

ISSN 0136-1694 (Print)
ISSN 2312-4202 (Online)

ФГБНУ «ПОЧВЕННЫЙ ИНСТИТУТ ИМ. В.В. ДОКУЧАЕВА»

БЮЛЛЕТЕНЬ
ПОЧВЕННОГО ИНСТИТУТА
имени В.В. ДОКУЧАЕВА

юбилейный выпуск
100

Москва
2019
<https://bulletin.esoil.ru>

ISSN 0136–1694 (Print)
ISSN 2312-4202 (Online)

V.V. DOKUCHAEV SOIL SCIENCE INSTITUTE

Dokuchaev Soil Bulletin
(Byulleten Pochvennogo instituta
imeni V.V. Dokuchaeva)

anniversary issue
100

Moscow
2019

<https://bulletin.esoil.ru>

ББК П03
Б 98
УДК 631.4

Главный редактор:
Иванов А. Л., академик РАН

Заместитель главного редактора:
Савин И. Ю., академик РАН

Редакционная коллегия:

А-Ксин Джу (университет Висконсина, США)
Когут Б. М. (Почвенный институт им. В.В. Докучаева, Москва)
Монтанарелла Л. (Институт окружающей среды и устойчивого развития Объединенного исследовательского центра Европейской комиссии, Италия)
Розанов А. Б. (Университет Стелленбуш, ЮАР)
Тихонович И. А., академик РАН (Санкт-Петербургский университет, Санкт-Петербург)
Тот Г. (Университет Паннонии, Венгрия)
Хитров Н. Б. (Почвенный институт им. В.В. Докучаева, Москва)
Ченdev Ю. Г. (Белгородский государственный университет, Белгород)
Швиденко А. З. (Международный институт прикладного системного анализа, Австрия)
Шишков Т. А. (Институт почвоведения, агротехнологии и защиты растений им. Н. Пушкарова, Болгария)

Chief Editor:
A. L. Ivanov, Academician

Deputy Chief Editor:
I. Yu. Savin, Academician

Editorial board:

A-Xing Zhu (University of Wisconsin, USA)
B. M. Kogut (V.V. Dokuchaev Soil Science Institute, Moscow)
L. Montanarella (Institute for Environment and Sustainability – European Commission's Joint Research Centre (IES/EC/JRC), Italy)
A. B. Rozanov (Stellenbosch University, Republic of South Africa)
I. A. Tikhonovich (Saint Petersburg State University, St. Petersburg)
G. Toth (University of Pannonia, Hungary)
N. B. Khitrov (V.V. Dokuchaev Soil Science Institute, Moscow)
Yu. G. Chendev (Belgorod State University, Belgorod)
A. Z. Shvidenko (International Institute for Applied Systems Analysis, Austria)
T. A. Shishkov (Institute of Soil Science, Agrotechnologies and Plant Protection "Nikola Poushkarov", Bulgaria)

СОДЕРЖАНИЕ

Цифровое картографирование эрозионных структур почвенного покрова на основе имитационной модели смыва (северная лесостепь Среднерусской возвышенности)

Козлов Д.Н., Жидкин А.П., Лозбенев Н.И. 5

Soil erosion prediction using the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE) in Google Earth Engine (GEE) cloud-based platform

Papaiordanidis S., Gitas I.Z., Katagis T. 36

Геохимические особенности почв волнистой озерно-ледниковой песчаной равнины среднетаежной подзоны Карелии

Ахметова Г.В. 53

Микроморфологическое строение почв полупустынных солонцовых комплексов Прикаспийской низменности под растительными сообществами с участием *Kochia prostrata*

Плотникова О.О., Лебедева М.П., Варламов Е.Б.,

Нухимовская Ю.Д., Шуйская Е.В. 83

Review on uranium in soil: levels, migration

Sanzharova N.I., Ratnikov A.N., Fesenko S.V., Sviridenko D.G. 117

Концепция использования комплексных удобрений пролонгированного действия на основе отходов переработки калийно-магниевых руд как новой парадигмы в улучшении плодородия почв

Сметаников А.Ф., Косолапова А.И., Корляков К.Н.,

Оносов Д.В., Фомин Д.С., Ямалдинова В.Р.,

Шишков Д.Г., Оносова Е.Ф. 133

Сравнительная оценка влияния нулевой и традиционной обработки на биологическую активность агрочерноземов Ставропольского края

Кутовая О.В., Тхакахова А.К., Семенов М.В., Чернов Т.И.,

Ксенофонтова Н.А., Железова А.Д., Гаджшумаров Р.Г.,

Стукалов Р.С., Иванова Е.А., Никитин Д.А. 159

CONTENTS

Digital mapping of soil cover eroded patterns on the basis of soil erosion simulation model (northern forest-steppe of the Central Russian Upland)

Kozlov D.N., Zhidkin A.P., Lozbenev N.I. 5

Soil erosion prediction using the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE) in Google Earth Engine (GEE) cloud-based platform

Papaiordanidis S., Gitas I.Z., Katagis T. 36

Geochemical features of soils in an undulating glaciolacustrine sandy plain in the middle taiga subzone of Karelia

Akhmetova G.V. 53

Micromorphological features of soils of semidesertic solonetzic complexes under different herbaceous communities with the participation of fodder plant Kochia prostrata (Caspian lowland)

*Plotnikova O.O., Lebedeva M.P., Varlamov E.B.,
Nukhimovskaya Yu.D., Shuyskaya E.V.* 83

Review on uranium in soil: levels, migration

Sanzharova N.I., Ratnikov A.N., Fesenko S.V., Sviridenko D.G. 117

Concept of use of comprehensive fertilizers of long-term action on the basis of waste processing of potassium-magnesium ore as a new paradigm in improving soil fertility

*Smetannikov A.F., Kosolapova A.I., Korlyakov K.N.,
Onosov D.V., Fomin D.S., Yamaltdinova V.R.,
Shishkov D.G., Onosova E.F.* 133

Comparative evaluation of the influence of no-till and traditional treatment on the biological activity of agricultural chernozem of the Stavropol region

*Kutovaya O.V., Tkhakakhova A.K., Semenov M.V., Chernov T.I.,
Ksenofontova N.A., Zhelezova A.D., Gadzhiumarov R.G.,
Stukalov R.S., Ivanova E.A., Nikitin D.A.* 159

УДК 631.4

DOI: 10.19047/0136-1694-2019-100-5-35

Ссылки для цитирования:

Козлов Д.Н., Жидкин А.П., Лозбенев Н.И. Цифровое картографирование эрозионных структур почвенного покрова на основе имитационной модели смыва (северная лесостепь Среднерусской возвышенности) // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2019. Вып. 100. С. 5-35. DOI: 10.19047/0136-1694-2019-100-5-35

Cite this article as:

Kozlov D.N., Zhidkin A.P., Lozbenev N.I., Digital mapping of soil cover eroded patterns on the basis of soil erosion simulation model (northern forest-steppe of the Central Russian Upland), Dokuchaev Soil Bulletin, 2019, V. 100, pp. 5-35, DOI: 10.19047/0136-1694-2019-100-5-35

Цифровое картографирование эрозионных структур почвенного покрова на основе имитационной модели смыва (северная лесостепь Среднерусской возвышенности)

© 2019 г. Д. Н. Козлов*, А. П. Жидкин, Н. И. Лозбенев

Почвенный институт им. В.В. Докучаева, Россия,

119017, Москва, Пыжевский пер, 7, стр. 2,

**<https://orcid.org/0000-0003-0103-0300>, e-mail: Kozlov_DN@esoil.ru,*

*Поступила в редакцию 22.01.2019, после доработки 27.09.2019,
принята к публикации 18.12.2019*

Резюме: В работе представлены оригинальные разработки по применению эрозионной модели WaTEM/SEDEM для крупномасштабного картографирования эрозионных структур почвенного покрова Среднерусской возвышенности. Оценка участия смытых почв в составе почвенных комбинаций распаханных склонов проведена на основе сопоставления расчетных темпов смыва с результатами почвенно-морфологической диагностики степени эродированности черноземов в 859 точках. При заданных входных параметрах эрозионной модели качественные изменения в структуре почвенного покрова (доля слабосмытых почв более 10%) начинаются с порогового значения водной эрозии $8 \text{ т}\cdot\text{га}^{-1}\cdot\text{год}^{-1}$. При среднегодовой эрозии $30 \text{ т}\cdot\text{га}^{-1}\cdot\text{год}^{-1}$ доля смытых почв превышает 50%. Полученные отношения между встречаемостью почв эрозионно-аккумулятивного

ряда и интенсивностью смыва использованы для построения карты типизированных комбинаций почв разной эродированности. Сравнение с материалами детальной почвенной съемки показало, что карта отражает пространственное разнообразие и конфигурацию эрозионных почвенных комбинаций. Разработанный подход представляется перспективным для решения фундаментальных и прикладных задач, связанных с изучением структурно-функциональной организации почвенного покрова склонов и проектированием противоэрозионных мероприятий в адаптивно-ландшафтном земледелии.

Ключевые слова: расчетные темпы эрозии, WaTEM/SEDEM, эрозионная деградация черноземов.

Digital mapping of soil cover eroded patterns on the basis of soil erosion simulation model (northern forest-steppe of the Central Russian Upland)

D. N. Kozlov^{*}, A. P. Zhidkin, N. I. Lozbenev

*V.V. Dokuchaev Soil Science Institute,
7 Bld. 2 Pyzhevskiy per., Moscow 2119017, Russian Federation,
<https://orcid.org/0000-0003-0103-0300>, e-mail: Kozlov_DN@esoil.ru.

Received 22.01.2019, Revised 27.09.2019, Accepted 18.12.2019

Abstract: The paper presents original developments on the application of WaTEM/SEDEM erosion model for large-scale mapping of erosion patterns of the soil cover in the Central Russian Upland. The share of eroded soils in the composition of soil combinations on plowed slopes was evaluated; such estimation was carried out on the basis of a statistical comparison of the calculated rates of soil losses with the results of actual soil-morphological diagnostics of the degree of chernozems erosion. The obtained relations between share of eroded soils in soil cover patterns and modelled erosion rates were used for development of the map depicting typified combinations of soils with various degrees of erosion. Comparison with detailed soil survey materials showed that the map is accurate enough for the spatial diversity and configuration of eroded soils combinations description. At the given input parameters of the erosion model qualitative changes in the soil cover structure (share of slightly-eroded soils is more than 10%) start from the threshold value of water erosion of 8 t·ha⁻¹·year⁻¹. With an average annual erosion of 30 t·ha⁻¹·year⁻¹, the share of denuded soils exceeds 50%. The developed approach seems to be promising for solving fundamental and applied problems related to the study of structural and functional organization of the soil cover of slopes

and for planning the erosion control measures in adaptive-landscape agriculture.

Keywords: estimated erosion rates, WaTEM/SEDEM, erosive degradation of chernozems.

ВВЕДЕНИЕ

Влияние водной эрозии на состояние почвенно-земельных ресурсов – многогранная актуальная проблема, широко освещенная в литературе ([Рожков, 2007](#); [Научные основы..., 2013](#)). Поверхностный твердый сток приводит к дифференциации почвенного покрова, образуя комбинации несмытых, смытых, намытых и смыто-намытых почв, снижающих плодородие склоновых земель и ведущих к их эрозионной деградации ([Научные основы..., 2013](#)). Изучение почвенного покрова эрозионных склонов и оптимизация их сельскохозяйственного использования связаны с развитием междисциплинарных подходов географии почв, эрозиоведения и земледелия с привлечением современных средств пространственного анализа и физико-математического моделирования.

В области эрозиоведения накоплен огромный эмпирический материал. Более полувека ведутся попытки обобщить собранные данные в виде математических моделей, выражающих зависимость поверхностного смыва почв (т/га в год или мм/год) от климатических, топографических, почвенно-литологических и хозяйственных факторов ([Karydas et al., 2014](#); [Dhami, Pandey, 2013](#); [Pandey et. al., 2016](#); [Сурмач, 1979](#); [Мирцхулава, 2000](#); [Ларионов, 1993](#); [Светличный и др., 2004](#); [Сухановский, 2010](#) и др.). Расчетные методы используются для картографирования классов эрозионной опасности земель по величине потенциального смыва и проектирования противоэрзационных мероприятий в системе внутрихозяйственного землеустройства ([Методические рекомендации, 1985](#); [Методические указания..., 1989](#); [Revised..., 2008](#)) и адаптивно-ландшафтного земледелия ([Кирюшин, 2011](#); [Смирнова и др., 2012](#)). Комплекс организационно-хозяйственных, агротехнических, лесомелиоративных и гидротехнических противоэрзационных мероприятий призван обеспечить допустимый уровень потенциального смыва, компенсируемый процессами почвообразования ([Сурмач, 1992](#); [Методическое пособие..., 2001](#)) либо агро-

техническими приемами воспроизводства почвенного плодородия ([Кузнецов и др., 2002](#)).

В географии почв расчетные методы поверхностного смыыва перспективны для изучения механизмов и скорости агрогенной трансформации почв и почвенного покрова склонов ([Сорокина, 1988](#); [Клещенко и др., 2016](#)), и, в более общем случае, – для изучения структурно-функциональной организации денудационно-аккумулятивных структур почвенного покрова ([Фридланд, Глазовская, 1979](#); [Козлов и др., 2017](#)). В числе прочего эти работы направлены на обоснование региональных особенностей эродируемости почв и трансформации почвенного покрова при одинаковых темпах водной эрозии за одинаковый интервал времени ([Клещенко, 2015](#)).

В условиях сокращения отечественной сети эрозионных стационаров ([Литвин, 2002](#)) важное значение имеет развитие косвенных методов оценки эродируемости на основе сопоставления расчетных темпов водной эрозии с различными индикаторами фактической смытости почв ([Жидкин и др., 2015](#)) и показателями эрозионной трансформации почвенного покрова склонов ([Клещенко и др., 2016](#)). В этом отношении эффективны новые методы и технологии мониторинга склоновых процессов ([Eltner et al., 2014](#)), алгоритмы имитационного моделирования стока ([Golden et al., 2014](#)), аналитические средства геоморфометрии ([Florinsky, 2016](#)), педометрики и цифровой почвенной картографии ([Minasny, McBratney, 2015](#)). Помимо познавательной ценности новые технологические возможности способны компенсировать высокую трудоемкость действующих методик картирования эрозионноопасных земель и проектирования противоэрзионных мероприятий. Однако для формирования нового технологического уклада практики землестроительных работ и организации противоэрзионных систем земледелия необходимы научно-методические изыскания, к числу которых относятся и материалы данной статьи.

Целью исследования являлась разработка методических подходов к цифровому картографированию эрозионной деградации пахотных земель на расчетной основе. Показателем эрозионной деградации служит степень трансформации почвенного покрова, выраженная участием почв эрозионно-аккумулятивного

ряда в составе почвенных комбинаций склонов ([Сорокина, 2005](#)). В первую очередь исследование направлено на обоснование принципа согласования расчетных темпов эрозии с компонентным составом эрозионных почвенных комбинаций. Другие методические вопросы цифрового почвенно-эрзационного картографирования, в частности, обоснование эрозионной модели и значений ее управляющих параметров, составляют предмет будущих исследований.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Исследование выполнено на полях Курской опытной станции – полигона с длительной историей изучения почв и почвенно-го покрова Среднерусской лесостепной провинции возвышенных эрозионных равнин ([Сорокина, 1976](#); [Фишман, 1977](#); [Kozlov et al., 2018](#)). Соседство с целинными участками Центрально-Черноземного заповедника (рис. 1) позволяет проводить оценку степени трансформации пахотных почв в сравнении с их ненарушенными аналогами ([Целищева, Дайнеко, 1966](#)).

Почвенный покров междуречных равнин представлен пятнистостями черноземов типичных, выщелоченных и типичных карбонатных с участием луговато-черноземных почв в днищах водосборных понижений. Значительный перепад высот (110 м) при густоте овражно-балочного расчленения $1.3 \text{ км}/\text{км}^2$ определил широкое участие в границах пашни склоновых земель (37%), подверженных плоскостной эрозии с темпами $5\text{--}20 \text{ т}\cdot\text{га}^{-1}\cdot\text{год}^{-1}$ ([Литвин, 2002](#); [Голосов и др., 2012](#)). Как следствие в составе их почвенного покрова принимают участие слабо- и среднесмытые черноземы. Относительно невысокая степень эрозионной деградации склоновых земель связана с коротким периодом распашки почв с мощным и сверхмощным гумусовым горизонтом.

Земледельческое освоение участка началось в середине XVIII в. с придолинных склонов р. Сейм. Полное освоение междуречных равнин под пашню совпадает с периодом организации Центрально-Черноземного заповедника в 1935 г. До 20-х годов XX в. применялся трехпольный севооборот: пар – озимые – яровые, сменившийся пятипольем: пар – однолетние травы – озимые – яровые – пропашные ([Кузнецова и др., 2011](#)). Противоэрзационное землеустройство выполнено в 1960-х годах, оно включало ор-

ганизацию полезащитных лесополос и введение почвозащитных севооборотов на склонах.

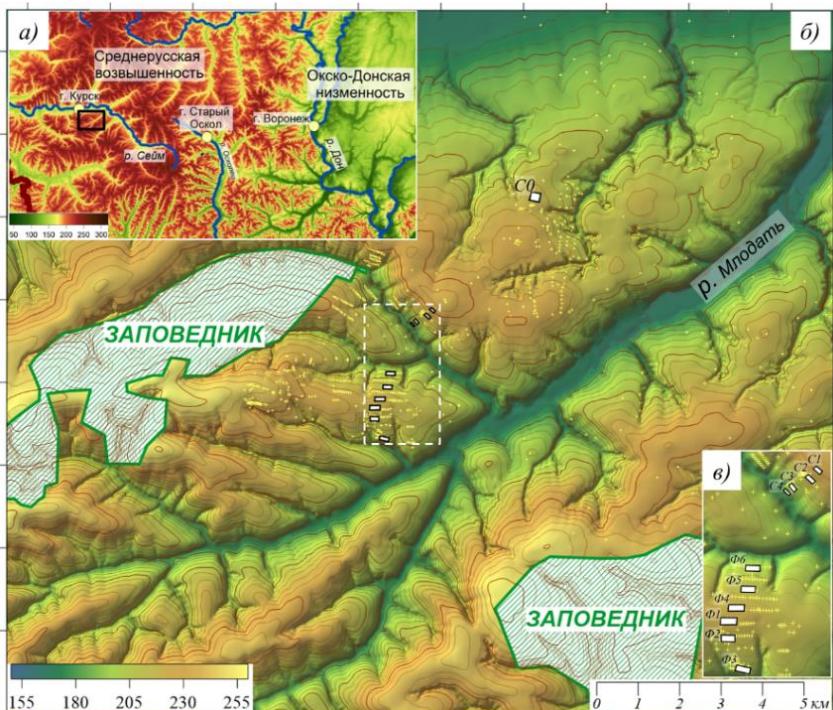


Рис. 1. Физико-географическое положение (а) и рельеф региона исследования (б) с положением площадок детальной почвенной съемки (в) и точек почвенного опробования.

Fig. 1. The geographical location (a) and topography of the study area (b) with the location of sites for detailed soil survey (c) and points of soil studies.

Соотношение талой и ливневой эрозии в регионе находится в сложной зависимости от погодно-климатических и агрономических условий ([Литвин, 2002](#)). Последние десятилетия с мягкими зимами и частыми оттепелями отмечены снижением весеннего склонового стока ([Барабанов и др., 2018](#)). Однако в ротациях севооборотов при соблюдении комплекса противоэррозионных мероприятий темпы ливневой эрозии уступают талой ([Сурмач, 1992](#)).

Принципиальная схема исследования включает пять этапов:

- 1) расчет темпов смыва почв по элементам регулярной сетки на основе эрозионной модели (рис. 3);
- 2) оценка фактической степени эродированности почв на представительном массиве точек полевого опробования;
- 3) сопоставление расчетных темпов смыва и фактической эродированности почв (рис. 4а, 4б);
- 4) построение карт компонентного состава эрозионных почвенных комбинаций на расчетной основе (рис. 5, 6);
- 5) верификация результатов (рис. 7).

Темпы смыва оценены в соответствии с моделью WaTEM/SEDEM v.2004 ([Van Oost et al., 2000](#); [Van Rompay et al., 2001](#)), учитывающей взаимодействия между эрозионным потенциалом дождевых осадков, эродируемостью почв, эрозионным индексом возделываемых культур в среднемноголетнем севообороте и особенностями рельефа. Алгоритм расчета базируется на модифицированном универсальном уравнении смыва почв RUSLE ([Renard et al., 1997](#)) и имеет сходные входные параметры. Эрозионный индекс дождевых осадков ($0.029 \text{ МДж} \cdot \text{мм}^{-2} \cdot \text{час}^{-1} \cdot \text{год}^{-1}$) был взят из базы данных Global Rainfall Erosivity ([Panagos et al., 2017](#)). Значения эродируемости почв ($K = 35 \text{ кг} \cdot \text{ч} \cdot \text{МДж}^{-1} \cdot \text{мм}^{-1}$) получены в соответствии с эмпирическим обобщением из руководства RUSLE ([Renard et al., 1997](#)) с параметрами пахотного горизонта черноземов типичных среднесуглинистого состава:

$$K = (0.00021 \times M^{1.14} \times (12 - OM) + 3.25 \times (s - 2) + 2.5 \times (p - 3) / 100) \times 0.1317,$$

где M – показатель гранулометрического состава почв, взятого по трем фракциям $M = (m_{0.002} + m_{0.002-0.05}) \times (100 - m_{0.05-0.1}) = 4270$; OM – содержание органического углерода (3.64%), s – категория оструктуренности почв (2 – мелкозернистая, 2–5 мм), p – категория водопроницаемости почв (4 – умеренно низкая).

Для расчетов длины линий тока и крутизны поверхности (LS-фактор) использована цифровая модель рельефа (ЦМР), по-

строенная по высотным отметкам топографической карты с рекомендуемыми для модели WaTEM/SEDEM размерами ячейки 20×20 м. При таком пространственном разрешении ЦМР расчетные значения LS-фактора отражают стокоформирующее влияние мезорельефа.

