоким (> 10 %) содержанием органического углерода (суммарно – 51.5 % проб). Доля проб с очень низким содержанием органического вещества ( $\leq 2\%$ ) незначительна – не превышает 2.3 %. Высокое содержание органического углерода характерно для почв городов в целом.

Этому способствует поступление органических поллютантов, которые попадают в почву в виде тонких частиц с воздухом (углистых частиц, сажи, продуктов неполного сгорания твёрдого и жидкого топлива) и в составе отходов. Таким образом, в органическом веществе

(ОВ) городских почв присутствуют как гумусовые, так и ОВ антропогенного происхождения (битумно-асфальтовые смеси, сажа, НП). Поэтому, для городских почв правильнее говорить о содержании Сорг или органического вещества, а не о содержании гумуса.

В последние годы, в связи с реорганизацией дорожного движения: ремонтом дорог и перекладкой газонов, расширением метрополитена, транспортная нагрузка на территорию МГУ увеличилась. В период с мая по сентябрь 2019 года на газонах территории МГУ частично был заменён верхний плодородный слой почв, при этом возникла возможность рассмотреть два разных временных периода, в течение которых анализируемые горизонты подвергались транспортной нагрузке (0.5 года и 5 лет соответственно). Таким образом, была получена возможность оценить содержание и накопление нефтепродуктов в городских почвах на территории МГУ.

Цель работы: оценить содержание и накопление нефтепродуктов в городских почвах на участках с разной транспортной нагрузкой (на примере почв территории МГУ им. М.В. Ломоносова на Ленинских горах).

## ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Объекты исследования: верхние горизонты городских почв общественно-деловой зоны г. Москвы, приуроченной к территории МГУ им. Ломоносова. Смешанные пробы верхних горизонтов с глубины 0–10 см на расстоянии 1 м и 3 м от полотна дороги были отобраны в сентябре 2019 г. на территории МГУ и Университетском проспекте.

Предварительно была оценена транспортная нагрузка на различные участки территории МГУ (на газоны ул. Менделеевской, Университетского проспекта, Мичуринской аллеи, ул. Ленинские горы) по Молодцову В.А. и Гуськову А.А. [7], было обозначено три зоны с разной условной величиной транспортной нагрузки (Мичуринская ал., ул. Ленинские горы – низкая; ул. Менделеевская – средняя; Университетский проспект – высокая). Так, для зоны с низкой нагрузкой транспортный поток составил 100 единиц транспорта в сутки, для средней – 500, для высокой – 1000. Содержание нефтепродуктов в почве определено согласно «Методике выполнения измерений массовой доли нефтепродуктов в почвах и донных отложениях методом ИК-спектрии» ПНД Ф 16.1:2.2.22-98 [8]. Содержание С в почве и в вытяжках определялось методом Тюрина в модификации Никитина с титриметрическим окончанием [10], содержание Cl-ионов (хлоридов) было определено аргентометрически по методу Мора (ГОСТ 26425-85).

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Для оценки степени загрязнения исследуемых почв был выбран фоновый объект – разрез на территории метеостанции МГУ. Свойства урбанозема, сформированного на территории Метеостанции МГУ, представлено ниже в табл. 1.

Таблица 1. Содержание нефтепродуктов, хлоридов, органического вещества и рН в урбаноземе на разной глубине.

Глубина, см	рН	Хлориды, мг/кг	НП, мг/кг	Органическое вещество, %
0–3	6.0	71.0	117	5.41
3–10	6.1	63.9	174	4.97
10–20	6.3	142.0	88	2.00
20–30	7.3	78.1	126	1.24
30–40	7.7	71.0	114	1.52
40–50	7.5	99.4	178	1.24
50–60	7.3	78.1	77	0.22
80–90	7.3	71.0	59	0.02

Вниз по профилю происходит увеличение рН, достигая максимума (рН=7.7) на глубине 30–40 см, к этой же глубине приурочен второй максимум содержания ОВ (1.52 %). Это ха-

рактарно для городских почв. При планировании территории естественные почвы часто за-  
сыпаются, на поверхности формировался новый почвенный профиль. В качестве промежу-  
точных слоев использовались и используются сейчас грунты, содержащие строительные от-  
ходы и т.д., что обуславливает повышение рН из-за содержащихся карбонатных материалов  
в отходах строительства (Экологические функции городских почв, 2004).

На присутствие в средней части профиля разреза материалов, содержащих остатки НП,  
указывает повышение значений содержания НП на глубине 20–50 см (табл. 1).