Расчет выполнен для единого массива пашни без учета конфигурации полевой инфраструктуры и лесомелиоративных полос (рис. 3). Почвозащитная роль возделываемых культур за ротацию севооборота относительно эродируемости чистого пара задана значением 0.4 для всего периода земледельческого освоения ([Сурмач, 1992](#)). Такие допущения продиктованы стремлением охарактеризовать максимальные проявления плоскостной эрозии в отсутствии достоверных сведений о структуре и динамике землепользования в границах модельного участка.

Фактическая степень смытости почв пашни диагностировалась в 859 пунктах по морфологическим признакам и вертикальному распределению гумуса. Использована региональная схема диагностики почв эрозионно-аккумулятивного ряда Курской опытной станции ([Сорокина, 1966](#); [Научные основы..., 2013](#)). Мощность гумусового горизонта несмытых черноземов составляла 74 ± 13 см при отношении $A/(A + AB)$ 0.5–0.7 и содержании гумуса в пахотном горизонте 5.8–6.4% (Э0, гор. А = 60–85 см, 595 описаний). При сокращении гумусового горизонта на 30% почва диагностировалась как слабоэродированная (Э1, гор. А = 40–60 см, 204 описания), на 50% – как среднеэродированная (Э2, гор. А = 30–40 см, 60 описаний). Сильноэродированные почвы с полностью смытым гумусовым горизонтом не обнаружены. При мощности гор. А более 85 см черноземы диагностировались как намытые.

Расчетные значения отражают стокоформирующее влияние мезорельефа, в то время как организация эрозионных элементарных почвенных ареалов контролируется мезо-, микро- и нанорельефом и выявляется при почвенно-топографической съемке в детальном масштабе (рис. 2). Как следствие, одинаковым значениям расчетного смыва соответствуют почвы разной эродированности (рис. 4а). Их соотношение меняется от низких к высоким темпам (рис. 4б) и поддается статистической оценке через условную веро-

ятность встречи Э0, Э1 и Э2 почв в составе почвенных комбинаций (ПК) как доли описаний почв каждой степени эродированности от общего числа описаний по градациям расчетной эрозии 0–10, 10–20, 20–30, ..., 60–70 $\text{т}\cdot\text{га}^{-1}\cdot\text{год}^{-1}$ (рис. 4в). По фактическим данным построены параметрические функции принадлежности почв элементов мезорельефа к почвам разной степени эродируемости в диапазоне расчетных темпов смыыва (рис. 4б). Функции принадлежности описывают изменение долевого участия Э0-Э1-Э2 почв в составе ПК элементов мезорельефа.

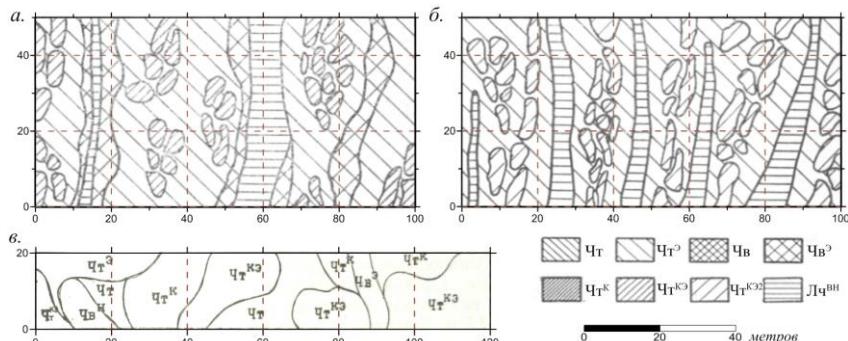


Рис. 2. Структура почвенного покрова лесостепи Среднерусской возвышенности в сравнении с ячейками сетки 20×20 м: **а**) приводораздельный склон 1° ([Фишман, 1977](#)), **б**) прибалочный склон 4° ([Фишман, 1977](#)), **в**) прибалочный склон 5° ([Сорокина, 1976](#)). Почвы: Чт³ – черноземы типичные слабоэродированные, Чв³ – черноземы выщелоченные слабоэродированные, Чт⁹ – черноземы типичные карбонатные слабоэродированные, Чт⁹² – черноземы типичные карбонатные среднеэродированные, Лч⁹⁹ – лугово-черноземные выщелоченные намытые.

Fig. 2. The structure of the soil cover of the forest-steppe of the Central Russian Upland in comparison with grid cells of 20×20 m: **а**) a near watershed slope of 1° ([Fishman, 1977](#)), **б**) a near gully slope of 4° ([Fishman, 1977](#)), **в**) a near gully slope of 5° ([Sorokina, 1976](#)). Soils: Чт³ – typical low-eroded chernozem, Чв³ – leached low-eroded chernozem, Чт⁹ – typical carbonate low-eroded chernozem, Чт⁹² – typical carbonate medium-eroded chernozem, Лч⁹⁹ – leached meadow-chernozem warp soil.

Функции принадлежности использованы для прогноза участия Э0, Э1 и Э2 почв в составе ПК каждого элемента сетки. По-

следующий анализ позволяет для каждого пикселя получить: 1) наиболее вероятную почвенную категорию; 2) неопределенность прогноза как максимальное значение вероятности; 3) типы сочетаний наиболее вероятной (преобладающей) почвенной категории с двумя сопутствующими ([Козлов, Сорокина, 2012](#)). Типизация ПК проведена в соответствии с существующими нормативами ([Общесоюзная инструкция..., 1976](#)). Всего выделено шесть групп ПК: 1 – зональные с преобладанием несмытых почв ($\mathcal{E}0 > 0.9$); 2 – эрозионно-зональные с долей смытых почв 0.1–0.25; 3 – слабоэродированные с долей смытых почв 0.25–0.5; 4 – среднеэродированные с долей смытых почв больше 0.5 и преобладанием слабосмытых над среднесмытыми; 5 – сильноэродированные с долей смытых почв больше 0.5 и преобладанием среднесмытых над слабосмытыми; 6 – намытые. Изображение наиболее вероятной почвенной категории показывает ареалы преобладающей почвы (рис. 5в), а изображение типизированных сочетаний преобладающих и сопутствующих категорий – ареалы групп почвенных комбинаций (рис. 6).

Верификация результатов картографического моделирования проведена путем сопоставления компонентного состава ПК характерных элементов мезорельефа, полученных в соответствии с эрозионной моделью и на основе детальной почвенной съемки одиннадцати ключевых участков площадью 0.25–0.5 га ([Сорокина, 1976](#); [Фишман, 1977](#)).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Карта расчетной интенсивности эрозионно-аккумулятивных процессов (рис. 3) отражает различия в потенциальных темпах смыва почв в связи с морфологией склонов. Интенсивность смыва возрастает по мере увеличения протяженности и крутизны склонов и на покатых прибалочных склонах превышает $40 \text{ т} \cdot \text{га}^{-1} \cdot \text{год}^{-1}$.

По интенсивности смыва 60% площади пашни относится к землям с незначительной эрозионной опасностью; 20% – слабой; 10% – средней, 3% – сильной; 1% – очень сильной ([Методические указания..., 1989](#)). Еще 6% пашни относятся к землям с потенциально намытыми почвами, в том числе со значимыми темпами аккумуляции (более $3 \text{ т} \cdot \text{га}^{-1} \cdot \text{год}^{-1}$) – 1%. В первую очередь это выпо-

ложенные участки склонов, снижающие транспортирующую способность водных потоков, а также днища ложбин, концентрирующие сток. Подавляющая часть наносов аккумулируется за пределами пашни.

Средние темпы смыва по всему массиву пашни $4.2 \text{ т}\cdot\text{га}^{-1}\cdot\text{год}^{-1}$ адекватны существующим оценкам для лесостепи Среднерусской возвышенности ([Литвин, 2002](#)). Однако расчетные значения смыва для покатых склонов (более $40 \text{ т}\cdot\text{га}^{-1}\cdot\text{год}^{-1}$) следует считать завышенными. При таких темпах эрозии за 100 лет почвенный профиль сократился бы более чем на 40 см, и почва диагностировалась как сильносмытая. Такие почвы при полевом обследовании не встретились, несмотря на имеющиеся указания об их ограниченном участии в составе почвенного покрова старопахотных прибалочных склонов ([Тишкоина, Иванова, 2010](#)).

Существующие региональные оценки темпов смыва распахиваемых склонов не превышают $20 \text{ т}\cdot\text{га}^{-1}\cdot\text{год}^{-1}$ ([Литвин, 2002](#)). В том числе на представительном для объекта исследований экспериментальном водосборе ([Голосов и др., 2012](#); [Жидкин и др., 2015](#)) темпы эрозии для пологих склонов разной экспозиции определены пятью методами в диапазоне $2\text{--}19 \text{ т}\cdot\text{га}^{-1}\cdot\text{год}^{-1}$. Завышение темпов смыва имитационными моделями не является исключительным, что наглядно демонстрирует мега-анализ данных многочисленных исследований ([García-Ruiz et al., 2015](#)).

Полученные результаты свидетельствуют о завышении площади классов эрозионной опасности (рис. 3) и необходимости дальнейшего уточнения входных параметров имитационной модели. Однако для целей пространственного моделирования эрозионных структур почвенного покрова абсолютные значения потенциальных темпов смыва не играют определяющей роли, ведущее значение имеют относительные различия расчетных темпов эрозии между склонами разной морфологии.

Для их верификации проведено сопоставление расчетной и фактической эрозии в точках почвенных обследований (рис. 4). В ряду почв возрастающей эродированности наблюдается статистически достоверное увеличение расчетного смыва (рис. 4б).

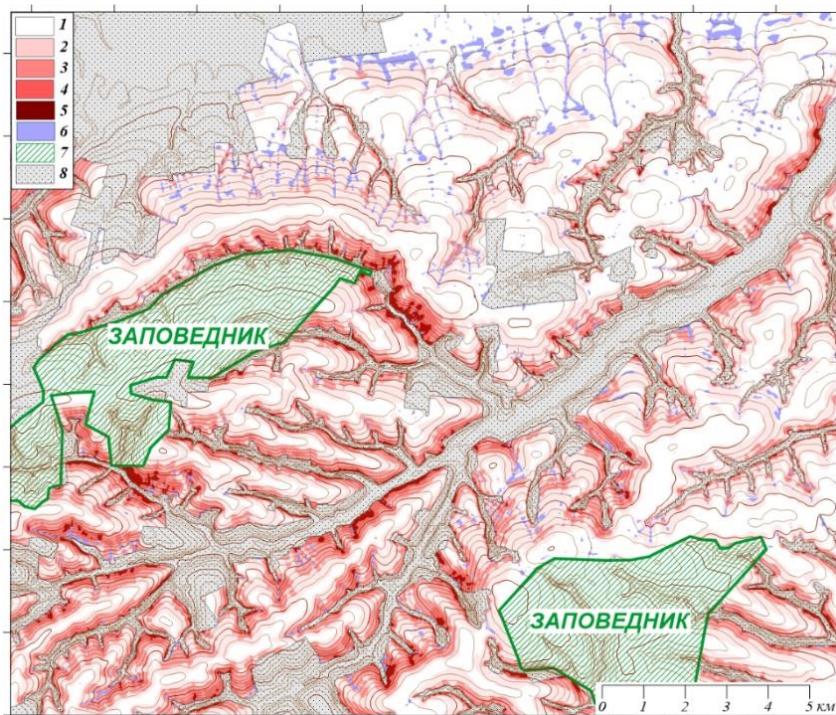


Рис. 3. Карта-схема расчетных темпов эрозионно-аккумулятивных процессов, приведенных к градациям эрозионной опасности ([Методические указания..., 1989](#)): 1) незначительной (смыв до $3 \text{ т}\cdot\text{га}^{-1}\cdot\text{год}^{-1}$); 2) слабой ($3\text{--}10 \text{ т}\cdot\text{га}^{-1}\cdot\text{год}^{-1}$); 3) средней ($10\text{--}20 \text{ т}\cdot\text{га}^{-1}\cdot\text{год}^{-1}$); 4) сильной ($20\text{--}40 \text{ т}\cdot\text{га}^{-1}\cdot\text{год}^{-1}$); 5) очень сильной (более $40 \text{ т}\cdot\text{га}^{-1}\cdot\text{год}^{-1}$); 6) намытые земли (аккумуляция $3\text{--}10 \text{ т}\cdot\text{га}^{-1}\cdot\text{год}^{-1}$); 7) целинные участки Центрально-Черноземного заповедника; 8) пастбища, сенокосы, селитебные земли.

Fig. 3. Map scheme of erosion and accumulation processes classified according to erosion-hazard rating ([Методические указания..., 1989](#)): 1) insignificantly-eroded (soil losses up to $3 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{year}^{-1}$); 2) slightly-eroded ($3\text{--}10 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{year}^{-1}$); 3) medium-eroded ($10\text{--}20 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{year}^{-1}$); 4) highly-eroded ($20\text{--}40 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{year}^{-1}$); 5) severely-eroded (over $40 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{year}^{-1}$); 6) warmland (accumulation of $3\text{--}10 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{year}^{-1}$); 7) virgin lands of the Central Black Earth Reserve; 8) pastures, hayfields, settlement lands.

Его средние темпы для Э2 почв ($25 \text{ т}\cdot\text{га}^{-1}\cdot\text{год}^{-1}$) в два раза выше, чем для Э1 почв ($13 \text{ т}\cdot\text{га}^{-1}\cdot\text{год}^{-1}$) и в пять раз выше, чем для

Э0 почв ($5 \text{ т}\cdot\text{га}^{-1}\cdot\text{год}^{-1}$). Вместе с тем диапазоны значений расчетного смыыва для Э0-Э1-Э2 почв пересекаются, т. е. в пределах элементов мезорельефа с одинаковыми значениями потенциального смыыва встречаются почвы разной степени эродированности.

Зависимость доли Э0 почв от интенсивности эрозии (x) описывается Z-сигмоидной функцией (рис. 4в) со “средней” точкой при расчетном смыве $30 \text{ т}\cdot\text{га}^{-1}\cdot\text{год}^{-1}$ и коэффициентом крутизны 0.095 (1); доля Э1 почв описывается гауссовой функцией с максимумом при смыве $40 \text{ т}\cdot\text{га}^{-1}\cdot\text{год}^{-1}$ (2); Э2 – S-сигмоидной функцией со “средней” точкой при смыве $54 \text{ т}\cdot\text{га}^{-1}\cdot\text{год}^{-1}$ и крутизной 0.1 (3).

$$\mu_{\text{Э}0}(x) = \frac{1}{1+\exp(0.095\cdot(x-30))} \quad (1)$$

$$\mu_{\text{Э}1}(x) = \exp\left(-\frac{(x-40)^2}{2\cdot0.05^2}\right) \cdot 0.5 \quad (2)$$

$$\mu_{\text{Э}2}(x) = \frac{1}{1+\exp(-0.1\cdot(x-54))} \quad (3)$$

Установленные соотношения позволяют для каждого элемента регулярной сетки (i,j) рассчитать вектор подобия его почв и почв эрозионного ряда S_{ij} ($S_{ij}^{\text{Э}0}$, $S_{ij}^{\text{Э}1}$, $S_{ij}^{\text{Э}2}$). Последующий анализ вектора подобия позволяет получить для каждого пикселя: 1) наиболее вероятную (преобладающую по площади) почвенную категорию (рис. 5в); 2) меру пестроты состава почвенной комбинации как максимальное из трех значений S_{ij} (рис. 5г); 3) типы сочетаний преобладающей почвенной категории с двумя сопутствующими (рис. 6). Полученные карты (рис. 5, рис. 6) передают различные аспекты состава почвенных комбинаций распахиваемых склонов.

При заданных входных параметрах модели WaTEM/SEDEM эрозионная трансформация почвенного покрова (доля смытых почв 10%) начинается при величине расчетной эрозии $8 \text{ т}\cdot\text{га}^{-1}\cdot\text{год}^{-1}$. Дальнейшее нарастание расчетных темпов смыва сопровождается снижением доли Э0 и синхронным увеличением доли Э1 и Э2 почв в составе ПК склонов (рис. 4в). Суммарная доля смытых почв 25–50–75–90% соответствует значениям смыва $18–30–42–54 \text{ т}\cdot\text{га}^{-1}\cdot\text{год}^{-1}$. В интервале значений смыва $32–52 \text{ т}\cdot\text{га}^{-1}\cdot\text{год}^{-1}$ в соста-

ве почвенных комбинаций преобладают слабосмытые почвы, а начиная с $52 \text{ т} \cdot \text{га}^{-1} \cdot \text{год}^{-1}$ – среднесмытые почвы.

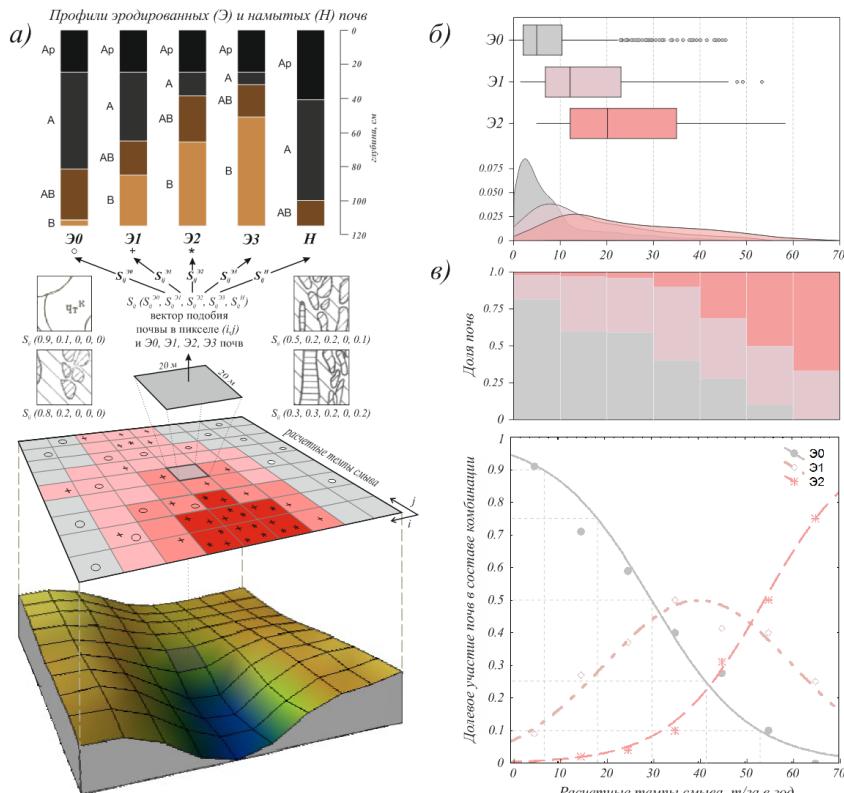


Рис. 4. Сопоставление расчетных темпов смыва с фактической степенью эродированности почв в точках опробования: **а)** схема организации анализа; **б)** сравнение расчетных темпов смыва в точках полевой диагностики Э0-Э1-Э2 почв; **в)** экспериментальная и модельная зависимости состава эрозионных почвенных комбинаций от расчетной интенсивности водной эрозии.

Fig. 4. Comparison of the calculated rates of soil losses with the actual degree of soil erosion at the studying points: **a)** the scheme of analysis organization; **б)** comparison of the calculated rates of soil denudation at the points of field diagnostics of Э0-Э1-Э2 soils; **в)** experimental and modelled dependence of the composition of eroded soil combinations on the calculated intensity of water erosion.

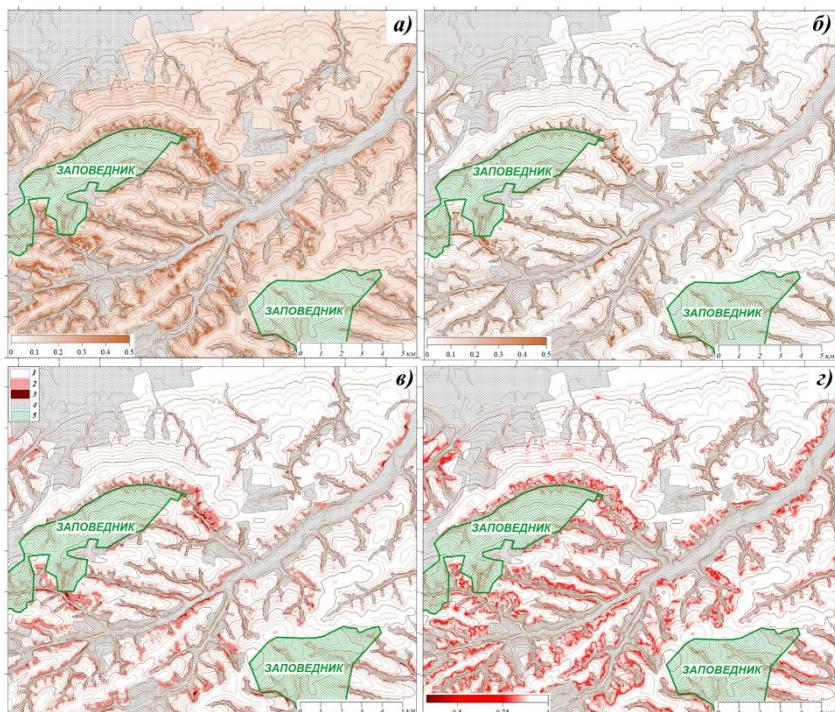


Рис. 5. Компонентный состав эрозионных почвенных комбинаций пашни: *а)* доля Э1 почв; *б)* доля Э2 почв; *в)* преобладающая в составе ПК категория смытости почв (1 – не смытые (Э0), 2 – слабосмытые (Э1), 3 – среднесмытые (Э2)); *г)* мера пестроты состава почвенных комбинаций (0.33 – полидоминантные, 1 – монодоминантные).

Fig. 5. Component structure of eroded soils combinations (SC) of arable lands: *a)* share of Э1 soils; *б)* share of Э2 soils; *в)* prevailing category of eroded soils in the structure of SC (1 – not eroded (Э0), 2 – slightly-eroded (Э1), 3 – medium-eroded (Э2)); *г)* the degree of patchiness in the structure of soil combinations (0.33 – polydominant, 1 – monodominant).

Установленное пространственное разнообразие состава и конфигурации эрозионных почвенных комбинаций (рис. 5, 6) качественно соответствует существующим представлениям ([Почвенная карта..., 1965](#); [Сорокина, 1976](#); [Фишман, 1977](#); [Тишкина, Иванова, 2010](#)).

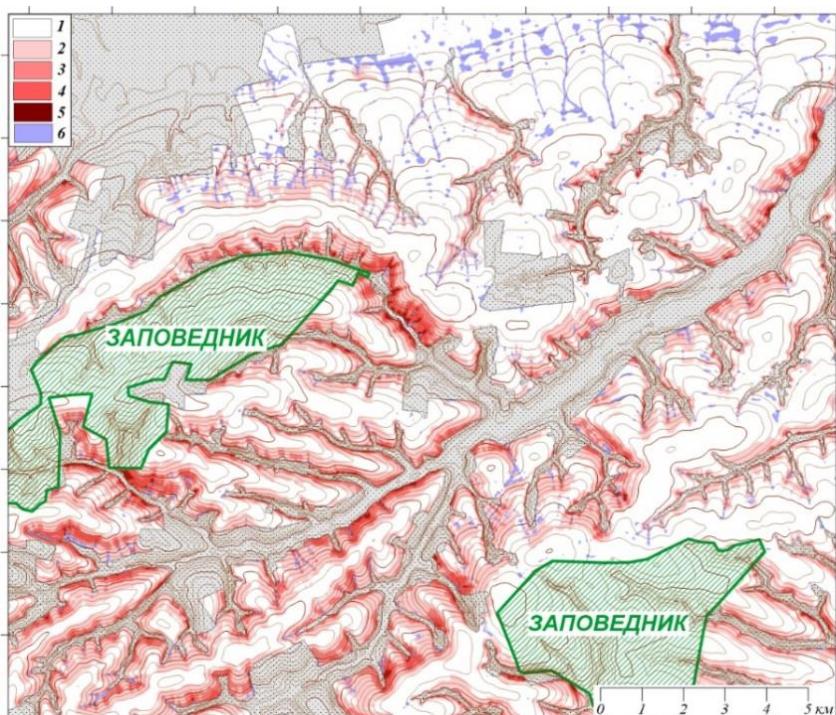


Рис. 6. Группы почвенных комбинаций пашни: 1 – зональные с преобладанием несмытых почв ($\mathcal{E}0 > 0.9$); 2 – эрозионно-зональные с долей смытых почв 0.1–0.25; 3 – слабоэродированные с долей смытых почв 0.25–0.5; 4 – среднеэродированные с долей смытых почв больше 0.5 и преобладанием слабосмытых над среднеэмытыми; 5 – сильноэродированные с долей смытых почв больше 0.5 и преобладанием среднеэмытых; 6 – намытые в границах области расчетной аккумуляции наносов (рис. 3).

Fig. 6. Groups of soils combinations of arable land: 1 – zonal with predominance of not eroded soils ($\mathcal{E}0 > 0.9$); 2 – erosion-zonal with the share of eroded soils 0.1–0.25; 3 – slightly-eroded with the share of eroded soils 0.25–0.5; 4 – medium-eroded with the share of eroded soils more than 0.5 and where slightly-eroded soils predominate over medium-eroded soils; 5 – highly-eroded soils with the share of eroded soils more than 0.5 and prevalence of medium-eroded ones, 6 –warp soils located within the borders of calculated deposits accumulation area (Fig. 3).

Зональные группы ПК занимают слабонаклонные между-речные равнины, зонально-эрэзионные – пологие приводораздельные, а эрэзионные – покатые прибалочные склоны. Суммарно эрэзионно-зональные и эродированные группы ПК занимают 36% массива пашни, что соответствует общей площади склоновых земель крутизной более 2° . Сильноэрэдионные группы ПК ограниченно (4%) распространены в нижних частях покатых склонов. В северной придолинной части р. Сейм со слаборасчлененным рельефом преобладают зональные и эрэзионно-зональные группы ПК. Напротив, в пределах покатых и сильно-расчлененных придолинных склонов р. Младать и ее притоков большую роль играют эродированные группы ПК.

При качественном соответствии компонентного состава эрэзионных ПК склонам разной морфологии (рис. 6) наблюдается его расхождение с компонентным составом ПК площадок детальной почвенной съемки ([Сорокина, 1976](#); [Фишман, 1977](#)). Из одиннадцати площадок (рис. 1) только для трех (С0, Ф1 и Ф4) фактическая и предсказанная доля смытых почв совпадают (рис. 7). Для четырех площадок С1–С4, заложенных на выпуклом склоне возрастающей крутизны ([Сорокина, 1976](#)), модель завышает долю смытых почв в среднем на 20%. Для склоновых площадок М.И. Фишмана (Ф2, Ф3, Ф5 и Ф6) модель занижает площадь смытых почв.

В последнем случае выявленные расхождения объясняются принятыми М.И. Фишманом критериями диагностики слабо- и среднесмытых черноземов, завышающими их площадь. Об этом можно судить по профильному распределению гумуса в почвах склоновых площадок, приведенному в публикациях ([Фишман, 1971](#); [1977](#)). Например, на площадке Ф3 (рис. 2б) среднее содержание гумуса на глубине 60–70 см среднесмытых черноземов с мощностью А + АВ = 20–40 см ([Фишман, 1977](#)) составляет 3.91% ([Фишман, 1971](#), стр. 24), что превышает нижний порог гумусности горизонта А ([Сорокина, 1966](#)).

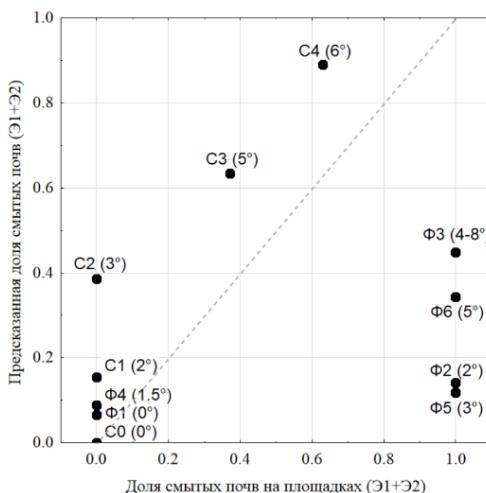


Рис. 7. Сопоставление участия смытых почв ($\mathcal{E}1 + \mathcal{E}2$) в составе почвенных комбинаций: фактического, установленное по материалам детальной почвенной съемки (ось X), и прогнозного, полученного при эрозионном моделировании (ось Y). C0–C4 – участки из работы [Н.П. Сорокиной \(1976\)](#); F1–F6 – участки из работы [М.И. Фишмана \(1971, 1977\)](#). В скобках указана крутизна вмещающего элемента мезорельефа.

Fig. 7. Comparison of the participation of eroded soils ($\mathcal{E}1 + \mathcal{E}2$) in the composition of the soils combinations: actual, revealed on the basis of detailed soil survey materials (X-axis), and predicted, obtained by erosion modeling (Y-axis). C0–C4 – adapted from the work of [N.P. Sorokina \(1976\)](#); F1–F6 – adapted from the work of [M.I. Fishman \(1971, 1977\)](#). The steepness of mesorelief element is indicated in brackets.

На площадках Н.П. Сорокиной диагностика смытых почв аналогична критериям, принятым в данном исследовании ([Научные основы..., 2013](#)). Показательно, что на склоновых площадках разных авторов прогнозная доля смытых почв растет по мере увеличения их крутизны независимо от принятых критериев смытости черноземов.

Вместе с тем проведенное сравнение демонстрирует неполное соответствие эрозионной модели фактическому проявлению водной эрозии. Принимая условность понятия “фактическое проявление эрозии” в свете известной метахронности этого явления ([Голосов и др., 2011](#); [Жидкин и др., 2015](#)), дальнейшее развитие

эрозионного моделирования структуры почвенного покрова склонов помимо учета талой эрозии ([Методические указания..., 1989](#); [Сухановский, 2013](#)) должно включать детализацию расчетов в связи с особенностями истории землепользования и других входных параметров; дальнейшее совершенствование критериев почвенно-морфологической диагностики эродированности почв; верификацию эрозионной модели на основе сопоставления расчетных темпов с данными других методов количественных оценок эрозионно-аккумулятивных процессов (изотопного и магнитного трассеров).

Развитие последней группы методов особенно важно для диагностики намытых и смыто-намытых почв как неотъемлемых компонентов эрозионных почвенных комбинаций (рис. 2). В данном исследовании ареал земель с намытыми почвами определен как область расчетной аккумуляции наносов с интенсивностью выше $3 \text{ т} \cdot \text{га}^{-1} \cdot \text{год}^{-1}$ (рис. 3). Для более дифференцированного описания их участия в составе почвенного покрова склонов (рис. 4а) необходимой повторности описаний намытых почв оказалось недостаточно.

После преодоления ряда методических ограничений предложенный подход к цифровому моделированию эрозионно-аккумулятивных структур почвенного покрова позволит формализовать оценку рисков агрогенной деградации склоновых земель при сложившейся практике их хозяйственного использования в сравнении с противоэрозионными рекомендациями внутрихозяйственного землеустройства и адаптивно-ландшафтного земледелия. Отечественные разработки советского периода не получили развития, в то время как их зарубежные аналоги (RUSLE2, WEPP – the Water Erosion Prediction Project и др.) активно используются при проектировании комплекса организационно-хозяйственных, агротехнических, лесомелиоративных и гидротехнических противоэрозионных мероприятий.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложена оригинальная методика цифрового картографирования эрозионной деградации пахотных земель. Показателем деградации служит компонентный состав структуры почвенного

покрова склонов. Скорость его эрозионной трансформации регионально специфична и зависит от интенсивности водной эрозии и генетических особенностей почвообразования. С учетом этого картографирование состава эрозионных ПК основано на сопоставлении расчетных темпов смыва со встречаемостью почв эрозионно-аккумулятивного ряда (рис. 4а) по элементам регулярной сетки при условии, что средние размеры их ареала меньше шага сетки (рис. 2). Соотношение почв в составе эрозионных ПК меняется от низких к высоким темпам смыва (рис. 4б) и поддается вероятностной оценке на всем интервале расчетных темпов эрозии (рис. 4в). Сравнительный анализ условных вероятностей участия эродированных почв в составе ПК в зависимости от величины смыва (рис. 5а, 5б) позволяет для каждого пикселя получить: 1) наиболее вероятную (преобладающую по площади) почвенную категорию (рис. 5в); 2) степень пестроты компонентного состава ПК (рис. 5г); 3) типы сочетаний преобладающей почвенной категории с сопутствующими (рис. 6).

Состоятельность предложенного подхода демонстрируется в региональных условиях северной лесостепи Среднерусской возвышенности (рис. 1). При расчете среднемноголетнего смыва черноземов использована модель WaTEM/SEDEM, учитывающая взаимодействие между эрозионным потенциалом дождевых осадков, эродируемостью почв, эрозионным индексом возделываемых культур в среднемноголетнем севообороте и особенностями рельефа. При заданных входных параметрах эрозионной модели качественные изменения в структуре почвенного покрова (доля слабосмытых почв более 10%) начинаются с порогового значения водной эрозии $8 \text{ т}\cdot\text{га}^{-1}\cdot\text{год}^{-1}$. При среднегодовой эрозии $30 \text{ т}\cdot\text{га}^{-1}$ доля смытых почв превышает 50%. В интервале значений смыва $32\text{--}52 \text{ т}\cdot\text{га}^{-1}\cdot\text{год}^{-1}$ в составе почвенных комбинаций преобладают слабосмытые почвы, а начиная с $52 \text{ т}\cdot\text{га}^{-1}\cdot\text{год}^{-1}$ – среднесмытые почвы.

Полученные карты корректно отражают региональное разнообразие и конфигурацию эрозионных почвенных комбинаций склонов. Суммарно эрозионно-зональные и эродированные группы ПК занимают 36% массива пашни. Вместе с тем наблюдается существенное расхождение компонентного состава эрозионных

ПК отдельных склонов, полученных по модели и в ходе детальной почвенной съемки (рис. 7). Это свидетельствует о необходимости дальнейшего развития имитационных моделей водной эрозии, в частности, учета в эрозионной модели талой эрозии и детализации расчетов в связи с особенностями истории землепользования и других входных параметров по каждому полю. Данная статья демонстрирует принципиальную возможность согласования расчетных темпов эрозии с компонентным составом эрозионных почвенных комбинаций.

Разработанный подход представляется перспективным для решения фундаментальных и прикладных задач, связанных с изучением структурно-функциональной организации почвенного покрова склонов и проектированием противоэрозионных мероприятий в адаптивно-ландшафтном земледелии.

БЛАГОДАРНОСТЬ

Авторы посвящают эту работу памяти Н.П. Сорокиной, определившей направление исследования, и благодарят М.М. Клещенко за помощь в проведении расчетов водной эрозии в модели WaTEM/SEDEM. Исследование выполнено при поддержке РФФИ, проект № 17-04-02217 (Козлов Д.Н., Лозбенев Н.И., методология и содержание исследования, сбор и анализ данных) и проект 18-35-20011 (Жидкин А.П., региональная параметризация эрозионной модели WaTEM/SEDEM).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Барабанов А.Т., Долгов С.В., Коронкевич Н.И., Панов В.И., Петелько А.И. Поверхностный сток и инфильтрация в почву талых вод на пашне в лесостепной и степной зонах Восточно-европейской равнины // Почвоведение. 2018. № 1. С. 62–69
2. Голосов В.Н., Геннадиев А.Н., Олсон К.Р., Маркелов М.В., Жидкин А.П., Ченdev Ю.Г., Ковач Р.Г. Пространственно-временные особенности развития почвенно-эрозионных процессов в лесостепной зоне Восточно-Европейской равнины // Почвоведение. 2011. № 7. С. 861–869.
3. Голосов В.Н., Беляев В.Р., Маркелов М.В., Шамишурин Е.Н. Особенности перераспределения наносов на малом водосборе за различные периоды его земледельческого освоения (водосбор Грачева

- лощина, Курская область) // Геоморфология. 2012. № 1. С. 25–35.
4. Жидкин А.П., Голосов В.Н., Светличный А.А., Пяткова А.В. Количественная оценка перераспределения наносов на пахотных склонах на основе использования полевых методов и математических моделей // Геоморфология. 2015. № 2. С. 41–53.
5. Козлов Д.Н., Лозбенев Н.И., Левченко Е.А. Структурно-функциональная организация водно-миграционных и эрозионно-аккумулятивных комплексов лесостепи Среднерусской возвышенности // Ландшафтovedение: теория, методы, ландшафтно-экологическое обеспечение природопользования и устойчивого развития: материалы XII Международной ландшафтной конференции. Тюмень: Изд-во Тюменского гос. ун-та, 2017. С. 71–76.
6. Кирюшин В.И. Теория адаптивно-ландшафтного земледелия и проектирования агроландшафтов. М.: КолоС, 2011. 443 с.
7. Клеценко М.М. Формирование эрозионных почвенных комбинаций в ареалах дерново-подзолистых и черноземных почв (сравнение экспериментальных и модельных данных) // Материалы Международной научной конференции XVIII Докучаевские молодежные чтения “Деградация почв и продовольственная безопасность России”. СПб: Издательский дом СПбГУ, 2015. С. 157–158.
8. Клеценко М.М., Козлов Д.Н., Сорокина Н.П. Закономерности формирования эрозионных почвенных комбинаций лесостепи Среднерусской возвышенности и их картографирование с использованием почвенно-морфологического и расчетного методов // Почвоведение – продовольственной и экологической безопасности страны: тезисы докладов VII съезда Общества почвоведов им. В.В. Докучаева и Всероссийской с международным участием научной конференции. Ч. II. М. – Белгород: Издательский дом “Белгород”, 2016. С. 422–423.
9. Кузнецов М.С., Гендузов В.М., Дубин В.Н. Допустимые потери почвы при эрозии и скорость гумусообразования // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2002. Вып. 56. С. 50–58.
10. Ларионов Г.А. Эрозия и дефляция почв: основные закономерности и количественные оценки. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1993. 200 с.
11. Литвин Л.Ф. География эрозии почв сельскохозяйственных земель России. М.: ИКЦ “Академкнига”, 2002. 255 с.
12. Методическое пособие и нормативные материалы для разработки адаптивно-ландшафтных систем земледелия. Курск: ЧуДо, 2001. 260 с.
13. Методические рекомендации по проектированию комплекса противоэрозионных мероприятий на расчетной основе / Д.Е. Ванин, Г.П. Сурмач и др. Курск, 1985. 167 с.

14. Методические указания по проектированию противоэрозионной организации территории при внутрихозяйственном землеустройстве в зонах проявления эрозии / Карцев Г.А., Лука А.Н., Носов С.И. и др. М., 1989. 79 с.
15. *Мирзухулава Ц.Е.* Водная эрозия почв (механизм, прогноз). Тбилиси: "Мецниереба", 2000. С. 3–421.
16. Научные основы предотвращения деградации почв (земель) сельскохозяйственных угодий России и формирования систем воспроизводства их плодородия в адаптивно-ландшафтном земледелии: Т. 1. Теоретические и методические основы предотвращения деградации почв (земель) сельскохозяйственных угодий. Коллективная монография. М.: Почв. ин-т им. В.В. Докучаева Россельхозакадемии, 2013. 756 с.
17. Общесоюзная инструкция по почвенным обследованиям и составлению крупномасштабных почвенных карт землепользований. М.: Колос, 1973. 48 с.
18. Почвенная карта Курской государственной сельскохозяйственной опытной станции М 1 : 10 000, ред. В.А. Носин. М.: Почвенный институт им. В.В. Докучаева, 1965.
19. *Рожков В.А.* Оценка эрозионной опасности почв // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2007. Вып. 59. С. 77–91. DOI: [10.19047/0136-1694-2007-59-77-91](https://doi.org/10.19047/0136-1694-2007-59-77-91).
20. *Светличный А.А., Черный С.Г., Швебс Г.И.* Эрозиоведение: теоретические и прикладные аспекты. Сумы: ИТД "Университетская книга", 2004. 410 с.
21. *Смирнова Л.Г., Нарожная А.Г., Шамарданова Е.Ю.* Сравнение двух методов расчета смыва почвы на водосборах с применением ГИС-технологий // Достижения науки и техники АПК. 2012. № 9. С. 10–12.
22. *Сорокина Н.П.* Статистический метод оценки смытости на примере мощных типичных черноземов Курской опытной станции // Почвоведение. 1966. № 2. С. 91–96.
23. *Сорокина Н.П.* Элементарные почвенные структуры на полях Курской опытной станции. // Крупномасштабная картография почв и ее значение в сельском хозяйстве черноземной зоны. Науч. тр. Почв. ин-та им. В.В. Докучаева. М., 1976. С. 155–173.
24. *Сорокина Н.П.* Динамика ПП распаханного склона Курской опытной станции за 20-летний период // Региональные модели плодородия почв как основа совершенствования зональных систем земледелия. М., 1988. С. 163–171.
25. *Сорокина Н.П.* Принципы типизации почвенных комбинаций при изучении агрогенных изменений почвенного покрова // Почвоведение. 2005. № 12. С. 1477–1488.

26. *Сурмач Г.П.* Рельефообразование, формирование лесостепи, современная эрозия и противоэррозионные мероприятия. Волгоград, 1992. 172 с.
27. *Сухановский Ю.П.* Модель дождевой эрозии почв // Почвоведение. 2010. № 9. С. 1114–1125
28. *Сухановский Ю.П.* Вероятностный подход к расчету эрозионных потерь почвы // Почвоведение. 2013. № 4. С. 474–481.
29. *Тишикина Э.В., Иванова Н.Н.* Почвенный покров распаханных и целинных прибалочных склонов (Курская область) // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. География. 2010. № 6. С. 73–79.
30. *Фишиман М.И.* Запасы гумуса в микрокомбинациях почвенного покрова лесостепи Среднерусской возвышенности // Почвоведение. 1971. № 11. С. 20–30.
31. *Фишиман М.И.* Черноземные комплексы и их связь с рельефом на Среднерусской возвышенности // Почвоведение. 1977. № 5. С. 17–30.
32. *Фрилланд В.М., Глазовская М.А.* Основные формы структур почвенного покрова Земли // Природа. 1979. № 11. С. 61–69
33. *Целищева Л.К., Дайнеко Е.К.* Очерк почв Стрелецкого участка Центрально-черноземного заповедника // Труды Центрально-черноземного государственного заповедника имени В.В. Алексина. 1966. Вып. 10.
34. *Beff L., Gunther T., Vandoorne B., Couvreur V., Javaux M.* Three-dimensional monitoring of soil water content in a maize field using Electrical Resistivity Tomography // Hydrol. Earth Syst. Sci. 2013. Vol. 17. Iss. 2. P. 595–609. DOI: [10.5194/hess-17-595-2013](https://doi.org/10.5194/hess-17-595-2013).
35. *De Vente J., Poesen J., Verstraeten G., Govers G., Vanmaercke M., Van Rompaey A., Arabkhedri M., Boix-Fayos C.* Predicting soil erosion and sediment yield at regional scales: Where do we stand? // Earth-Science Reviews. 2013. Vol. 127. P. 16–29.
36. *Dhami, B.S., Pandey, A.* Comparative review of recently developed hydrologic models // J. Indian Water Resour. Soc. 2013. Vol. 33. No. 3. P. 34–41.
37. *Eltner A., Baumgart P., Maas H.-G., Faust D.* Multi-temporal UAV data for automatic measurement of rill and interrill erosion on loess soil // Earth Surface Processes and Landforms. 2014. Vol. 40. Iss. 6. P. 741–755. DOI: [10.1002/esp.3673](https://doi.org/10.1002/esp.3673).
38. *Florinsky I.V.* Digital terrain analysis in soil science and geology. Amsterdam: Elsevier, Academic Press, 2016. 506 p.
39. *García-Ruiz J.M., Beguería S., Nadal-Romero E., González-Hidalgo J.C., Lana-Renault N., Sanjuán Y.* A meta-analysis of soil erosion rates across the world // Geomorphology. 2015. Vol. 239. P. 160–173.