Проведенные нами исследования показали, что максимальное содержание ОВ в верх-  
них горизонтах почв на территории МГУ отмечено вдоль основных подъездных дорог к зда-  
ниям – на газонах, сформированных на территории МГУ (ул. Ленинские горы, ул. Менделее-  
ва), что связано с регулярными подсыпками грунтов, содержащими много ОВ (табл. 2). Вес-  
ной и летом 2019 года на этих участках происходили подсыпки почвы и/или частичная заме-  
на грунта.

Для городских почв характерен сдвиг реакции среды в сторону щелочных значений  
( $pH_{\text{водн.}}$  8–9 и выше). По результатам мониторинга почв Москвы установлено, что 50.5 % ис-  
следованных проб имеют слабощелочную и щелочную ( $pH = 7.6–8.5$ ), 45.5 % проб – близкую  
к нейтральной и нейтральную реакцию среды ( $pH = 6.6–7.5$ ), у 4 % исследованных проб ре-  
акция среды рН водной вытяжки из почв смещена в сторону кислых значений [4].

рН верхних горизонтов почв территории МГУ колеблется от 6.0 до 8.5 ед. Повышенные  
значения рН почв отмечены на участках, прилегающих к тротуарам, и, вероятнее всего, свя-  
заны с применением в зимний период ПГР, обогащенных карбонатной крошкой (табл. 2).

Содержание хлоридов в исследуемых пробах ниже экспертного критерия, установлен-  
ного постановлением Правительства Москвы от 27.07.2004 № 514-ПП «О повышении каче-  
ства почвогрунтов в городе Москве» [9] (1680 мг/кг) и варьирует от 56.8 мг/кг до 369.2 мг/кг.

Фоновые значения содержания НП в почвах этой территории исследования не превы-  
шают 170 мг/кг. В зонах непосредственного влияния автотранспорта, даже при низкой  
транспортной нагрузке содержание НП в грунте начинает возрастать, достигая за 6 месяцев  
490 мг/кг (табл. 1., рис. 1). При этом содержание НП в верхних горизонтах почв всех зон  
одинаковы, так как грунт был заменён одновременно. При рассмотрении грунта, подвергав-  
шегося антропогенной нагрузке разное количество времени, обнаруживаются различия в  
накоплении НП после нескольких лет использования газонов, о чём свидетельствуют ло-  
кальные максимумы содержания НП. Неоднородность содержаний НП в верхних горизонтах  
почв участков, расположенных вдоль дорог с одинаковой транспортной нагрузкой может  
обуславливаться различным временем эксплуатации верхних органических горизонтов в ка-  
честве газонов, а также различной их удалённостью от автомобильной дороги.

В табл. 3 представлены обобщенные данные для участков с разной транспортной  
нагрузкой и «возрастом» горизонтов почв. Полученные нами данные согласуются с описан-  
ными в литературе.

В табл. 3 представлены интервалы значений рН, содержания ОВ и НП, в почвах участ-  
ков, прилегающих к трассам с разной транспортной нагрузкой. Время эксплуатации («воз-  
раст») верхнего слоя почвы равно 6 месяцам для грунта, который в мае 2019 года был поло-  
жен на большинстве газонов рекреационной зоны МГУ. «Возраст» грунта, равный 5 годам,  
соответствуют тем участкам, на которых на протяжении этого времени не осуществлялись  
подсыпки этого грунта или грунт не менялся. Зона с сильной величиной антропогенной  
нагрузки соответствовала дороге с наибольшей пропускной способностью, зона со слабой  
нагрузкой выполняет, в основном, парковочную роль. Стоит отметить, при парковке автомо-  
биль движется на холостом ходу, при этом нефтепродуктов в окружающую среду поступает  
больше, чем при движении на крейсерской скорости [6].

Таблица 2. Содержание хлоридов, органического вещества и pH в верхнем горизонте почв рекреационной территории МГУ с разной антропогенной нагрузкой.

Расположение участка	№ точки	Расстояние от дороги, м	pH, ед.	Хлориды, мг/кг	ОВ, %
Почвенный Стационар, Мичуринская ал.	1	1	7.6	56.8	3.81
	2	1	7.5	85.2	3.71
	3	1	7.3	333.7	4.52
	4	1	7.5	369.2	4.40
Ф-т почвоведения, ул. Ленинские горы	5	1	7.4	71.0	14.31
	6	1	7.3	78.1	8.60
	7	1	7.5	78.1	8.14
	10	1	8.5	71.0	3.84
	11	1	8.3	127.8	3.90
ул. Менделеевская	8	1	6.5	78.1	5.60
	9	1	6.4	71.0	5.19
	24	1	7.7	71.0	10.05
	25	1	7.6	78.1	6.19
	26	1	7.9	99.4	7.79
	27	3	7.7	78.1	8.81
	28	3	7.3	42.6	9.45
	29	3	7.4	78.1	12.27
Университетский проспект	12	1	7.6	78.1	6.76
	13	1	7.8	71.0	10.26
	14	1	7.8	71.0	9.53
	15	1	7.5	71.0	9.81
	16	1	8.4	63.9	4.43
	17	1	7.5	78.1	9.52
	18	1	7.2	106.5	10.12
	19	3	7.9	92.3	8.34
	20	3	7.5	78.1	11.79
	21	3	7.0	71.0	10.33
	22	3	7.1	85.2	8.45
	Асфальтовая крошка	3	7.8	не опр.	не опр.