40. *Golden H.E., Lane C.R., Amatya D.M., Bandilla K.W., Hadas R.K., Knights C.D., Ssegane H.* Hydrologic connectivity between geographically isolated wetlands and surface water systems: A review of select modeling methods // *Environmental Modelling & Software*. 2014. Vol. 53. P. 190–206.
41. *Karydas C.G., Panagos P., Gitas I.Z.* A classification of water erosion models according to their geospatial characteristics // *Digital Earth*. 2014. Vol. 7. Iss. 3. P. 229–250. DOI: [10.1080/17538947.2012.671380](https://doi.org/10.1080/17538947.2012.671380).
42. *Kozlov D.N., Levchenko E.A., Lozbenev N.I.* Soil combinations as an object of DSM: a case study in chernozems area of the Russian Plain. In: Arrouays D., Savin I., Leenaars J., McBratney A. (Eds.), *GlobalSoilMap – Digital Soil Mapping from Country to Globe*. London: CRC Press, 2018. P. 81–88.
43. *Minasny B., McBratney A.* Digital soil mapping: A brief history and some lessons // *Geoderma*. 2016. Vol. 264. Part B. P. 301–311.
44. *Panagos P., Borrelli P., Poesen J. et al.* The new assessment of soil loss by water erosion in Europe // *Environmental Science & Policy*. 2015. Vol. 54. P. 438–447. DOI: [10.1016/j.envsci.2015.08.012](https://doi.org/10.1016/j.envsci.2015.08.012).
45. *Panagos P., Borrelli P., Meusburger K. et al.* Global rainfall erosivity assessment based on high-temporal resolution rainfall records // *Sci Rep*. 2017. 7 (1):4175. DOI: [10.1038/s41598-017-04282-8](https://doi.org/10.1038/s41598-017-04282-8).
46. *Pandey A., Himanshu S.K., Mishra S.K., Singh V.P.* Physically based soil erosion and sediment yield models revisited // *Catena*. 2016. Vol. 147. P. 595–620.
47. *Renard K., Foster G., Weesies G., McCool D., Yoder D.* Predicting soil erosion by water: a guide to conservation planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE). *USDA Agriculture Handbook*. 1997. 384 p. URL: https://www.ars.usda.gov/ARSUserFiles/64080530/rusle/ah_703.pdf.
48. Revised Universal Soil Loss Equation Version 2 (RUSLE2). User's reference guide // *USDA-Agricultural Research Service*. 2008. 430 p. URL: http://fargo.nserl.purdue.edu/rusle2_dataweb/userguide/RUSLE2_User_Ref_Guide_2008.pdf.
49. *Van Oost K., Govers G., Desmet P.* Evaluating the effects of changes in landscape structure on soil erosion by water and tillage // *Landscape Ecology*. 2000. Vol. 15. Iss. 6. P. 577–589. DOI: [10.1023/A:1008198215674](https://doi.org/10.1023/A:1008198215674).
50. *Van Rompaey A., Verstraeten G., Van Oost K., Govers G., Poesen J.* Modelling mean annual sediment yield using a distributed approach // *Earth Surface Processes and Landforms*. 2001. Vol. 26. Iss. 11. P. 1221–1236.
51. *Verstraeten G., Van Oost K., Van Rompaey A., Poesen J., Govers G.* Evaluating an integrated approach to catchment management to reduce soil loss and sediment pollution through modelling // *Soil Use and Management*. 2002. Vol. 18. P. 386–394.

REFERENCES

1. Barabanov A.T., Dolgov S.V., Koronkevich N.I., Panov V.I., Petel'ko A.I., Poverkhnostnyy stok i infiltatsiya v pochvu talykh vod na pashne v lesostepnoy i stepnoy zonakh Vostochno-evropeyskoy ravniny (Surface runoff and melt water infiltration on arable land in the forest-steppe and steppe zones of the East European Plain), *Pochvovedenie*, 2018, No. 1, pp. 62–69
2. Golosov V.N., Gennadiev A.N., Olson K.R., Markelov M.V., Zhidkin A.P., Chendev Yu.G., Kovach R.G., Prostranstvenno-vremennye osobennosti razvitiya pochvenno-erozionnykh protsessov v lesostepnoy zone Vostochno-Evropeyskoy ravniny (Spatial-temporal features of the development of soil-erosion processes in the forest-steppe zone of the East European Plain), *Pochvovedenie*, 2011, No. 7, pp. 861–869.
3. Golosov V.N., Belyaev V.R., Markelov M.V., Shamshurina E.N., Osobennosti pereraspredeleniya nanosov na malom vodosbore za razlichnye periody ego zemledel'cheskogo osvoeniya (vodosbor Gracheva loshchina, Kurskaya oblast') (Peculiarities of sediment redistribution at a small catchment for different periods of its agricultural development (catchment Gracheva hollow, Kursk region)), *Geomorfologiya*, 2012, No. 1, pp. 25–35.
4. Zhidkin A.P., Golosov V.N., Svetlichnyy A.A., Pyatkova A.V., Kolichestvennaya otsenka pereraspredeleniya nanosov na pakhotnykh sklonakh na osnove ispol'zovaniya polevykh metodov i matematicheskikh modeley (Quantitative assessment of sediment redistribution on arable slopes based on the use of field methods and mathematical models), *Geomorfologiya*, 2015, No. 2, pp. 41–53.
5. Kozlov D.N., Lozbenev N.I., Levchenko E.A., Strukturno-funktional'naya organizatsiya vodno-migratsionnykh i erozionno-akkumulyativnykh kompleksov lesostepi Srednerusskoy vozvyshennosti, *Landshaftovedenie: teoriya, metody, landshaftno-ekologicheskoe obespechenie prirodopol'zovaniya i ustoychivogo razvitiya: materialy XII Mezhdunarodnoy landshaftnoy konferentsii* (Landscape Science: Theory, Methods, Landscape-Environmental Support for Nature Management and Sustainable Development: Proc. XII Int. Landscape Conf.), Tyumen': Izd-vo Tyumenskogo gos. un-ta, 2017, pp. 71–76.
6. Kiryushin V.I. *Teoriya adaptivno-landshaftnogo zemledeliya i proektirovaniya agrolandshaftov* (The theory of adaptive landscape farming and the design of agrolandscapes), Moscow: KoloS, 2011, 443 p.
7. Kleshchenko M.M., Formirovaniye erozionnykh pochvennykh kombinatsiy v arealakh derno-podzolistykh i chernozemnykh pochv (sravnenie eksperimental'nykh i model'nykh dannnykh) (Formation of erosion soil combinations in the areas of sod-podzolic and chernozem soils (comparison of

experimental and model data)), *Materialy Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii XVIII Dokuchaevskie molodezhnye chteniya “Degradatsiya pochv i prodovol'stvennaya bezopasnost' Rossii”* (Proc. Int. Sci. Conf. – XVIII Dokuchaev youth readings “Soil degradation and food security of Russia”), St. Petersburg: Izdatel'skiy dom SPbGU, 2015, pp. 157–158.

8. Kleshchenko M.M., Kozlov D.N., Sorokina N.P., *Zakonomernosti formirovaniya erozionnykh pochvennykh kombinatsiy lesostepi Srednerusskoy vozvyshennosti i ikh kartografirovaniye s ispol'zovaniem pochvenno-morfologicheskogo i raschetnogo metodov* (Patterns of formation of erosive soil combinations of the forest-steppe of the Central Russian Upland and their mapping using soil-morphological and calculation methods), In: *Pochvovedenie – prodovol'stvennoy i ekologicheskoy bezopasnosti strany: tezisy dokladov VII s'ezda Obshchestva pochvovedov im. V.V. Dokuchaeva i Vserossiyskoy s mezhdunarodnym uchastiem nauchnoy konferentsii* (Soil Science – Food and Environmental Safety of the Country: Proc. VII Congress of the Society of Soil Scientists named after V.V. Dokuchaev and the All-Russian Sci. Conf. with international participation), Part. II, Moscow – Belgorod: Izdatel'skiy dom “Belgorod”, 2016, pp. 422–423.

9. Kuznetsov M.S., Gendugov V.M., Dubin V.N., *Dopustimye poteri pochvy pri erozii i skorost' gumusooobrazovaniya* (Permissible soil loss during erosion and the rate of humus formation), *Dokuchaev Soil Bulletin*, 2002, Vol. 56, pp. 50–58.

10. Larionov G.A., *Eroziya i deflyatsiya pochv: osnovnye zakonomernosti i kolichestvennye otsenki* (Soil erosion and deflation: basic patterns and quantitative estimates.), Moscow: Izd-vo Mosk. un-ta, 1993, 200 p.

11. Litvin L.F., *Geografiya erozii pochv sel'skokhozyaystvennykh zemel' Rossii* (Geography of soil erosion on agricultural land in Russia), Moscow: IKTs “Akademkniga”, 2002, 255 p.

12. *Metodicheskoe posobie i normativnye materialy dlya razrabotki adaptivno-landscapeykh sistem zemledeliya* (Methodological manual and standards for developing adaptive landscape farming systems), Kursk: ChuDo, 2001, 260 p.

13. Vanin D.E., Surmach G.P. (Eds), *Metodicheskie rekomendatsii po proektirovaniyu kompleksa protivoerozionnykh meropriyatiy na raschetnoy osnove* (Guidelines for the design of a set of erosion control measures on a calculated basis), Kursk, 1985, 167 p.

14. Kartsev G.A., Luka A.N., Nosov S.I. (Eds), *Metodicheskie ukazaniya po proektirovaniyu protivoerozionnoy organizatsii territorii pri vnutrikhozyaystvennom zemleustroystvye v zonakh proyavleniya erozii* (Methodical guidelines for the design of erosion control organization of the territory in intra-farm land management in zones of erosion manifestation),

Moscow, 1989, 79 p.

15. Mirtskhulava Ts.E., *Vodnaya eroziya pochv (mekhanizm, prognoz)* (Water erosion of soils (mechanism, prognosing)), Tbilisi: "Metsnireba", 2000, pp. 3–421.

16. *Nauchnye osnovy predotvratshcheniya degradatsii pochv (zemel')* sel'skokhozyaystvennykh ugodiy Rossii i formirovaniya sistem vosproizvodstva ikh plodorodiya v adaptivno-landscape nom zemledelii: T. 1. Teoreticheskie i metodicheskie osnovy predotvratshcheniya degradatsii pochv (zemel') sel'skokhozyaystvennykh ugodiy (Scientific basis for the prevention of the soil (land) degradation in agricultural lands of Russia and the formation of the reproduction systems of their fertility in adaptive and landscape farming: Vol. 1. Theoretical and methodological basis for the prevention of the soil (land) degradation in agricultural lands), Moscow: V.V. Dokuchaev Soil Science Institute RAS, 2013, 756 p.

17. *Obshchesoyuznaya instruktsiya po pochvennym obsledovaniyam i sostavleniyu krupnomasshtabnykh pochvennykh kart zemlepol'zovaniy* (All-Union instruction on soil surveys and development of large-scale land use soil maps), Moscow: Kolos, 1973, 48 p.

18. Nosin V.A. (Ed.), *Soil map of the Kursk State Agricultural Experimental Station M 1 : 10 000*, Moscow: V.V. Dokuchaev Soil Science Institute, 1965.

19. Rozhkov V.A., Otsenka erozionnoy opasnosti pochv (Erosion hazard assessment of soils), *Dokuchaev Soil Bulletin*, 2007, Vol. 59, pp. 77–91, DOI: [10.19047/0136-1694-2007-59-77-91](https://doi.org/10.19047/0136-1694-2007-59-77-91).

20. Svetlichnyy A.A., Chernyy S.G., Shvebs G.I., *Eroziovedenie: teoreticheskie i prikladnye aspekty* (Erosion studies: theoretical and applied aspects), Sumy: ITD "Universitetskaya kniga", 2004, 410 p.

21. Smirnova L.G., Narozhnyaya A.G., Shamardanova E.Yu., Sravnenie dvukh metodov rascheta smyva pochvy na vodosborakh s primeneniem GIS-tehnologiy (Comparison of two methods for calculating soil losses on watersheds using GIS technologies), *Dostizheniya nauki i tekhniki APK*, 2012, No. 9, pp. 10–12.

22. Sorokina N.P., Statisticheskiy metod otsenki smylosti na primere moshchnykh tipichnykh chernozemov Kurskoy optytnoy stantsii (A statistical method for assessing erosion degradation by the example of deep typical chernozems of the Kursk experimental station), *Pochvovedenie*, 1966, No. 2, pp. 91–96.

23. Sorokina N.P., Elementarnye pochvennye struktury na polyakh Kurskoy optytnoy stantsii (Elementary soil structures in the fields of the Kursk experimental station.), In: *Krupnomasshtabnaya kartografiya pochv i ee znachenie v sel'skom khozyaystve chernozemnoy zony. Nauch. tr. Pochv. in-ta im. V.V. Dokuchaeva* (Large-scale cartography of soils and its significance in

- the agriculture of the chernozem zone. Scientific Works of V.V. Dokuchaev Soil Science Institute), Moscow, 1976, pp. 155–173.
24. Sorokina N.P., Dinamika PP raspakhannogo sklona Kurskoy opytnoy stantsii za 20-letniy period (The dynamics of the plowed slope of the Kursk experimental station over a 20-year period), In: *Regional'nye modeli plodoroziya pochv kak osnova sovershenstvovaniya zonal'nykh sistem zemledeliya* (Regional soil fertility models as the basis for improving zonal farming systems), Moscow, 1988, pp. 163–171.
25. Sorokina N.P., Printsipy tipizatsii pochvennykh kombinatsiy pri izuchenii agrogennykh izmeneniy pochvennogo pokrova (The principles of typification of soil combinations in the study of agrogenic changes in soil cover), *Pochvovedenie*, 2005, No. 12, pp. 1477–1488.
26. Surmach G.P., *Rel'efoobrazovanie, formirovanie lesostepi, sovremennoya eroziya i protivoerozionnye meropriyatiya* (Relief formation, forest-steppe formation, modern erosion and erosion control measures), Volgograd, 1992, 172 p.
27. Sukhanovskiy Yu.P., Model' dozhdevoy erozii pochv (Model of soil rain erosion), *Pochvovedenie*, 2010, No. 9, pp. 1114–1125.
28. Sukhanovskiy Yu.P., Veroyatnostnyy podkhod k raschetu erozionnykh poter' pochvy (A probabilistic approach to the calculation of soil erosion losses), *Pochvovedenie*, 2013, No. 4, pp. 474–481.
29. Tishkina E.V., Ivanova N.N., Pochvennyy pokrov raspakhannykh i tselinnykh pribalochnykh sklonov (Kurskaya oblast') (Soil cover of the plowed and virgin snowboard slopes (Kursk region)), *Vestn. Mosk. un-ta, Ser. 5, Geografiya*, 2010, No. 6, pp. 73–79.
30. Fishman M.I., Zapasy gumusa v mikrokombinatsiyakh pochvennogo pokrova lesostepi Srednerusskoy vozyshennosti (Humus reserves in microcombinations of the soil cover of the forest-steppe of the Central Russian Upland), *Pochvovedenie*, 1971, No. 11, pp. 20–30.
31. Fishman M.I., Chernozemnye kompleksy i ikh svyaz' s rel'efom na Srednerusskoy vozyshennosti (Black soil complexes and their relationship with the relief on the Central Russian Upland), *Pochvovedenie*, 1977, No. 5, pp. 17–30.
32. Fridland V.M., Glazovskaya M.A., Osnovnye formy struktur pochvennogo pokrova Zemli (The main forms of soil cover of the Earth), *Priroda*, 1979, No. 11, pp. 61–69.
33. Tselishcheva L.K., Dayneko E.K., Ocherk pochv Streletskogo uchastka Tsentral'no-chernozemnogo zapovednika (Soil sketch of the Streletsky section of the Central Black Earth Reserve), In: *Trudy Tsentral'no-chernozemnogo gosudarstvennogo zapovednika imeni V.V. Alekhina* (Works of the Central Black Earth State Reserve named after V.V. Alekhine.), 1966, Iss. 10.

34. Beff L., Gunther T., Vandoorne B., Couvreur V., Javaux M., Three-dimensional monitoring of soil water content in a maize field using Electrical Resistivity Tomography, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 2013, Vol. 17, Iss. 2, pp. 595–609. DOI: [10.5194/hess-17-595-2013](https://doi.org/10.5194/hess-17-595-2013).
35. De Vente J., Poesen J., Verstraeten G., Govers G., Vanmaercke M., Van Rompaey A., Arabkhedri M., Boix-Fayos C., Predicting soil erosion and sediment yield at regional scales: Where do we stand? *Earth-Science Reviews*, 2013, Vol. 127, pp. 16–29.
36. Dhami B.S., Pandey A., Comparative review of recently developed hydrologic models, *J. Indian Water Resour. Soc.*, 2013, Vol. 33, No. 3, pp. 34–41.
37. Eltner A., Baumgart P., Maas H.-G., Faust D., Multi-temporal UAV data for automatic measurement of rill and interrill erosion on loess soil, *Earth Surface Processes and Landforms*, 2014, Vol. 40, Iss. 6, pp. 741–755, DOI: [10.1002/esp.3673](https://doi.org/10.1002/esp.3673).
38. Florinsky I.V., *Digital terrain analysis in soil science and geology*, Amsterdam: Elsevier, Academic Press, 2016, 506 p.
39. García-Ruiz J.M., Beguería S., Nadal-Romero E., González-Hidalgo J.C., Lana-Renault N., Sanjuán Y., A meta-analysis of soil erosion rates across the world, *Geomorphology*, 2015, Vol. 239, pp. 160–173.
40. Golden H.E., Lane C.R., Amatya D.M., Bandilla K.W., Hadas R.K., Knightes C.D., Ssegane H., Hydrologic connectivity between geographically isolated wetlands and surface water systems: A review of select modeling methods, *Environmental Modelling & Software*, 2014, Vol. 53, pp. 190–206.
41. Karydas C.G., Panagos P., Gitas I.Z., A classification of water erosion models according to their geospatial characteristics, *Digital Earth*, 2014, Vol. 7, Iss. 3, pp. 229–250, DOI: [10.1080/17538947.2012.671380](https://doi.org/10.1080/17538947.2012.671380).
42. Kozlov D.N., Levchenko E.A., Lozbenev N.I., Soil combinations as an object of DSM: a case study in chernozems area of the Russian Plain. In: Arrouays D., Savin I., Leenaars J., McBratney A. (Eds.), *GlobalSoilMap – Digital Soil Mapping from Country to Globe*, London: CRC Press, 2018, pp. 81–88.
43. Minasny B., McBratney A., Digital soil mapping: A brief history and some lessons, *Geoderma*, 2016, Vol. 264, Part B, pp. 301–311.
44. Panagos P., Borrelli P., Poesen J. et al., The new assessment of soil loss by water erosion in Europe, *Environmental Science & Policy*, 2015, Vol. 54, pp. 438–447, DOI: [10.1016/j.envsci.2015.08.012](https://doi.org/10.1016/j.envsci.2015.08.012).
45. Panagos P., Borrelli P., Meusburger K. et al., Global rainfall erosivity assessment based on high-temporal resolution rainfall records, *Sci Rep.*, 2017, 7 (1):4175, DOI: [10.1038/s41598-017-04282-8](https://doi.org/10.1038/s41598-017-04282-8).
46. Pandey A., Himanshu S.K., Mishra S.K., Singh V.P., Physically based soil

- erosion and sediment yield models revisited, *Catena*, 2016, Vol. 147, pp. 595–620.
47. Renard K., Foster G., Weesies G., McCool D., Yoder D., Predicting soil erosion by water: a guide to conservation planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE), *USDA Agriculture Handbook*, 1997, 384 p. URL: https://www.ars.usda.gov/ARSUserFiles/64080530/rusle/ah_703.pdf.
48. Revised Universal Soil Loss Equation Version 2 (RUSLE2). User's reference guide, *USDA-Agricultural Research Service*, 2008, 430 p., URL: http://fargo.nserl.purdue.edu/rusle2_dataweb/userguide/RUSLE2_User_Ref_Guide_2008.pdf.
49. Van Oost K., Govers G., Desmet P., Evaluating the effects of changes in landscape structure on soil erosion by water and tillage, *Landscape Ecology*, 2000, Vol. 15, Iss. 6, pp. 577–589, DOI: [10.1023/A:1008198215674](https://doi.org/10.1023/A:1008198215674).
50. Van Rompay A., Verstraeten G., Van Oost K., Govers G., Poesen J., Modelling mean annual sediment yield using a distributed approach, *Earth Surface Processes and Landforms*, 2001, Vol. 26, Iss. 11, pp. 1221–1236.
51. Verstraeten G., Van Oost K., Van Rompaey A., Poesen J., Govers G., Evaluating an integrated approach to catchment management to reduce soil loss and sediment pollution through modelling, *Soil Use and Management*, 2002, Vol. 18, pp. 386–394.

УДК 631.4

DOI: 10.19047/0136-1694-2019-100-36-52

Cite this article as:

Papaiordanidis S., Gitas I.Z., Katagis T., Soil erosion prediction using the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE) in Google Earth Engine (GEE) cloud-based platform, Dokuchaev Soil Bulletin, 2019, V. 100, pp. 36-52, DOI: 10.19047/0136-1694-2019-100-36-52

Soil erosion prediction using the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE) in Google Earth Engine (GEE) cloud-based platform

© 2019 г. S. Papaiordanidis ^{*}, I. Z. Gitas ^{**}, T. Katagis ^{***}

*Laboratory of Forest Management and Remote Sensing,
Aristotle University of Thessaloniki,*

B Bld. 59 Mouschounti Str, Foinikas, 55134 Thessaloniki, Greece,

^{*}<https://orcid.org/0000-0002-3925-2550>, e-mail: spapaiord@for.auth.gr,

^{**}<https://orcid.org/0000-0003-0056-5629>, e-mail: igitas@for.auth.gr,

^{***}<https://orcid.org/0000-0002-1322-7699>, e-mail: thkatag@for.auth.gr,

Received 17.10.2019, Revised 18.10.2019, Accepted 18.12.2019

Abstract: High-quality soils are an important resource affecting the quality of life of human societies, as well as terrestrial ecosystems in general. Thus, soil erosion and soil loss are a serious issue that should be managed, in order to conserve both artificial and natural ecosystems. Predicting soil erosion has been a challenge for many years. Traditional field measurements are accurate, but they cannot be applied to large areas easily because of their high cost in time and resources. The last decade, satellite remote sensing and predictive models have been widely used by scientists to predict soil erosion in large areas with cost-efficient methods and techniques. One of those techniques is the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE). RUSLE uses satellite imagery, as well as precipitation and soil data from other sources to predict the soil erosion per hectare in tons, in a given instant of time. Data acquisition for these data-demanding methods has always been a problem, especially for scientists working with large and diverse datasets. Newly emerged online technologies like Google Earth Engine (GEE) have given access to petabytes of data on demand, alongside high processing power to process them. In this paper we investigated seasonal spatiotemporal changes of soil erosion with the use of RUSLE implemented within GEE, for Pindos mountain range in Greece. In addition, we estimated the correlation between the seasonal

components of RUSLE (precipitation and vegetation) and mean RUSLE values.

Keywords: soil erosion prediction, RUSLE, Google Earth Engine, Pindos mountain range.

INTRODUCTION

Soil erosion is one of the many natural processes that take place in ecosystems; however, accelerated soil erosion has a negative impact on agriculture and silviculture, hydrological systems, land degradation, and loss of non-renewable soil resources ([Lal, 1998](#); [Morgan, 2009](#)). In this scope, the estimation of soil erosion, as well as the temporal and spatial distribution of the process, is of great importance in order to prevent soil degradation and sustain high-quality soils. Estimating soil erosion, however, is a difficult task due the many impacting factors, such as climate, terrain, soil, vegetation, and land cover ([Lu et al., 2004](#)).

Traditional field measurements of soil erosion, despite being accurate and reliable, are very expensive and time consuming ([Castillo et al., 2012](#)), thus many scientists turned to predictive models that use satellite data to calculate soil erosion ([Wischmeier and Smith, 1978](#); [Lane et al., 2003](#); [Pandey et al., 2007](#); [Rahman et al., 2009](#)). One of these methods is the Universal Soil Loss Equation (USLE), and its descendant, the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE) ([Renard et al., 1991](#)). This equation has been widely used to predict soil erosion in many different ecosystems ([Millward and Mersey, 1999](#); [Angima et al., 2003](#); [Fernandez et al., 2003](#)). RUSLE uses multispectral satellite images, as well as satellite-acquire elevation models of the terrain, along with precipitation and soil data ([Renard et al., 1997](#)).

Gathering and preprocessing these large amounts of data can often become difficult, and quite time consuming. Emerging and modern technologies offer now new possibilities regarding data processing. More specifically, cloud-based services are widely used by scientists to acquire, analyze and process satellite data on the fly. Such popular platforms are AppEEARS (Application for Extracting and Exploring Analysis Ready Samples), GFW (Global Forest Watch) and GEE (Google Earth Engine). GEE can be accessed either from its online integrated development environment (IDE), or using the Application Program

Interface (API) that is being provided. GEE grants access to high performance processing power using cloud-based technologies, as well as; to very large amounts of data which are stored in cloud-based databases. The data in GEE's databases come from many different sources, including satellite images, geospatial datasets, meteorological data, land cover/land use maps, topographic data, and even social and economic data ([Gorelick et al. 2017](#)).

The main goal of this study was to predict soil erosion in the mountain range of Pindos during a full seasonal cycle. The specific objectives are:

- To estimate the monthly soil erosion by employing the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE) with the Google Earth Engine (GEE) cloud-based platform.
- To assess the correlation between precipitation and soil erosion predictions.
- To assess the correlation between vegetation (both type and density) and soil erosion predictions.

MATERIALS AND METHODS

The study area is located at the centermost part of Greece, along the mountain range of Pindus, extending from $38^{\circ}49'51.16''$ to $39^{\circ}41'23.04''$ North and from $21^{\circ}3'26.74''$ to $22^{\circ}14'34.50''$ East (Fig. 1). The altitude ranges from sea level to 2300 meters, with slopes up to 45 degrees, and the surface area is $12,431.25 \text{ km}^2$. Concerning the climate of the study area, temperature varies with elevation, with mean monthly temperatures ranging from 0.9°C to 21.4°C , and annual rainfall from 1,000 to 1,800 mm. The vegetation consists of black pine (*Pinus nigra*) and common beech (*Fagus sylvatica*) in the middle altitudes (1,000 m – 1,600 m), with Balkan pines (*Pinus heldreichii* Christ.) covering the higher altitudes ($> 1,600 \text{ m}$) ([Touchan et al. 2012](#)).

Data. The satellite data that we used in this study were four images that were derived from the Sentinel-2 MultiSpectral Instrument (MSI), and were acquired in January 29, April 9, July 3, and October 26, all during 2018. Sentinel-2 is a high-spatial resolution (10 m), multi-spectral constellation, used for monitoring of vegetation, soil and water cover.

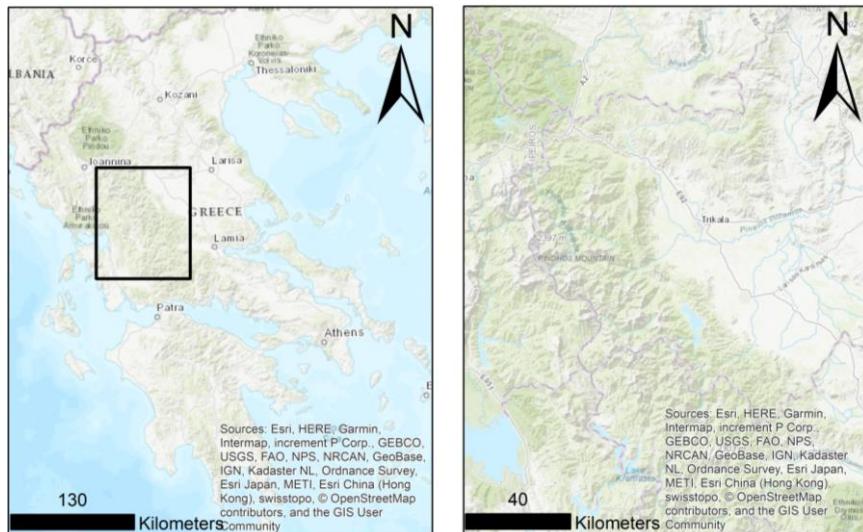


Fig. 1. Study area; mountain range of Pindos, Greece.

The data were level 1 products, which means that they were already geometrically and radiometrically corrected ([Drusch et al., 2012](#)). The four images that were used represent the seasons in order to assess how soil erosion changes throughout the year. A map of broadleaf and coniferous trees was used as well, provided by the Copernicus Land service. The precipitation data that were used were in the form of R factor maps, acquired from European Soil Data Centre (ESDAC). The R factor, also known as Rainfall Erosivity factor, is the average (in the present case) monthly sum of the kinetic energy products of each storm ([Renard et al., 1997a](#)). The R factor maps were created using the best available datasets in Europe, namely the Rainfall Erosivity Database on the European Scale (REDES). The R-factor values were normalized to temporal resolutions of 30 minutes using linear regression ([Panagos et al., 2015a; Ballabio et al., 2017](#)). Similarly, LS factor maps were obtained from ESDAC. The LS factor, or the combined slope length and slope angle factor, has the greatest influence on soil erosion at the European scale and describes the effect of topography on soil erosion ([Panagos et al., 2015b](#)). The LS-calculation was performed using the original equation proposed by [Desmet and Govers \(1996\)](#) and

implemented using the System for Automated Geoscientific Analyses (SAGA), which incorporates a multiple flow algorithm and contributes to a precise estimation of flow accumulation ([Desmet and Govers, 1996](#)). The DEM used to calculate the LS factor map is a new high-resolution (25 m) DEM of the European Union (EU-DEM) which is a hybrid created from Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) and Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER) Global Digital Elevation Model (GDEM). The EU-DEM is a product of the Copernicus program, and it is statistically validated with an overall vertical accuracy of 2.9 m root mean square error. Pindos mountain range has one of the greatest LS factor values in Europe ([Panagos et al., 2012](#)). Finally, a K factor map was acquired from ESDAC as well. The K-factor expresses the susceptibility of a soil to erosion, and it is depended upon some specific parameters such as organic matter content, soil texture, soil structure and permeability ([Renard et al., 1997b](#)). The K factor map was created by field measurements recorded during the Land Use/Cover Area frame Survey (LUCAS) soil survey in 2009. The equation used to create the K factor map includes five soil parameters (texture, organic matter, coarse fragments, structure, and permeability) ([Wischmeier and Smith, 1978](#)) and can be seen bellow:

$$K = [(2.1 \times 10^4 M^{1.14} (I2 - OM) + 3.25 (s - 2) + 2.5 (p - 3)) / 100] \times 0.1317 (1).$$

Where:

- M – Textural factor with $M = (\text{msilt} + \text{mvfs}) \cdot (100 - \text{mc})$;
- mc (%) – Clay fraction content ($< 0.002 \text{ mm}$);
- msilt (%) – Silt fraction content ($0.002\text{--}0.05 \text{ mm}$);
- mvfs (%) – Very fine sand fraction content ($0.05\text{--}0.1 \text{ mm}$);
- OM (%) – Organic matter content;
- s – Soil structure class ($s = 1$: very fine granular, $s = 2$: fine granular, $s = 3$, medium or coarse granular, $s = 4$: blocky, platy or massive);
- p – Permeability class ($p = 1$: very rapid, ..., $p = 6$: very slow).

Soil erosion modeling. In this paper the RUSLE equation was used to model soil erosion. RUSLE predicts soil erosion by using the following formula:

$$A = R \times K \times LS \times C \times P \quad (2).$$

Where:

- A – Computed spatial and temporal average soil loss per unit area, expressed in the time unit of R;
R – Rainfall erosivity factor;
K – Soil erodibility factor;
LS – Combined effect of slope length (L) and slope steepness factor (S);
C – Cover-management factor;
P – Practice factor.

The maps representing the R, K, and LS factors were uploaded as assets in Google Earth Engine. The R factor maps included four images, one for each of the months January, April, July, and October. The Sentinel-2 collection was filtered using GEE's Integrated Development Environment (IDE) in JavaScript programming language, in order to acquire the least cloudy image for each month. The NDVI index was then calculated, and the C factor was computed using the following formula ([Van der Knijff et al., 1999](#)) (3):

$$C = \exp[-\alpha(\frac{NDVI}{\beta - NDVI})] \quad (3).$$

Where α equals 2 and β equals 1, which are unitless parameters that determine the shape of the curve relating to NDVI and the C-factor ([Mallinis et al., 2016](#)).

Since the R factor data had the lowest spatial resolution, all the other maps were scaled down to fit the 500 m resolution, along with the DEM that was later used to calculate slopes in the study area. The P factor represents the effects of practices, such as direction of tilling in fields, on the reduction of soil erosion. Since no such data are available and they cannot be derived from satellite imagery, the P factor was set to 1. The final erosion maps were downloaded from Google Earth Engine along with the slope map. The potential correlations between RUSLE variable and variables such as vegetation and precipitation were investigated using the Pearson's correlation coefficient. Pearson's

correlation coefficient (r) is a measure of the linear association of two variables ([Doyle 2011](#)).

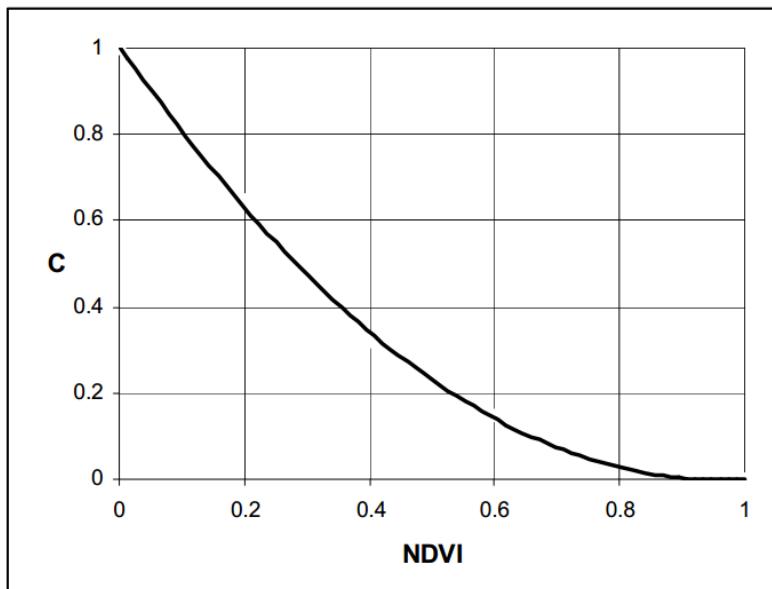


Fig. 2: The curve that represents the relation between C factor and NDVI.

RESULTS AND DISCUSSION

It should be mentioned that the use of the GEE platform reduced by a lot the time required to access, download, and preprocess images. In case of data unavailability in GEE's databases, uploading data in the cloud and combining them with already available data can be a very user-friendly and time-efficient process. Since GEE's IDE allows the user to write their own programming scripts, automation of processes can be performed, thus reducing computation time and effort.

Initially, the erosion maps that were produced had a pixel size of 500 meters (0.25 km^2), and in each of those pixels a value was assigned signifying the predicted erosion in that area in tons per hectare per month. The predicted erosion values were then classified into five classes and were represented in the table (Table 1) and corresponding the-

matic maps (Fig. 3) for each of the four months. As shown in the results below, RUSLE appears to vary through the year. This can be expected since two of the factors (R and C factors) have a highly seasonal character (Fig. 2). It appears the months with the highest erosion predictions are October and January with corresponding mean erosions 3.25 and 2.88 tons per hectare per month and total erosion of the study area 162,027 and 143,010 tons per hectare per month (Table 1, Fig. 3–5).

Table 1. Mean RUSLE and the sum for each month

RUSLE (ton/ha/month)				
	October	January	April	July
< 5	49,815	36,221	32,767	11,804
5–15	60,876	45,213	19,942	3,992
15–25	26,809	25,298	2,999	514
25–35	10,852	16,449	820	82
> 35	13,675	19,829	974	82
Mean	3.25	2.88	1.16	0.33
Sum	162,027	143,010	57,502	16,474

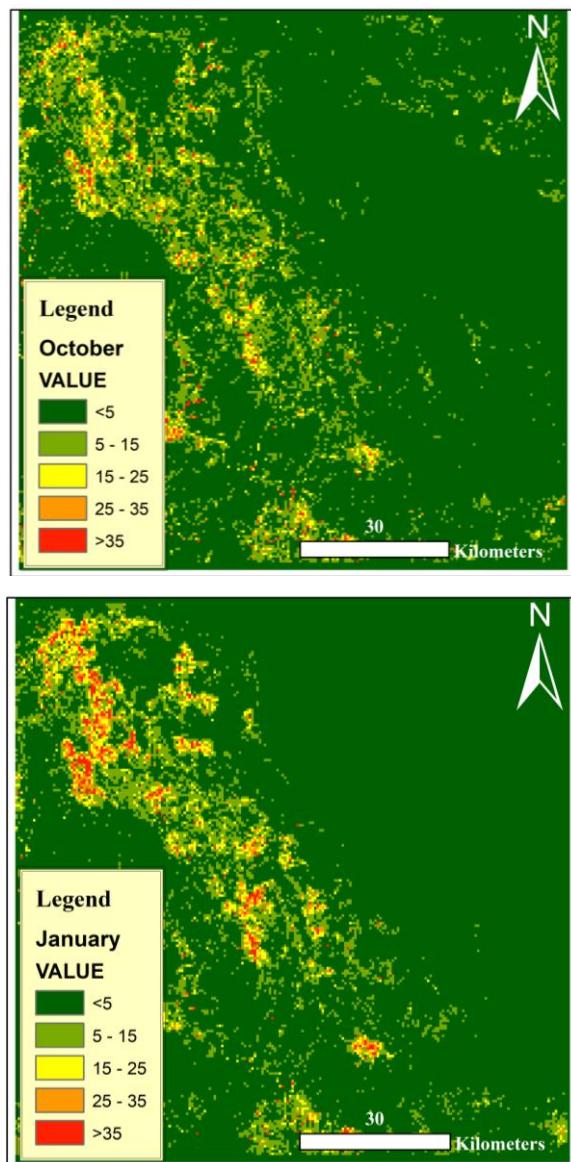


Fig. 3. Values of RUSLE for the months October and January classified in 5 classes.

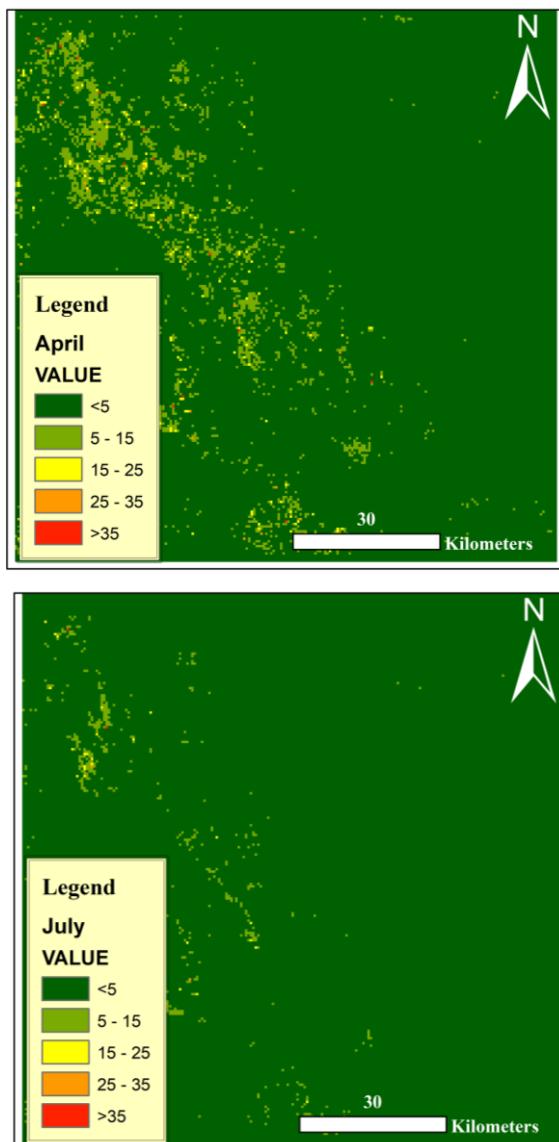


Fig. 4. Values of RUSLE for the months April and July classified in 5 classes.

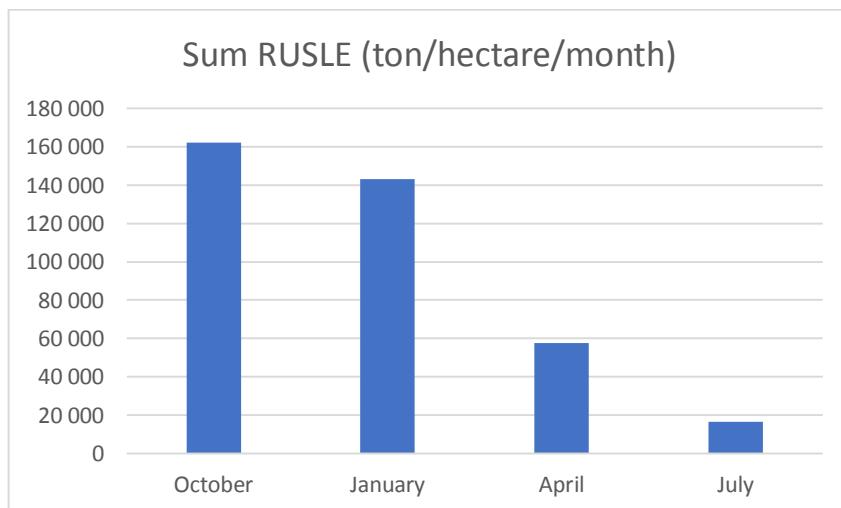


Fig. 5. Sum of RUSLE at different seasons of the year.

The correlation between the seasonal factors mentioned above (R and C factors) and the erosion predictions was investigated, and the following results were produced (Tables 2 and 3).

Table 2. RUSLE values at different precipitation classes

RUSLE (Mean) (ton/ha/ month)				
Precipitation (mm/month)	Autumn	Winter	Spring	Summer
0 – 30	1.2699	0.1011	1.4913	0.3051
30 – 80	1.7397	0.6785	1.2634	0.6801
80 – 130	5.5519	5.7765	2.9181	1.8491
130 – 180	4.9851	4.3097	6.2453	-
> 200	10.0173	4.4805	-	-
Pearson's correlation coefficient	0.1981	0.2943	0.1993	0.2323

It appears that the higher the precipitation, the higher the predicted erosion for that time, almost in a linear manner. Although, the Pearson's correlation coefficient was calculated and found to be lower than expected ($r: 0.1981\text{--}0.2943$), which indicates a weak correlation between precipitation and the value of RUSLE.

Table 3. RUSLE values at different NDVI classes

RUSLE (Mean) (ton/ha/month)				
NDVI	Autumn	Winter	Spring	Summer
<0	10.1027	23.1567	6.6812	1.0206
0 - 0.3	5.1609	12.4148	3.9266	1.7364
0.3 - 0.6	4.1757	2.6822	1.5712	0.8577
>0.6	1.1864	0.4635	0.4635	0.2032
Pearson's correlation coefficient	-0.2229	-0.4816	-0.4565	-0.32984

On the other hand, NDVI and RUSLE values seem to have a negative correlation, meaning the higher the NDVI values, the lower the RUSLE values. This finding agrees with other studies that have presented a negative correlation between vegetation and soil erosion exists ([Mohammad and Adam 2010](#)). The Pearson's correlation coefficient ranges from -0.22 (weak correlation) to -0.48 (medium correlation). There is a case to be made concerning the species of vegetation of the study area. As mentioned earlier, one of the dominant species of the lower altitude areas is the common beech, which is a deciduous tree. The NDVI index is calculated based on the spectral values of foliage and their property of reflecting near-infrared light while absorbing red light. Since part of the trees are deciduous, lower NDVI values are expected at the winter and autumn seasons. From the NDVI index the C factor map was produced, and it was supposed to represent the ability of an area to resist erosion based on “how much” healthy vegetation was present. The visual difference in NDVI values can be seen in figure 6 (Fig. 6).