Примечание. светлым тоном выделены точки с низкой нагрузкой, средним – со средней нагрузкой, тёмным – с высокой нагрузкой.

Таблица 3. Содержание НП, ОВ и значения pH верхних горизонтов почв с разной транспортной нагрузкой.

Условная величина нагрузки	«Возраст», лет	НП, мг/кг	ОВ, %	pH, ед.
низкая	0.5	217–490	4.72–8.30	7.50–8.48
	5	320–948	2.26–4.99	7.29–8.27
средняя	0.5	96–126	5.48–7.12	6.37–7.40
	5	1214–1506	3.59–5.11	7.58–7.86
высокая	0.5	230–461	4.84–4.90	7.13–7.86
	5	1302–2347	2.57–5.99	6.95–8.42
крошка асфальта	0.5	27057	не опр.	7.80

Можно отметить тенденцию к снижению содержания ОВ в гумусовых горизонтах городских почв со временем, что связано с частичным выносом легких органических частиц почвы с осадками, а также с особенностями поверхности газонов.

На рис. 1 показано содержание НП в зависимости от возраста верхнего горизонта. Наименьшее содержание НП характерно для горизонтов возрастом менее года, далее происходит накопление НП в зависимости от места нахождения почвы, транспортной нагрузки.

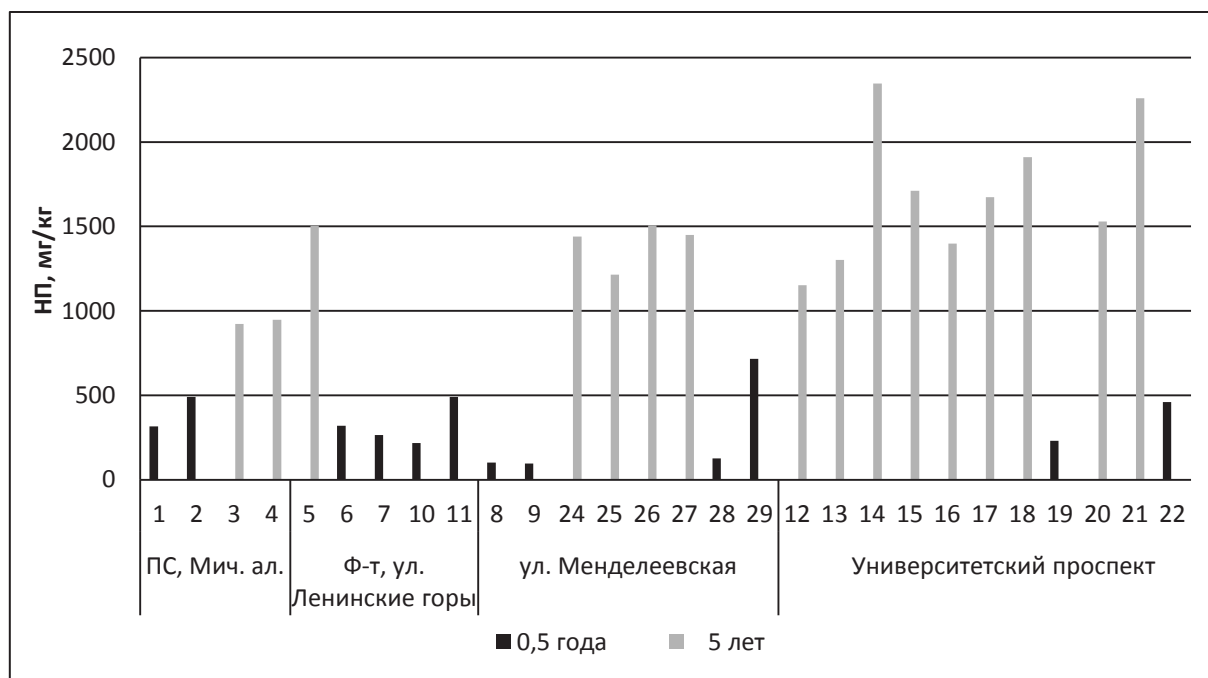


Рисунок 1. Содержание НП в разновозрастных верхних горизонтах почв на территории МГУ.