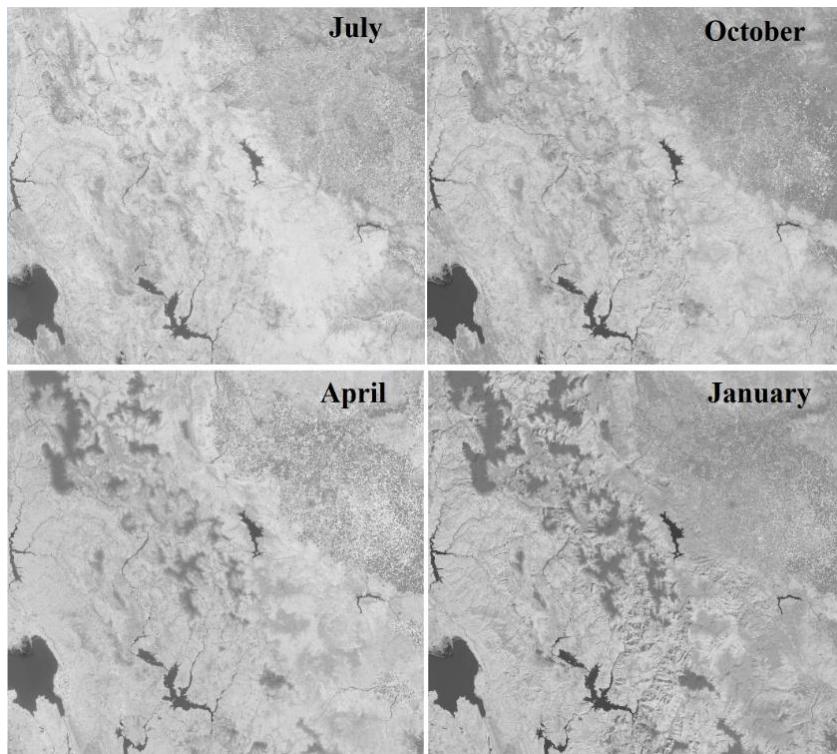


Fig. 6. NDVI index in four seasons.

As other studies have shown, the ability of trees to reduce erosion risk is not due to their foliage only, but also due to their root system and the leaf litter on the ground ([Wilcox et al. 2003](#)). That suggests that the decrease in NDVI values and therefore the decrease in C factor values are not proportionate to the decrease of erosion resistance in reality. To test the impact of deciduous trees on the predictions of soil erosion by RUSLE we investigated the mean soil erosion prediction on areas with broadleaf (*Fagus sylvatica*) and coniferous trees across the year (Table 4, Fig. 5).

No significant differences in mean soil erosion predictions were observed according to what type of vegetation was present (broadleaf or coniferous). This in turn suggests that deciduous trees don't cause RUSLE to overestimate.

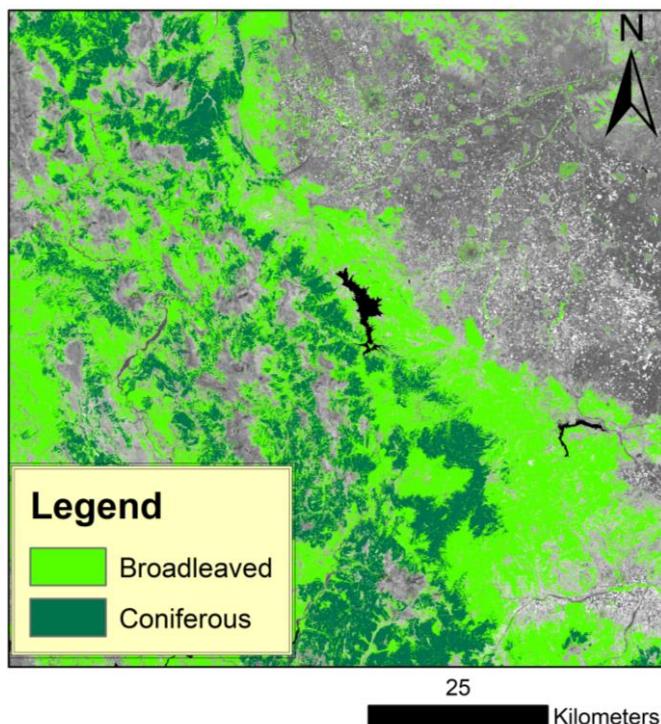


Fig. 7. Broadleaved and Coniferous forests (provided from Copernicus Land Monitoring Service) on a Sentinel-2 NDVI image.

Table 4. Mean RUSLE values at broadleaf and coniferous forest areas across the year

Mean RUSLE/Species	Broadleaved	Coniferous
October	3.21	3.48
January	2.78	2.36
April	1.57	1.27
July	0.36	0.39

CONCLUSIONS

The main goal of this study was to predict soil erosion in the mountain range of Pindos during a full seasonal cycle. Resources from GEE and ESDAC were used to produce the predicted soil erosion maps by calculating RUSLE for January, April, July, and October 2018. After comparing the different results both by their sum and mean erosion per hectare per month, the seasonal factors of RUSLE were investigated. From the analysis the following can be concluded:

- the employment of RUSLE in GEE results in the production of soil erosion prediction maps in a time-efficient manner within in a user-friendly environment,
- the RUSLE model predicted higher erosion risk in October and January and lower in April and July,
- erosion values have a low positive correlation with precipitation and medium negative correlation with NDVI values,
- the type of vegetation (deciduous or evergreen) did not cause mean RUSLE values to vary in different seasons.

It would be interesting to investigate in future studies, the predicted erosion using RUSLE in full year cycles for many consecutive years, using GEE cloud-based platform and Landsat satellite imagery.

REFERENCES

1. Angima S., Stott D., O’neill M., Ong C., Weesies G., Soil erosion prediction using RUSLE for central Kenyan highland conditions, *Agriculture, ecosystems & environment*, 2003, Vol. 97, No. 1–3, pp. 295–308.
2. Ballabio C., Borrelli P., Spinoni J., Meusburger K., Michaelides S., Beguería S., Klik A., Petan S., Janeček M., Olsen. P., Mapping monthly rainfall erosivity in Europe, *Science of the Total Environment*, 2017, Vol. 579, pp. 1298–1315.
3. Castillo C., Pérez R., James M.R., Quinton J., Taguas E.V., Gómez J.A., Comparing the accuracy of several field methods for measuring gully erosion, *Soil Science Society of America Journal*, 2012, Vol. 76, No. 4, pp. 1319–1332.
4. Desmet P., Govers G., A GIS procedure for automatically calculating the USLE LS factor on topographically complex landscape units, *Journal of soil and Water Conservation*, 1996, Vol. 51, No. 5, pp. 427–433.
5. Doyle C., *A dictionary of marketing*, Oxford University Press.

6. Drusch M., Del Bello U., Carlier S., Colin O., Fernandez V., Gascon F., Hoersch B., Isola C., Laberinti P., Martimort P., Sentinel-2: ESA's optical high-resolution mission for GMES operational services, *Remote sensing of Environment*, 2012, Vol. 120, pp. 25–36.
7. Fernandez C., Wu J., McCool D., Stöckle C., Estimating water erosion and sediment yield with GIS, RUSLE, and SEDD, *Journal of soil and Water Conservation*, 2003, Vol. 58, No. 3, pp. 128–136.
8. Gorelick N., Hancher M., Dixon M., Ilyushchenko S., Thau D., Moore R., Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone, *Remote sensing of Environment*, 2017, Vol. 202, pp. 18–27.
9. Lal R., Soil erosion impact on agronomic productivity and environment quality, *Critical reviews in plant sciences*, 1998, Vol. 17, No. 4, pp. 319–464.
10. Lane S.N., Westaway R.M., Murray Hicks D., Estimation of erosion and deposition volumes in a large, gravel-bed, braided river using synoptic remote sensing, *Earth Surface Processes and Landforms: The Journal of the British Geomorphological Research Group*, 2003, Vol. 28, No. 3, pp. 249–271.
11. Lehner B., Verdin K., Jarvis A., New global hydrography derived from spaceborne elevation data, *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 2008, Vol. 89, No. 10, pp. 93–94.
12. Lu D., Li G., Valladares G.S., Batistella M., Mapping soil erosion risk in Rondonia, Brazilian Amazonia: using RUSLE, remote sensing and GIS, *Land degradation & development*, 2004, Vol. 15, No. 5, pp. 499–512.
13. Mallinis G., Gitas I.Z., Tasionas G., Maris F., Multitemporal monitoring of land degradation risk Due to soil loss in a fire-prone Mediterranean landscape using multi-decadal Landsat imagery, *Water resources management*, 2016, Vol. 30, No. 3, pp. 1255–1269.
14. Millward A.A., Mersey J.E., Adapting the RUSLE to model soil erosion potential in a mountainous tropical watershed, *Catena*, 1999, Vol. 38, No. 2, pp. 109–129.
15. Mohammad A.G., Adam M.A., The impact of vegetative cover type on runoff and soil erosion under different land uses, *Catena*, 2010, Vol. 81, No. 2, pp. 97–103.
16. Morgan R.P.C., *Soil erosion and conservation*, John Wiley & Sons.
17. Panagos P., Ballabio C., Borrelli P., Meusburger K., Klik A., Rousseva S., Tadić M.P., Michaelides S., Hrabalíková M., Olsen P., Rainfall erosivity in Europe, *Science of the Total Environment*, 2015a, Vol. 511, pp. 801–814.
18. Panagos P., Borrelli P., Meusburger K., A new European slope length and steepness factor (LS-Factor) for modeling soil erosion by water, *Geosciences*, 2015b, Vol. 5, No. 2, pp. 117–126.

19. Panagos P., Van Liedekerke M., Jones A., Montanarella L., European Soil Data Centre: Response to European policy support and public data requirements, *Land use policy*, 2012, Vol. 29, No. 2, pp. 329–338.
20. Pandey A., Chowdary V., Mal B., Identification of critical erosion prone areas in the small agricultural watershed using USLE, GIS and remote sensing, *Water resources management*, 2007, Vol. 21, No. 4, pp: 729–746.
21. Rahman M.R., Shi Z., Chongfa C., Soil erosion hazard evaluation – an integrated use of remote sensing, GIS and statistical approaches with biophysical parameters towards management strategies, *Ecological Modelling*, 2009, Vol. 220, No. 13–14, pp. 1724–1734.
22. Renard K.G., Foster G.R., Weesies G., McCool D., Yoder D., *Predicting soil erosion by water: a guide to conservation planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE)*, United States Department of Agriculture Washington, DC.
23. Renard K.G., Foster G.R., Weesies G.A., Porter J.P., RUSLE: Revised universal soil loss equation, *Journal of soil and Water Conservation*, 1991, Vol. 46, No. 1, pp. 30–33.
24. Touchan R., Baisan C., Mitsopoulos I.D., Dimitrakopoulos A.P., Fire history in European black pine (*Pinus nigra Arn.*) forests of the Valia Kalda, Pindus mountains, Greece, *Tree-Ring Research*, 2012, Vol. 68, No. 1, pp. 45–51.
25. Van der Knijff J., Jones R., Montanarella L., *Soil erosion risk assessment in Italy*, Citeseer, 1999.
26. Wilcox B.P., Breshears D.D., Allen C.D., Ecohydrology of a resource-conserving semiarid woodland: Effects of scale and disturbance, *Ecological Monographs*, 2003, Vol. 73, No. 2, pp. 223–239.
27. Wischmeier W.H., Smith D.D., Predicting rainfall erosion losses-a guide to conservation planning, *Predicting rainfall erosion losses-a guide to conservation planning*, 1978, Iss. 537, 58 p.

УДК 631.4

DOI: 10.19047/0136-1694-2019-100-53-82

Ссылки для цитирования:

Ахметова Г.В. Геохимические особенности почв волнистой озерно-ледниковой песчаной равнины среднетаежной подзоны Карелии // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2019. Вып. 100. С. 53-82. DOI: 10.19047/0136-1694-2019-100-53-82

Cite this article as:

Akhmetova G.V., Geochemical features of soils in an undulating glaciolacustrine sandy plain in the middle taiga subzone of Karelia, Dokuchaev Soil Bulletin, 2019, V. 100, pp. 53-82, DOI: 10.19047/0136-1694-2019-100-53-82

Геохимические особенности почв волнистой озерно-ледниковой песчаной равнины среднетаежной подзоны Карелии

© 2019 г. Г. В. Ахметова

Институт леса КарНЦ РАН, Россия,
185910, Петрозаводск, ул. Пушкинская, 11,
<https://orcid.org/0000-0003-0708-369X>, e-mail: akhmetova@krc.karelia.ru.

Поступила в редакцию 30.08.2019, после доработки 28.10.2019,
принята к публикации 18.12.2019

Резюме: Проведены исследования геохимически сопряженного ряда почв (подзол иллювиально-железистый – подзол иллювиально-железистый глеевый – торфяная глеевая почва), сформированных в условиях распространения волнистой озерно-ледниковой равнины среднетаежной подзоны Карелии. Изучение окислительно-восстановительных условий показало, что они меняются от окислительных в автоморфных почвах до восстановительных в почвах аккумулятивных позиций. Рассчитаны и проанализированы геохимические коэффициенты, характеризующие особенности аккумуляции и направления миграции в исследуемых почвах. Внутрипрофильное распределение кремнекислоты и большинства полуторных окислов в изучаемых почвах носит типичный для подзолов характер. В подзолистых горизонтах почв транзитных позиций, по сравнению с автоморфными, происходит более интенсивный вынос элементов, а в альфегумусовых горизонтах отмечается накопление алюминия, железа, титана и фосфора. Для всех почв характерен дефицит большинства микроэлементов, по сравнению с фоновыми значениями,

очень низкие коэффициенты концентрации получены для никеля, кобальта, марганца. Содержание меди, а в некоторых случаях и цинка, находится на уровне фоновых значений. Распределение изучаемых элементов по профилю подзолов происходит по аккумулятивно-элювиально-иллювиальному типу, но наблюдается различная степень интенсивности миграции элементов в связи с изменением положения в рельефе. В почвах автоморфных позиций распределение микроэлементов в нижней части профиля имеет монотонный характер, в то время как для почв транзитных ландшафтов характерна более интенсивная дифференциация микроэлементов. Тип латерально-миграционной дифференциации катены – транзитно-элювиальный, то есть наблюдается обеднение изучаемыми элементами почв подчиненных позиций относительно автономных. Это связано с природными условиями территории исследования: слабым уклоном поверхности, однородными песчаными почвообразующими породами, невысокой гумусностью почв.

Ключевые слова: лесные почвы, валовой состав, микроэлементы, радиальная миграция, латеральная миграция.

Geochemical features of soils in an undulating glaciolacustrine sandy plain in the middle taiga subzone of Karelia

G. V. Akhmetova

*Forest Research Institute of Karelian Research Centre of the RAS,
11 Pushkinskaya Str., Petrozavodsk 185910, Russian Federation,
<https://orcid.org/0000-0003-0708-369X>, e-mail: akhmetova@krc.karelia.ru.*

Received 30.08.2019, Revised 28.10.2019, Accepted 18.12.2019

Abstract: The geochemically conjugate series of soils (Albic Podzol – Albic Podzol Gleyc – Hystosol) formed on an undulating glaciolacustrine plain in the middle taiga of Karelia was investigated. Surveys for redox conditions showed them to vary from oxidizing in automorphic soils to reducing in soils occupying accumulation-favoring locations. The geochemical coefficients descriptive of the features of accumulation and directions of migration in the studied soils were calculated and analyzed. The distribution of silicic acid and a majority of sesquioxides inside the profile of the studied soils is typical of podzols. The podzolic horizons of the soils occupying interstitial positions have a faster outmigration of elements than in automorphic soils, while their Al-Fe-humic horizons accumulate aluminum, iron, titanium and phosphorus. All the soils are deficient in a majority of microelements as compared to their

background levels; very low concentrations were determined for nickel, cobalt and manganese. The content of copper and sometimes zinc is at the background level. The distribution of the studied elements across the soil profile follows the accumulation-eluviation-illuviation pattern, but the scope of variation in the migration of elements varies among topographic positions. In well-drained locations microelements are quite monotonously distributed through the lower part of the soil profile, while soils in transitional landscapes have a higher differentiation of microelements. The differentiation of the catena through lateral migration is of the transient eluviation type, i.e. soils in lower-lying positions are poorer in the studied elements than soils in automorphic positions. This pattern is due to the natural characteristics of the area: low surface slope, homogeneous sandy parent material, low humus content in soil.

Keywords: forest soils, bulk deposition, trace elements, radial migration, lateral migration.

ВВЕДЕНИЕ

Современные направления изучения содержания и поведения химических элементов в различных объектах природы являются следствием возрастающего антропогенного воздействия на все сферы планеты ([Водяницкий и др., 2012](#); [Добровольский, 1997](#); [Касимов, Власов, 2015](#)). Наибольшее внимание уделяется тяжелым металлам в связи с их важной ролью в технологических процессах ([Добровольский, 1997](#); [Рассеянные..., 2004](#); [Barsova et al., 2019](#)). Специфика химического состояния почв всегда вызывала особый интерес, что проявляется в многочисленных работах по геохимии почв ([Глазовская, 1999](#); [Ильин и др., 2003](#); [Кашулина, 2018](#); [Лянгузова, 2016](#); [Сысо, 2007](#); [Lado et al., 2008](#); [Evseev, Krassovskay, 2018](#)). Повышенное внимание к почвам связано с тем, что она является наиболее чувствительным индикатором изменений ландшафтно-геохимических условий, происходящих как вследствие природных изменений среды, так и из-за техногенной нагрузки ([Добровольский, 1997](#); [Davydova, 2014](#); [Rodríguez-Eugenio et al., 2018](#)).

В настоящее время актуальной темой во многих отечественных и зарубежных исследованиях становится определение фоновых количественных показателей содержания химических элементов для выявления уровня загрязнения почв ([Безносиков и др.,](#)

[2007](#), [2010](#); [Ильин и др., 2003](#); [Сысо, 2007](#); [Ander et al, 2013](#); [Matschullat et al., 2000](#)). Обосновано использование для определения уровня загрязнения региональных фоновых значений, которые должны характеризовать геохимические особенности строения изучаемых территорий ([Касимов, Власов, 2015](#); [Reimann, Caritat., 2005](#); [Reimann, Garrett, 2005](#)).

При геохимической характеристике территории также важно учитывать потоки перемещения веществ, которые связывают все компоненты экосистем ([Геннадиев, Касимов, 2004](#)). Миграция элементов в почвах происходит как в вертикальном (внутри профиля), так и в горизонтальном направлениях (боковой, поверхностный сток) ([Касимов и др., 1994](#); [Кузьмин, 2000](#); [Яшин и др., 2003](#)). Степень передвижения или миграции химических элементов в значительной степени обусловливается наличием геохимических барьеров, способствующих их осаждению, отложению и накоплению ([Алексеенко, 2003](#); [Кузьмин, 2000](#); [Перельман, Касимов, 1999](#)).

Ландшафтно-геохимические исследования с подробным исследованием геохимической структуры таежных экосистем, изучение процессов миграции химических элементов в их компонентах активно проводились и проводятся на территории таежных лесов в Сибири ([Власова, 2013](#); [Ильин и др., 2003](#); [Сысо, 2007](#)). Исследователями показана значимость комплексного изучения территории с полиэлементным геохимическим анализом компонентов ландшафта и оценкой миграции в нем вещества как главного пути оценки его динамики ([Сысо, 2007](#); [Семенов, 1991](#); [Мониторинг..., 2010](#)).

Территория республики Карелия обладает рядом специфических черт, связанных с выходом на поверхность Балтийского щита, сложенного древними докембрийскими породами: сильной изрезанностью рельефа; резкой сменой почвообразующих пород и распространением на большей площади пород легкого гранулометрического состава.

Карелия считается “чистым” регионом, на ее территории мало крупных промышленных предприятий, способных оказывать негативное влияние на компоненты экосистем. Тем не менее в последние годы наблюдается интенсификация вырубки леса, и все

меньше остается территорий с естественным почвенным покровом, что приводит к изменению круговорота химических элементов ([Kiikkilä et al., 2014](#); [Richardson et al., 2017](#)). Таким образом, в настоящее время появилась необходимость в проведении почвенных геохимических исследований на особо охраняемых территориях, ценность которых определяется ненарушенностью и представлением естественных, не трансформированных деятельностью человека природных условий.

Цель статьи – выявление особенностей геохимического состава сопряженного ряда почв ландшафта волнистой песчаной озерно-ледниковой равнины среднетаежной подзоны Карелии и определение основных закономерностей процессов миграции и аккумуляции макро- и микроэлементов в почвах сопряженных элементарных геохимических ландшафтов.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Исследования проводились в юго-восточной части Государственного заповедника “Кивач” (рис. 1), в районе распространения такого типа местности как волнистая песчаная озерно-ледниковая равнина. Кристаллическое основание и покрывающая его морена перекрыты гравийно-галечными песчаными озерными наносами, рельеф формируют высокие песчано-галечные гряды – озы, высота которых составляет 20 м ([Демидов и др., 2006](#)). Понижения на озерно-ледниковой равнине заняты верховыми и переходными болотами и ламбами. Данный тип местности широко распространен на территории Карелии, он отличается низким классом бонитета сосновых лесов (лишайниковых и зеленомошных), а также бедностью напочвенного растительного покрова.

Почвы формируются на разнозернистых слоистых песках, которые хорошо сортированы и представлены фракциями крупного и среднего песка, содержание илистых фракций очень мало, не превышает 2%.

Пробные площади заложены в ряду сопряженных элементарных геохимических ландшафтов ([Полынов, 1956](#); [Авессаломова, 1987](#)): от автоморфных (элювиальных) на водоразделах, через транзитные (трансэлювиальные и

трансэлювиально-аккумулятивные) на различных участках склонов к подчиненным (супер-аквальным или аккумулятивным) элементам рельефа (рис. 2).



Рис. 1. Расположение пробных площадей (красными точками указаны места заложения геохимических профилей).

Fig. 1. Location of sample plots (red points show location of geochemical profiles).

Классификационная принадлежность почв определялась согласно Классификации и диагностике почв России

([Классификация...](#), 2004). Отбор проб проводился по генетическим горизонтам из почвенных разрезов, заложенных в трехкратной повторности в пределах каждого элементарного геохимического ландшафта.

Определялись следующие показатели:

- валовой анализ минеральной части почвы и ее физико-химические свойства (рН в водной и солевой вытяжках, сумма обменных оснований и степень насыщенности основаниями, содержание подвижных форм фосфора и калия, органического углерода и валового азота) в соответствии с общепринятыми методами ([Аринушкина, 1970](#)). Определение содержания полуторных окислов в органогенных горизонтах проводилось после их озоления;
- окислительно-восстановительный потенциал почвы потенциометрическим методом;
- содержание микроэлементов методом атомно-адсорбционной спектрофотометрии при растворении в смеси азотной, плавиковой и серной кислот.

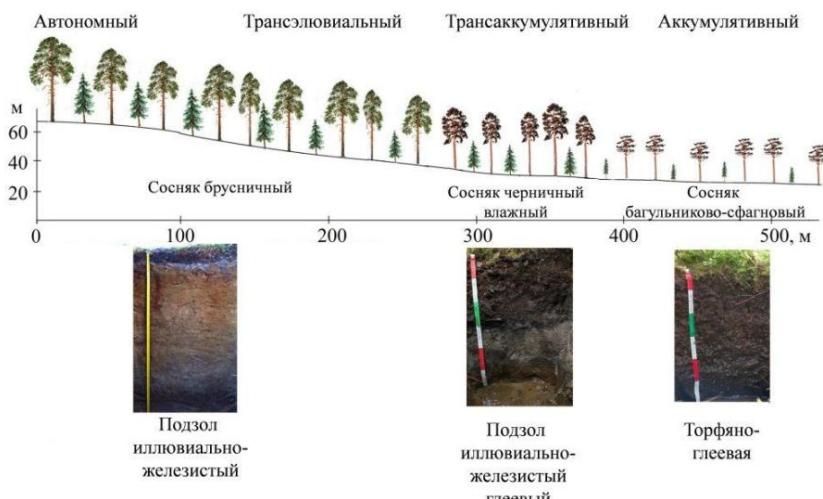


Рис. 2. Сопряженный ряд почв волнистой озерно-ледниковой песчаной равнины.

Fig. 2. Catena of undulating glaciolacustrine sandy plain.

Рассчитывались следующие геохимические коэффициенты ([Абессаломова, 1987](#); [Глазовская, 2002](#); [Перельман, Касимов, 1999](#)), которые позволяют определять направленность процессов накопления-выноса химических элементов:

- ***Kc*** – коэффициент концентрации – соотношение содержания химического элемента в исследуемой почве (C_i) к его фоновому значению (C_{fi}). В качестве фоновых показателей использовались данные по среднему содержанию химических элементов в почвах Карелии – в лесной подстилке и подподстилочных горизонтах ([Федорец и др., 2008](#)).
- ***Kr*** – коэффициент элювиально-аккумулятивный или радиальной дифференциации – $Kr = C_i / C_{ipp}$, где C_i – содержание химического элемента в том или ином генетическом горизонте почвы, а C_{ipp} – содержание в почвообразующей породе.
- ***Геохимический индекс или формула почв*** составлен на основе рассчитанных Kc . Формула почв элементарного ландшафта, представляет собой вид неправильной дроби: на месте целого числа указывается класс ландшафта, в числителе – мигрирующие элементы, в знаменателе – элементы, осаждающиеся на геохимических барьерах, после дроби указываются элементы, мигрирующие и осаждающиеся в равной степени.
- ***Kl*** – коэффициент латеральной миграции – отношение содержания химического элемента в изучаемом подчиненном ландшафте ($C_{pl.}$) к его содержанию в автономном ландшафте ($C_{al.}$): $Kl = C_{pl.} / C_{al.}$.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На автоморфных позициях в элювиальных и трансэлювиальных элементарных геохимических ландшафтах на мощных сортированных песчаных флювиогляциальных отложениях под сосняками брусличными формируются подзолы иллювиально-железистые песчаные. Данные почвы широко распространены на территории Карелии и могут считаться фоновыми ([Разнообразие..., 2006](#)), они имеют типичное для подзолов строение генетического профиля. На поверхности образуется мощная лесная подстилка (горизонт O), на границе перехода лесной подстилки в минеральную часть часто

встречаются остатки углей небольшого размера. Подзолистый горизонт морфологически выражен четко, но имеет небольшую мощность – 2–3 см.

Подзолы имеют легкий гранулометрический состав, преобладают песчаные фракции, содержание илистых фракций очень низкое. Они хорошо дренированы и имеют высокую степень аэрации, в них преобладают окислительные процессы.

Показатели кислотно-щелочных и окислительно-восстановительных условий во многом определяют тенденции миграции химических элементов ([Перельман, Касимов, 1999](#); [Husson O., 2012](#)). Значения окислительно-восстановительного потенциала (Eh) в хорошо аэрированных верхних органогенных горизонтах составляют 500–600 мВ, в минеральных горизонтах эта цифра снижается до 450–470 мВ, таким образом, полученные результаты свидетельствуют о преобладании окислительных условий ([Сердобольский, 1965](#)).

Почва имеет кислую реакцию, самая низкая величина $pH_{\text{водн.}} = 4$ характерна для органогенного горизонта, в нижней части профиля этот показатель выше – $pH_{\text{водн.}} = 5.6\text{--}5.7$ и соответствует слабокислой реакции среды. Обменная кислотность сильно варьирует: от $pH_{\text{KCl}} = 3.0$ в подстилке до 4.7–4.9 в нижней части профиля, – что свидетельствует об интенсивно протекающих процессах трансформации минералов.

Минеральные горизонты подзола иллювиально-железистого отличаются очень низким содержанием органического вещества, азота и остальных элементов питания растений (табл. 1).

В нижней части склона озера неширокой полосой в периферийной части болота под черничными влажными микрогруппировками соснового древостоя подзолы иллювиально-железистые сменяются полугидроморфными почвами – подзолами иллювиально-железистыми глеевыми.

Таблица 1. Физико-химические свойства почв ландшафта озерно-ледниковой равнины
Table 1. Physico-chemical properties of soils of undulating glaciolacustrine sandy plain

Гори- зонт	Мощ- ность, см	рН KCl	рН H ₂ O	P ₂ O ₅	K ₂ O	V [*]	Гумус	N	Зольность ***/ппп ***	Сумма фракций < 0.01 мм
									%	
Автономный ландшафт. Подзол иллювиально-железистый.										
O	0–8	3.1	4.0	42.8	82.2	3.5	62.5	0.54	31.8	-
E	8–17 (25)	3.3	4.5	2.4	1.2	0	0.2	0.14	0.5	8.1
BF	17 (25)–30	4.4	5.0	27.7	0.9	0	1.9	0.08	4.4	6.4
BF2	30–46	4.9	5.5	9.8	0.6	0	0.4	0.06	1.2	4.8
BC	46–70	4.8	5.7	12.3	0.8	26.3	0.1	0.04	0.7	3.6
C1	ниже 70	4.7	5.6	5.7	0.4	17.2	0.3	0.02	0.6	3.0
Транзитный ландшафт. Подзол иллювиально-железистый глеевый										
OT	0–9	3.0	3.8	40.2	100.0	33.7	83.7	1.29	52.1	-
T1	9–15	3.5	4.3	-	-	-	78.5	1.00	44.2	-
TAh	15–20	3.6	4.5	-	-	-	53.01	0.95	41.6	-
E	20	4.5	5.3	1.0	1.7	14.7	0.60	0.08	1.2	5.5
BFg	ниже 50	4.7	5.8	34.0	1.5	13.5	0.8	0.09	2.1	6.0
Аккумулятивный ландшафт. Торфяно-глеевая почва										
OT	0–15	3.2	3.8	21.2	92.3	0	85.51	1.00	2.9	-
T1	15–25	3.2	3.8	23.8	110.0	0	80.13	1.07	5.6	-
T2	25–40	3.4	4.0	18.9	84.6	9.6	82.73	1.75	7.8	-
T3	40–50	3.8	4.6	10.4	30.8	3.0	84.52	1.75	8.1	-
G1	50–60	4.1	4.8	-	-	-	9.54	-	11.6	-
G2	ниже 60	4.5	4.9	-	-	-	9.02	-	11.8	-

Примечание. * – степень насыщенности основаниями; ** – зольность дана для органогенных горизонтов O, OT, TAh и T; *** – потеря при прокаливаниями, дана для минеральных горизонтов.

В напочвенном покрове появляются сфагновые мхи, что обуславливает развитие мощной оторфованной подстилки (более 20 см), состоящей из слоев торфа разной степени разложения. Между торфяным слоем и мощным подзолистым горизонтом (15–20 см) формируется органоминеральный слой (горизонт ТAh) темного, почти черного цвета, он имеет небольшую мощность (1–3 см), и на границе перехода к минеральной части почвы отмечается наличие остатков углей. Нижняя часть профиля заливается грунтовыми водами (с 40–60 см). Величина Eh в оторфованной подстилке варьирует в пределах 400–500 мВ. В нижней части профиля этот показатель снижается до 350 мВ, что свидетельствует о переходных условиях – от окислительных к восстановительным.

Почвы кислые, самые низкие показатели pH характерны для оторфованной подстилки ($\text{pH}_{\text{KCl}} = 3.0\text{--}3.5$), вниз по профилю значения pH повышаются до 4.6–4.8. Также как и для почвы, рассмотренной ранее, отмечается невысокий уровень содержания органического вещества и изучаемых химических элементов в минеральных горизонтах.

В подчиненных позициях рельефа в условиях заболоченного сосняка багульнико-сфагнового формируются торфяные болотные и торфяно-глеевые почвы переходного типа. Профиль почв представляет собой слои торфа разной степени разложения. Грунтовые воды находятся близко к поверхности, и во влажные годы профиль почвы полностью заливается.

Торфяные почвы имеют кислую реакцию среды ($\text{pH}_{\text{водн.}} - \text{от 4.0 до 4.6}$), наименее кислыми являются глеевые горизонты – $\text{pH}_{\text{водн.}} - 4.8\text{--}4.9$. Величина обменной кислотности в торфяных горизонтах варьирует от 3.2 до 3.8, уменьшаясь в зависимости от степени разложения торфа, в глеевых горизонтах – $\text{pH}_{\text{KCl}} = 4\text{--}4.5$.

Почвы бедны органическим веществом. Зольность торфа низкая (2.7–3.3%) в верхних слоях торфа, состоящего из почти неразложившегося сфагнового мха. Нижние слои торфа более высокозольные, в них встречаются остатки осоки средней степени разложения, содержание золы увеличивается до 8–9%.

Торфяные почвы являются неоднородной геохимической системой, условия миграции в них с глубиной резко меняются, и

протекают реакции окисления и восстановления различной природы ([Инишева, 2010, 2016](#)). Очес и верхние рыхлые слаборазложившиеся оторфованные горизонты характеризуются окислительными условиями ($Eh = 400\text{--}500$ мВ). В нижележащих слоях торфа, на глубине примерно 30–40 см, Eh уменьшается до 250–350 мВ, а на уровне ниже 50–70 см его величина снижается еще сильнее (менее 200 мВ), то есть преобладают восстановительные условия.

Типоморфным, то есть определяющим направление миграции элементов, для почв автоморфного и транзитного ландшафтов является катион водорода H^+ , таким образом, такие почвы имеют кислый класс водной миграции, который характеризуется высокой миграционной способностью большинства элементов-металлов. В глеевых горизонтах почв аккумулятивного ландшафта условия миграции меняются на восстановительные глеевые, железо изменяет валентность и становится типоморфным.

Валовой состав изучаемых подзолов имеет характерную для всех подзолов четкую дифференциацию горизонтов по содержанию кремнекислоты SiO_2 , оксидов железа и алюминия R_2O_3 (табл. 2). Изучаемые почвы отличаются очень высоким содержанием кремнекислоты – более 80%. На втором месте по содержанию находится оксид алюминия (9–14%). В сумме эти два оксида составляют более 90%, на остальные элементы приходится менее 10%. Распределение железа по профилям подзолов, по сравнению с алюминием, носит более контрастный характер, что также отмечается и в исследовании [Урусевской И.С. \(2017\)](#). При сопоставлении с подзолами Кольского полуострова, развитыми на песчаных отложениях ([Переверзев, 2009](#)), можно отметить, что изучаемые почвы отличаются более “бедным” химическим составом.

В лесной подстилке автоморфных почв происходит накопление большинства элементов, особенно интенсивно аккумулируется кальций и фосфор. В подзолистом горизонте наблюдается вынос большинства полутонких окислов со средней степенью интенсивности, в альфегумусовом горизонте эти процессы переходят в накопление слабой степени.

Таблица 2. Валовой состав почв ландшафта озерно-ледниковой равнины, %
Table 2. Bulk composition of soils of undulating glaciolacustrine sandy plain, %

Гори- зонт	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	CaO	K ₂ O	MgO	Na ₂ O	P ₂ O ₅	TiO ₂	SiO ₂ /Al ₂ O ₃	SiO ₂ /Fe ₂ O ₃	SiO ₂ /R ₂ O ₃	Al ₂ O ₃ /Fe ₂ O ₃
Автономный ландшафт. Подзол иллювиально-железистый.													
O	73.2	2.9	13.2	4.1	1.9	0.7	1.8	1.3	0.5	9	67	8	7
E	81.9	3.0	10.0	1.9	0.3	0.2	2.4	0.1	0.3	14	74	12	5
BF	80.4	2.1	11.0	1.6	1.5	0.3	3.1	0.1	0.3	12	101	11	8
BF2	80.0	2.3	10.3	1.6	1.5	0.7	3.2	0.1	0.2	13	93	12	7
BC	81.0	1.7	10.2	1.5	1.6	0.4	3.1	0.0	0.2	14	124	12	9
C	81.6	1.6	9.8	1.6	1.5	0.5	2.8	0.1	0.2	14	133	13	9
Транзитный ландшафт. Подзол иллювиально-железистый глеевый.													
OT	70.8	2.3	11.2	5.3	2.3	1.5	1.7	2.0	0.3	11	82	10	8
TAh	77.6	1.7	9.7	3.2	1.4	1.0	1.8	1.5	0.3	14	122	12	9
E	86.8	0.4	8.4	0.6	1.3	0.1	1.8	0.0	0.1	18	564	17	32
Bh1	78.6	1.4	14.1	1.2	1.6	0.6	2.2	0.2	0.3	10	155	9	16
Bh2	80.4	1.2	12.6	1.0	1.6	0.5	2.3	0.1	0.2	18	173	10	16
Bg	81.6	1.1	10.9	1.0	1.6	0.6	2.4	0.0	0.2	13	198	12	16
BCg	82.5	1.0	10.4	1.1	1.6	0.4	2.4	0.0	0.1	14	224	13	17
Аккумулятивный ландшафт. Торфяно-глеевая почва.													
OT	59.2	4.8	12.3	9.5	3.6	3.0	0.7	н. д.	н. д.	8	33	7	4
T1	68.1	5.6	10.7	4.1	1.8	0.7	0.9	н. д.	н. д.	11	33	8	3
T2	56.4	3.7	19.9	5.8	1.3	0.9	0.8	н. д.	н. д.	5	40	4	8
G2	72.6	1.5	11.2	1.3	1.5	0.7	1.4	н. д.	н. д.	11	127	10	11

Примечание. н. д. – нет данных.

В нижних горизонтах не наблюдается дифференциации содержания элементов относительно почвообразующей породы, то есть нижняя часть профиля слабо преобразована почвообразовательными процессами, что также подтверждает равномерное распределение титана ([Самофалова, 2016](#)).

В мощной оторфованной подстилке (особенно в нижней гумусированной части) подзола иллювиально-железистого глеевого происходит интенсивное накопление большинства полуторных окислов. Также наблюдается усиление процессов аккумуляции фосфора и кальция наряду с увеличением степени заторфованности подстилки.

В подзолистом горизонте почв выявлен более интенсивный вынос элементов, по сравнению с почвами автоморфных позиций, а для иллювиального горизонта подзола глеевого отмечаются высокие коэффициенты накопления элементов, особенно алюминия, железа, титана и фосфора.

Составлены ряды элементов по возрастающему значению рассчитанных элювиально-аккумулятивных коэффициентов (Kr) (табл. 3). По ним можно судить о порядке относительного выноса или накопления элементов в различных горизонтах почв.

Можно отметить, что формирующийся в почвах транзитных ландшафтов иллювиальный горизонт представляет собой сорбционный барьер большей мощности, чем таковой в автономных почвах. Это связано с более интенсивным процессом разрушения минеральных частиц в подзолистом горизонте, за счет чего происходит вынос большинства элементов (алюминия, железа, магния, фосфора и титана) из этого слоя и их осаждение в иллювиальном горизонте.

Для всех изучаемых почв характерен дефицит большинства микроэлементов, коэффициенты концентрации говорят об обедненности почв микроэлементами при их сопоставлении с фоновыми значениями ([Федорец, 2008](#)).

Таблица 3. Ряды элементов по значению Kr в горизонтах почв элементарных геохимических ландшафтах (1 – автономный, 2 – транзитный, 3 – аккумулятивный)

Table 3. Rows of elements according Kr value in soils' horizons of elementary landscapes
 (1 – automorphous, 2 – transite, 3 – accumulative)

Горизонты О (ОТ)									
1	$\frac{\text{Na}_2\text{O}}{0.7}$	$\frac{\text{SiO}_2}{0.9}$	$\frac{\text{K}_2\text{O}}{1.3}$	$\frac{\text{Al}_2\text{O}_3}{1.3}$	$\frac{\text{MgO}}{1.4}$	$\frac{\text{Fe}_2\text{O}_3}{1.8}$	$\frac{\text{TiO}_2}{2.3}$	$\frac{\text{CaO}}{2.6}$	$\frac{\text{P}_2\text{O}_5}{12.9}$
2	$\frac{\text{Na}_2\text{O}}{0.7}$	$\frac{\text{SiO}_2}{0.9}$	$\frac{\text{Al}_2\text{O}_3}{1.1}$	$\frac{\text{K}_2\text{O}}{1.5}$	$\frac{\text{Fe}_2\text{O}_3}{2.3}$	$\frac{\text{TiO}_2}{2.6}$	$\frac{\text{MgO}}{3.8}$	$\frac{\text{CaO}}{4.8}$	$\frac{\text{P}_2\text{O}_5}{20.0}$
3	$\frac{\text{Na}_2\text{O}}{0.5}$	$\frac{\text{SiO}_2}{0.8}$	$\frac{\text{Al}_2\text{O}_3}{1.1}$	$\frac{\text{K}_2\text{O}}{2.4}$	$\frac{\text{Fe}_2\text{O}_3}{3.2}$	$\frac{\text{MgO}}{4.2}$	$\frac{\text{CaO}}{7.3}$	-	-
Горизонты Е									
1	$\frac{\text{K}_2\text{O}}{0.2}$	$\frac{\text{MgO}}{0.4}$	$\frac{\text{Na}_2\text{O}}{0.8}$	$\frac{\text{P}_2\text{O}_5}{0.9}$	$\frac{\text{CaO}}{1.2}$	$\frac{\text{SiO}_2}{1.0}$	$\frac{\text{Al}_2\text{O}_3}{1.0}$	$\frac{\text{TiO}_2}{1.7}$	$\frac{\text{Fe}_2\text{O}_3}{1.8}$
2	$\frac{\text{P}_2\text{O}_5}{0.3}$	$\frac{\text{MgO}}{0.3}$	$\frac{\text{Fe}_2\text{O}_3}{0.4}$	$\frac{\text{CaO}}{0.6}$	$\frac{\text{K}_2\text{O}}{0.8}$	$\frac{\text{Na}_2\text{O}}{0.8}$	$\frac{\text{Al}_2\text{O}_3}{0.8}$	$\frac{\text{SiO}_2}{1.1}$	$\frac{\text{TiO}_2}{1.2}$
Горизонты ВF									
1	$\frac{\text{MgO}}{0.4}$	$\frac{\text{K}_2\text{O}}{1.0}$	$\frac{\text{SiO}_2}{1.0}$	$\frac{\text{CaO}}{1.0}$	$\frac{\text{Al}_2\text{O}_3}{1.1}$	$\frac{\text{Na}_2\text{O}}{1.1}$	$\frac{\text{P}_2\text{O}_5}{1.1}$	$\frac{\text{Fe}_2\text{O}_3}{1.3}$	$\frac{\text{TiO}_2}{1.7}$
2	$\frac{\text{Na}_2\text{O}}{0.9}$	$\frac{\text{SiO}_2}{1.0}$	$\frac{\text{K}_2\text{O}}{1.0}$	$\frac{\text{CaO}}{1.1}$	$\frac{\text{Al}_2\text{O}_3}{1.4}$	$\frac{\text{Fe}_2\text{O}_3}{1.4}$	$\frac{\text{MgO}}{1.5}$	$\frac{\text{P}_2\text{O}_5}{1.5}$	$\frac{\text{TiO}_2}{2.6}$

На основе рассчитанных Кс построены геохимические формулы почв элементарных ландшафтов (табл. 4), которые позволяют выявить типоморфные геохимические процессы, определяющие ландшафтно-геохимическую дифференциацию территории, оценить недостаток или избыток изучаемых элементов, а также судить о характере их миграции и аккумуляции ([Перельман, 1999](#)).

Получены очень низкие значения Кс никеля, кобальта, марганца в изучаемых почвах. Для хрома выявлены более высокие Кс, однако они также меньше единицы ($\text{Кс} < 0.5\text{--}0.7$). Данная особенность связана с тем, что почвообразующие и подстилающие породы изучаемых почв представлены песчаными флювиогляциальными отложениями, которые характеризуются очень низкими концентрациями изучаемых микроэлементов ([Тойкка, 1973](#)). Тем не менее отмечается, что содержание меди, а в некоторых случаях и цинка, находится на уровне фоновых значений.