Следует отметить, что после смены асфальта или прокладки нового (например, пешеходные дорожки на газонах на ул. Менделеевской) остается много асфальтовой крошки на газонах. Содержание НП в ней 27.1 г/кг. Это говорит о том, что образуется еще один источник загрязнения почвы нефтепродуктами.

Полученные данные показали, что содержание НП в почвах исследованных территорий возрастает при увеличении возраста горизонтов и величины транспортной нагрузки участков рекреационной территории МГУ.

#### ВЫВОДЫ:

1. Фоновые значения содержания нефтепродуктов в почвах района исследования не превышают 170 мг/кг. В зонах непосредственного влияния автотранспорта, даже при низкой транспортной нагрузке содержание нефтепродуктов в «новом» грунте начинает возрастать, достигая за 6 месяцев 490 мг/кг. За 5 лет при низкой транспортной нагрузке содержание нефтепродуктов возрастает до 950 мг/кг.

2. Исходные содержания нефтепродуктов в верхних горизонтах почв всех зон примерно одинаковы, резкие различия в накоплении нефтепродуктов проявляются после нескольких лет использования газонов. Полученные в результате исследования данные показали, что содержание нефтепродуктов в почвах пропорционально уровню транспортной нагрузки для почв, которые подвергались транспортной нагрузке 5 лет.

3. Следует отметить, что зона с сильной нагрузкой соответствовала дороге с наибольшей пропускной способностью, зона со слабой нагрузкой выполняет, в основном, парковочную роль.

4. При смене асфальтового покрытия большое количество битумной и асфальтовой крошки разного размера попадает на газоны, это также является одной из причин повышенного содержания нефтепродуктов в верхнем слое почвы в зоне с низкой транспортной нагрузкой.



5. Можно выделить снижение содержания ОБ в гумусовых горизонтах городских почв со временем, что может быть связано с частичным выносом легких органических частиц почвы с осадками, а также с особенностями поверхности газонов.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. *Белюченко И.С.* Введение в экологический мониторинг. Учебное пособие. Краснодар, 2011. – 297 с.
2. *Васенев В.И., Ван Ауденховен А.П., Ромзайкина О.Н., Гаджиагаева Р.А.* Экологические функции и экосистемные сервисы городских и техногенных почв: от теории к практическому применению (обзор). // Почвоведение, 2018, № 10. С. 1177–1191.
3. *Гасанова У.О.* Воздействие нефтяного загрязнения на ферментативную активность и целлюлозоразлагающие микроорганизмы в серо-бурой почве. // Международный научно-исследовательский журнал, 2019, № 3. С. 52–58.
4. *Государственный доклад «О состоянии окружающей среды в городе Москве в 2018 году»*, 2019 ([http://www.dpioos.ru/eco/ru/\(20.10.2019\)](http://www.dpioos.ru/eco/ru/(20.10.2019))).
5. *Другов Ю.С., Родин А.А.* Экологические анализы при разливах нефти и нефтепродуктов. М.: Бином. Лаборатория знаний, 2020. 270 с.
6. *Коковкин В.В., Шуваева О.В., Морозов С.В., Ранута В.Ф.* Руководство по методам полевых и лабораторных исследований снежного покрова для изучения закономерностей длительного загрязнения местности в зоне действия антропогенных источников. Методическое пособие. Новосибирск, 2012.
7. *Молодцов В.А., Гуськов А.А.* Определение выбросов загрязняющих веществ от автотранспорта. Методические указания. Тамбов: Изд-во ВПО «ТГТУ», 2014. 22 с.
8. *Орлов Д.С., Гришина Л.А.* Практикум по химии гумуса: Учебное пособие / – М.: Изд-во Моск. Ун-та., 1981. 272 с.
9. *ПНД Ф 16.1:2.2.22-98* Методика выполнения измерений массовой доли нефтепродуктов в минеральных, органоминеральных, органоминеральных почвах, 1998. 22 с.
10. *Постановление Правительства Москвы от 27.07.2004 № 514-ПП «О повышении качества почвогрунтов в городе Москве»*, 2004.

Работа рекомендована к.б.н., ст. преп. М.С. Розановой.

#### THE EFFECT OF TRANSPORT LOAD ON THE CONTENT AND ACCUMULATION OF OIL PRODUCTS IN URBAN SOILS (ON THE EXAMPLE OF SOILS OF THE TERRITORY OF LOMONOSOV MOSCOW STATE UNIVERSITY ON THE LENINSKIE GORY)

A.M. Shakurova

Moscow State University named after M.V. Lomonosov

This work is related to the theme «Oil Products Content and Stock in Urban Soils». The dependence of oil products content on traffic load was also taken into account. The traffic load was determined by the calculated method, the oil products content was found with the help of Infrared spectroscopy.

*Keywords:* organic pollutants, urban soils, urban ecosystems

## СОДЕРЖАНИЕ

<i>Антонова С.А., Ладонин Д.В.</i> Редкоземельные элементы в почвах Центрально-Лесного государственного биосферного заповедника и их связь с соединениями железа и марганца .....	3
<i>Чаплыгин В.А., Манджиева С.С., Литвинов Ю.А.</i> Сравнение содержания тяжелых металлов в растениях полыни австрийской ( <i>Artemisia austriaca</i> ) различных импактных зон Ростовской области .....	9
<i>Гордеева К.А., Гусева И.А., Латыпова Л.И.</i> Пространственное изменение агрохимических свойств пахотных черноземов.....	14
<i>Искандирова Ю.Р.</i> Влияние биоугля и растительных остатков на усвоение кадмия и азота растениями ячменя.....	19
<i>Корытина М.А.</i> Особенности строения и физические свойства конструкторземов и их компонентов, предназначенных для обустройства зеленой кровли .....	23
<i>Латыпова Л.И., Королева А.В.</i> Закономерности изменения гумусного состояния залежных светло-серых лесных почв .....	27
<i>Меркель К.П.</i> Дрожжевые ассоциации с муравьями вида <i>Lasius flavus</i> .....	31
<i>Михайлов И.С.</i> Керн – Шокальские. История одной семьи (1800–1961) .....	36
<i>Мищенко А.В.</i> Влияние способов обработки на устойчивость к разбрызгиванию дождём и реологические свойства серых лесных почв .....	43
<i>Назаренко Е.А., Васина М.Р., Гладкова М.М., Учанов П.В.</i> Исследования биологической активности погребенных почв кровли позднемелового ископаемого леса Восточной Чукотки .....	51
<i>Огородников С.С.</i> Методические подходы к установлению нормативов качества почв на примере Тульской области .....	55
<i>Огородникова С.В.</i> Влияние микроэлементов (Cu, Zn, Mn) на рост и развитие газонных трав .....	59
<i>Петров Д.Г., Мергелов Н.С., Зазовская Э.П.</i> Архивы лесных пожаров в почвах карстовых районов Архангельской области.....	62
<i>Потапова А.В., Каширская Н.Н.</i> Биологическая активность культурного слоя археологического памятника эпохи бронзы Ксизово-1 (XXII–XXIV вв. до н.э.).....	67
<i>Русаков Г.А., Дмитричева Л.Е.</i> Содержание подвижных форм тяжёлых металлов в почвах мониторинговых участков о. Валаам .....	74
<i>Смирнова К.А., Гуртовая А.В.</i> Агроэкологическая оценка применения биоугля в повышенной дозе при мелиорации агродерново-подзолистых почв.....	79
<i>Сушко К.С.</i> Анализ и оценка современного состояния аллювиальных почв дельты Дона ..	84

<i>Толстыгин К.Д., Смагин А.В.</i> Неустойчивость фронта впитывания как ключевой фактор загрязнения подземных вод .....	88
<i>Тыниссон А.Э.</i> Оценка устойчивости почвенной структуры некоторых почвенных разностей о. Колгуев к механическим воздействиям .....	96
<i>Хлюстова В.В.</i> Изучение засоленных ландшафтов с использованием данных радиолокационного зондирования земли на примере солончаков приморской равнины Прикаспия .....	102
<i>Шакурова А.М.</i> Влияние транспортной нагрузки на содержание и накопление нефтепродуктов в городских почвах (на примере почв территории МГУ им. М.В. Ломоносова на Ленинских горах).....	108

Научное издание

**МАТЕРИАЛЫ ПО ИЗУЧЕНИЮ РУССКИХ ПОЧВ**  
***Выпуск 13 (40)***

Компьютерная верстка А.Г. Рюмина

Подписано в печать 10.12.2021.  
Формат 60x84 <sup>1</sup>/<sub>8</sub>. Усл. печ. л. 13,49.  
Тираж 50 экз. Заказ №2304.

Отпечатано с готового оригинал-макета  
в типографии ООО «Переплётный Центр»  
191121, Санкт-Петербург, пр. Римского-Корсакова, д. 109-111  
тел.: (812) 622-01-23                      e-mail: 6220123@mail.ru  
<https://bindcenter.ru>