Расчет коэффициентов радиального распределения (K_r) микроэлементов в профилях рассматриваемых почв позволили выявить закономерности радиальных процессов накопления-выноса элементов. Направления радиальной миграции элементов в изучаемых почвах достаточно контрастные и имеют различные закономерности, связанные с положением в рельефе. Для почв автоморфных и транзитных фаций отмечается общая закономерность накопления в лесной подстилке микроэлементов-биогенов (рис. 3). Наиболее активно в подстилке накапливается цинк, его K_r достигает 3–4, что свидетельствует об активном участии цинка в биогенных процессах. Отмечается значительное снижение содержания рассматриваемых элементов с увеличением степени оторвованности подстилки, что связано с особенностью опада, а также с активным выщелачиванием их из растительных остатков в почвенные и болотные воды. Существенное снижение концентрации марганца в почвах подчиненных позиций связывают с его большей растворимостью при смене окислительной реакции среды на восстановительную ([Безносиков, 2010](#)), что способствует его выносу за пределы почвенного профиля.

Таблица 4. Геохимические формулы почв катены
Table 4. Geochemical formulas of soils of catena

Гори- зонт	Геохимическая формула		
Автономный ландшафт. Подзол иллювиально-железистый.			
O	H ⁺	Mn (0.3) Ni (0.4) Co (0.5) Cr (0.6) Zn (1.1)	Cu (1.0)
E	H ⁺	Ni(0.1) Cr(0.3) Mn(0.3) Cu (0.4) Co (0.5) Zn (0.6) —	—
BF	H ⁺	Ni (0.3) Cr(0.4) Co(0.4) Mn (0.6) Zn (1.3)	Cu (0.9)
BC	H ⁺	Ni (0.4) Cr (0.4) Co (0.5) Mn (0.6) Zn (0.8) —	Cu (0.9)
C	H ⁺	Cr (0.3) Ni (0.4) Co (0.5) Mn (0.6) Zn (0.8) —	Cu (1.0)
Транзитный ландшафт. Подзол иллювиально-железистый глеевый.			
OT	H ⁺	Mn(0.1) Co(0.2) Zn(0.3) Ni(0.3) Cr (0.4) Cu(0.6) —	—
E	H ⁺	Ni (0.1) Mn (0.1) Cr (0.2) Co (0.2) Zn (0.3) Cu (0.4) —	—
BF	H ⁺	Ni (0.2) Mn (0.2) Co (0.2) Cr (0.4) Zn (0.5) —	Cu (0.9)
Cg	H ⁺ Fe ²⁺	Mn (0.2) Ni (0.2) Cr (0.3) Co (0.3) Cu (0.6) Zn (0.7) —	—
Аккумулятивный ландшафт. Торфяно-глеевая почва.			
OT	H ⁺	Co (0.1) Ni (0.2) Mn (0.2) Zn (0.4) Cr (0.5) Cu (0.7) —	—
T1	H ⁺	Mn(0.1) Co (0.2) Ni (0.2) Zn (0.3) Cr (0.4) Cu (0.4) —	—
T2	H ⁺	Mn (0.1) Co (0.3) Ni (0.4) Zn (0.5) Cu (0.7) Cr (0.7) —	—
G	H ⁺ Fe ²⁺	Ni (0.1) Co (0.2) Cr (0.2) Mn (0.3) Zn (0.7) Cu (1.2)	—

В минеральных горизонтах подзолов иллювиально-железистых и иллювиально-железистых глеевых преобладают процессы выноса ($Kr < 1$) большинства микроэлементов. Распределение изучаемых элементов в подзолах происходит по элювиально-иллювиальному типу, что также является характерным для исследуемых почв ([Полынов, 1956](#)).

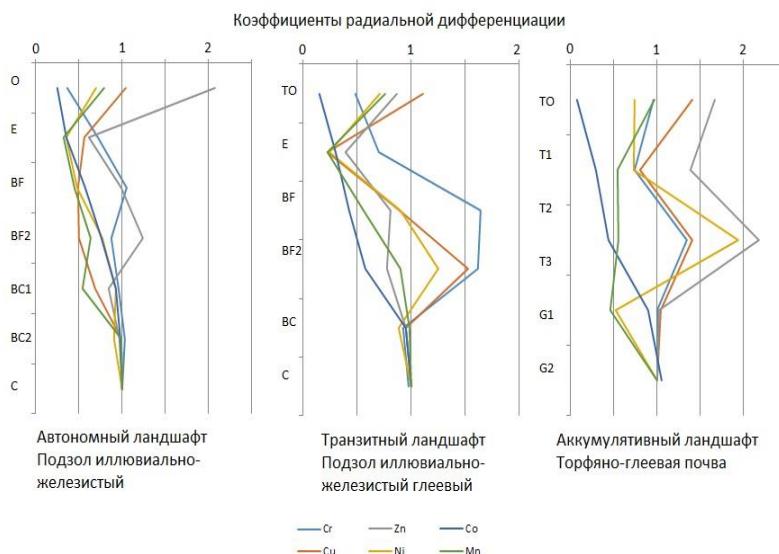


Рис. 3. Радиальная дифференциация микроэлементов по горизонтам почв элементарных ландшафтов.

Fig. 3. Radial differentiation of trace elements within soils' horizons in elementary landscapes.

В подзолистом горизонте отмечается активный вынос большинства элементов, в иллювиальных горизонтах на сорбционном барьере происходит слабое накопление цинка и сидерофильных, связанных с железом, микроэлементов – кобальта и никеля.

Несмотря на сходные закономерности радиальной миграции элементов в почвах элювиальных и транзитных ландшафтов, наблюдается различная степень интенсивности миграции элементов в связи с изменением положения в рельефе. Для почв подчиненных ландшафтов характерен, кроме вертикального дренирования, боковой сток, в связи с чем четкого накопления изучаемых микроэлементов (за исключением хрома) в иллювиальных горизонтах подзола иллювиально-железистого глеевого не наблюдается в сравнении с подзолом иллювиально-железистым. Однако аккумуляция марганца, никеля, меди в

нижней части профиля в подзоле иллювиально-железистом глеевом происходит более интенсивно, что может быть вызвано изменением окислительно-восстановительных условий в сторону восстановительных и формированием окислительного геохимического барьера ([Алекссенко, 2003](#)).

Также отмечено, что в почвах автоморфных позиций распределение микроэлементов в нижней части профиля имеет монотонный характер, в то время как для почв транзитных ландшафтов характерна более интенсивная дифференциация микроэлементов.

По рассчитанным величинам коэффициента латеральной дифференциации Кл (рис. 4) можно судить о латеральной структуре ландшафтов, которая характеризует геохимическое сопряжение в изучаемых катенах. Отмечается, что процессы латеральной дифференциации изучаемых элементов выражены слабо, и выявлена общая тенденция обеднения почв подчиненных позиций относительно автономных.

Полученные данные отличаются от результатов большинства подобных исследований, где говорится о накоплении химических элементов в почвах подчиненных элементов рельефа ([Касимов, 2015](#); [Семенков, 2016](#)). Подобные наблюдения объясняются тем, что для территории исследования характерно однородное строение, рельеф имеет слабый уклон, почвы сформированы на песчаных почвообразующих породах и отличаются невысокой гумусностью. В связи с этим устойчивые соединения практически не выносятся из элювиальных ландшафтов, формируется транзитно-элювиальный (с обеднением гетерономных почв относительно автономных) тип латерально-миграционной дифференциации катены ([Гаврилова, Касимов, 1989](#); [Геохимия..., 2011](#)).

Кл

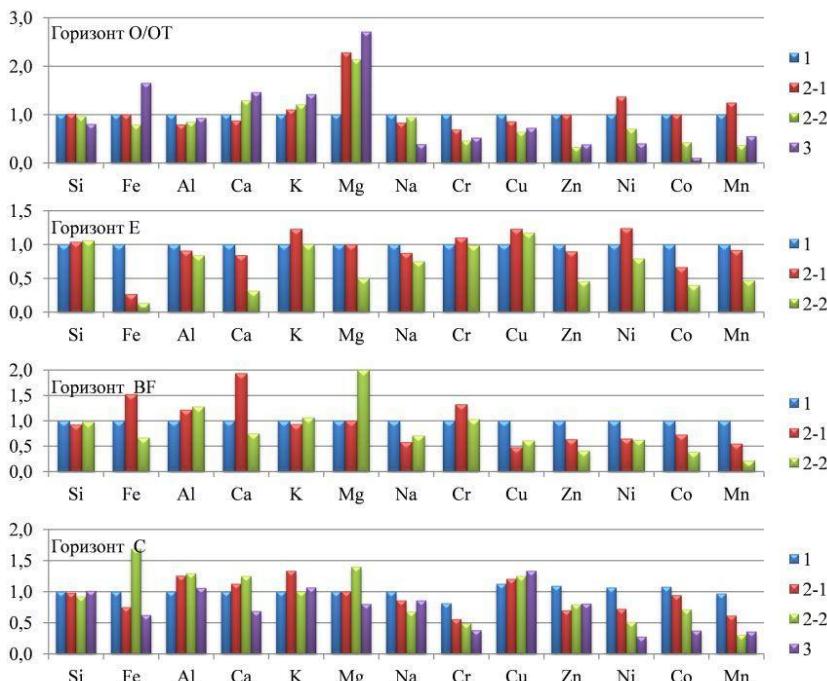


Рис. 4. Латеральная дифференциация химических элементов в горизонтах почв катены (1 – автономный; 2-1 и 2-2 – транзитный; 3 – аккумулятивный ландшафт).

Fig. 4. Lateral differentiation of chemical elements in soils' horizons of catena (elementary landscapes: 1 – automorphous; 2-1 and 2-2 – transite; 3 – accumulative).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Определяющими условиями ландшафтно-геохимической дифференциации химических элементов в изучаемых почвах являются природные факторы почвообразования: избыточное увлажнение, промывной режим, небольшой уклон поверхности, песчаные озерно-ледниковые почвообразующие породы, их хорошая дренированность, таежная растительность и заторможенное разложение растительных остатков. Анализ валового состава и

содержания микроэлементов в сопряженном ряду почв ландшафта волнистой озерно-ледниковой песчаной равнины среднетаежной подзоны Карелии позволил выявить следующие геохимические особенности:

- Почвы автоморфных и транзитных ландшафтов характеризуются окислительными условиями и имеют типичный для среднетаежной подзоны Карелии кислый класс водной миграции. Торфяные почвы, формирующиеся в подчиненных частях рельефа, являются неоднородной геохимической системой, где условия миграции резко меняются с глубиной. Верхние слои торфа характеризуются окислительной средой, а нижние – восстановительной и имеют глеевый класс водной миграции.

- В валовом составе почв отмечается типичное для подзолов распределение по профилю кремнекислоты и большинства полуторных оксидов. В подзолистых горизонтах почв транзитных позиций, по сравнению с автоморфными, происходит более интенсивный вынос элементов, а в альфегумусовых горизонтах подзола иллювиально-железистого глеевого выявлены высокие коэффициенты накопления алюминия, железа, титана и фосфора.

- Для всех изучаемых почв характерен дефицит большинства микроэлементов, получены очень низкие коэффициенты концентрации никеля, кобальта, марганца. Почвы автоморфных и транзитных фаций отличаются накоплением в лесной подстилке микроэлементов-биогенов, особенно цинка и марганца, с увеличением степени оторфованности подстилки происходит значительное снижение содержания микроэлементов.

- Радиальное распределение большинства микроэлементов по профилям подзолов носит аккумулятивно-элювиально-иллювиальных характер. Наблюдается различная степень интенсивности миграции элементов в связи с изменением положения в рельефе. В почвах автоморфных позиций распределение микроэлементов в нижней части профиля имеет монотонный характер, в то время как для почв транзитных ландшафтов характерна более интенсивная дифференциация микроэлементов.

- По типу латерально-миграционной дифференциации изучаемые катены относятся к транзитно-элювиальным. Наблюдается уменьшение содержания элементов в ландшафтах по направлению

от автоморфных к аккумулятивным, что определяется природными условиями изучаемой территории.

БЛАГОДАРНОСТЬ

Данные были получены с использованием оборудования ЦКП “Аналитическая лаборатория” ИЛ КарНЦ РАН.

Финансовое обеспечение исследований осуществлялось из средств федерального бюджета на выполнение государственного задания КарНЦ РАН (Институт леса).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Авессаломова И.А.* Геохимические показатели при изучении ландшафтов. М.: Изд-во МГУ, 1987. 108 с.
2. *Алексеенко В.А., Алексеенко Л.П.* Геохимические барьеры. М: Логос, 2003. 144 с.
3. *Аринушикина Е.В.* Руководство по химическому анализу почв. М.: Изд-во МГУ, 1970. 488 с.
4. *Безносиков В.А., Лодыгин Е.Д., Кондратенок Б.М.* Оценка фонового содержания тяжелых металлов в почвах европейского северо-востока России // Почвоведение. 2007. № 9. С. 1064–1070.
5. *Безносиков В.А., Лодыгин Е.Д., Чуков С.Н.* Ландшафтно-геохимическая оценка фонового содержания тяжелых металлов в почвах таежной зоны // Вестник Санкт-Петербургского университета. Серия Почвоведение. 2010. Сер. 3. Вып. 2. С. 114–127.
6. *Власова Н.В.* Ландшафтно-геохимическое состояние геосистем средней тайги // Вестник ТГУ. 2013. Т. 18. Вып. 2. С. 569–572.
7. *Водяницкий Ю.В., Ладонин Д.В., Савичев А.Т.* Загрязнение почв тяжелыми металлами. М.: Изд-во Почвенного института имени В.В. Докучаева РАСХН, 2012. 305 с.
8. *Гаврилова И.П., Касимов Н.С.* Практикум по геохимии ландшафта. М.: Изд-во МГУ, 1989. 72 с.
9. *Геннадиев А.Н., Касимов Н.С.* Латеральная миграция вещества в почвах и почвенно-геохимические катены // Почвоведение. 2004. № 12. С. 1447–1461.
10. Геохимия ландшафта / под ред. Н.К. Чертко. Минск: БГУ, 2011. 303 с.
11. *Глазовская М.А.* Проблемы и методы оценки эколого-геохимической устойчивости почв и почвенного покрова к техногенным воздействиям // Почвоведение. 1999. № 1. С. 114–124.

12. Глазовская М.А. Геохимические основы типологии и методики исследований природных ландшафтов. Смоленск: Ойкумена, 2002. 288 с.
13. Демидов И.Н., Лукашов А.Д., Ильин В.А. Рельеф заповедника “Кивач” и история геологического развития северо-западного Прионежья в четвертичном периоде // Труды Карельского научного центра РАН. 2006. Вып. 10. С. 22–33.
14. Добровольский В.В. Биосферные циклы тяжелых металлов и регуляторная роль почвы // Почвоведение. 1997. № 4. С. 431–441.
15. Ильин В.Б., Сысо А.И., Байдина Н.Л., Конарбаева Г.А., Черевко А.С. Фоновое количество тяжелых металлов в почвах юга Западной Сибири // Почвоведение. 2003. № 5. С. 550–556.
16. Инишева Л.И., Голубина О.А. Болотообразовательный процесс. Проведение полевых работ на болотных стационарах. Томск: Изд-во ТГПУ, 2010. 80 с.
17. Инишева Л.И., Шайдак Л., Сергеева М. А. Динамика биохимических процессов и окислительно-восстановительное состояние в геохимически сопряженных ландшафтах олиготрофного болота // Почвоведение. 2016. № 4. С. 505–513. DOI: [10.7868/S0032180X16040055](https://doi.org/10.7868/S0032180X16040055).
18. Касимов Н.С., Геннадиев А.Н., Лычагин М.Ю. Пространственные аспекты фонового геохимического мониторинга // Геохимические методы в экологических исследованиях. М., 1994. С. 20–35.
19. Касимов Н.С., Власов Д.В. Кларки химических элементов как эталоны сравнения в экогеохимии // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. География. 2015. № 2. С. 7–17.
20. Кацулина Г.М. Мониторинг загрязнения почв тяжелыми металлами в окрестностях медно-никелевого предприятия на Кольском полуострове // Почвоведение. 2018. № 4. С. 493–505. DOI: [10.7868/S0032180X1804010X](https://doi.org/10.7868/S0032180X1804010X).
21. Классификация и диагностика почв России / Л.Л. Шишов, В.Д. Тонконогов, И.И. Лебедева, М.И. Герасимова. Смоленск: Ойкумена, 2004. 342 с.
22. Кузьмин В.А. Геохимические барьеры в почвах Прибайкалья // Почвоведение. 2000. № 10. С. 1197–1202.
23. Лянгузова И.В. Тяжелые металлы в северотаежных экосистемах России. Пространственно-временная динамика при аэротехногенном загрязнении. Saarbrucken, 2016. 269 с.
24. Мониторинг и прогнозирование вещественно-динамического состояния геосистем Сибирских регионов. Новосибирск: Наука, 2010. 315 с.
25. Переверзев В.Н. Генетические особенности почв на отсортированных песчаных породах разного происхождения (Кольский полуостров) // Почвоведение. 2009. № 9. С. 1052–1060.

26. *Перельман А.И., Касимов Н.С.* Геохимия ландшафта. М.: “Астрея-2000”, 1999. 768 с.
27. *Полынов Б.Б.* Избранные труды. М., 1956. 751 с.
28. Разнообразие почв и биоразнообразие в лесных экосистемах средней тайги / отв. ред. Н.Г. Федорец. М.: Наука, 2006. 287 с.
29. Рассеянные элементы в boreальных лесах / Под ред. А.С. Исаева. М.: Наука, 2004. 410 с.
30. *Самофалова И.А., Рогова О.Б., Лузянина О.А., Савичев А.Т.* Геохимические особенности распределения макроэлементов в почвах ненарушенных ландшафтов среднего Урала (на примере заповедника “Басеги”) // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2016. Вып. 85. С. 57–76. DOI: [10.19047/0136-1694-2016-85-57-76](https://doi.org/10.19047/0136-1694-2016-85-57-76).
31. *Семенов Ю.М.* Ландшафтно-геохимический синтез и организация геосистем. Новосибирск: Наука, 1991. 144 с.
32. *Семенков И.Н., Касимов Н.С., Терская Е.В.* Латеральное распределение форм металлов в тундровых, таежных и лесостепных катенах Восточно-Европейской равнины // Вестн. Моск. ун-та. Сер. География. 2016. № 3. С. 29–39.
33. *Сердобольский И.П.* Методы определения pH и окислительно-восстановительного потенциала при агрохимических исследованиях // Агрохимические методы исследования почв. М.: Наука, 1965. С. 195–244.
34. *Сысо А.И.* Закономерности распределения химических элементов в почвообразующих породах и почвах Западной Сибири. Новосибирск: Издательство Сибирского отделения РАН, 2007. 277 с.
35. *Тойкка М.А., Перевозчикова Е.М., Левкина Т.И., Заварзин А.М., Михкиев А.И., Изергина М.М.* Микроэлементы в Карелии. Л.: Наука, 1973. 284 с.
36. *Урусевская И.С.* Почвенные катены цокольно-денудационных равнин лесотундры и северной тайги Кольского полуострова // Почвоведение. 2017. № 7. С. 771–786. DOI: [10.7868/S0032180X17070127](https://doi.org/10.7868/S0032180X17070127).
37. *Федорец Н.Г., Бахмет О.Н., Соловьевников А.Н., Морозов А.К.* Почвы Карелии: геохимический атлас. М.: Наука, 2008. 46 с.
38. *Яшин И.М., Раскатов В.А., Шишов Л.Л.* Водная миграция химических элементов в почвенном покрове. М.: МСХА, 2003. 316 с.
39. *Ander E.L., Johnson C.C., Cave M.R.A., Palumbo-Roe B., Nathanael C.P., R. Lark M.* Methodology for the determination of normal background concentrations of contaminants in English soil // Science of the Total Environment. 2013. Vol. 454–455. P. 604–618. DOI: [10.1016/j.scitotenv.2013.03.005](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.03.005).

40. *Barsova N., Yakimenko O., Tolpesheta I., Motuzova G.* Current state and dynamics of heavy metal soil pollution in Russian Federation. A review // Environmental Pollution 2019. Vol. 249. P. 200–207. DOI: [10.1016/j.envpol.2019.03.020](https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.03.020).
41. *Davydova N.D., Znamenskaya T.I., Lopatkin D.A.* Landscape-Geochemical Approach to Solving Problems of Environmental Pollution // Contemporary Problems of Ecology. 2014. Vol. 7. Iss. 3. P. 345–352. DOI: [10.1134/S1995425514030020](https://doi.org/10.1134/S1995425514030020).
42. *Evseev A.V., Krasovskaya T.M.* Toxic metals in soils of the Russian North // J. Geochem. Explor. 2017. Vol. 174. P. 128–131. DOI: [10.1016/j.gexplo.2015.05.018](https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2015.05.018).
43. *Husson O.* Redox potential (Eh) and pH as drivers of soil/plant/microorganism systems: a transdisciplinary overview pointing to integrative opportunities for agronomy // Plant Soil. 2013. Vol. 362. Iss. 1–2. P. 389–417. DOI: [10.1007/s11104-012-1429-7](https://doi.org/10.1007/s11104-012-1429-7).
44. *Jarva J., Tarvainen T., Reinikainen J., Eklund M.* TAPIR – Finnish national geochemical baseline database // Sci. Total Environ. 2010. Vol. 408. Iss. 20. P. 4385–4395. DOI: [10.1016/j.scitotenv.2010.06.050](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2010.06.050).
45. *Kiikkilä O., Nieminen T. M. Starr M. Mäkilä M., Loukola-Ruskeeniemi K., Ukonmaanaho L.* Leaching of dissolved organic carbon and trace elements after stem-only and whole-tree clear-cut on boreal peatland // Water Air Soil Pollut. 2014. 225:1767. DOI: [10.1007/s11270-013-1767-y](https://doi.org/10.1007/s11270-013-1767-y).
46. *Lado L.R., Hengl T., Reuter H.I.* Heavy metals in European soils: a geostatistical analysis of the FOREGS Geochemical database. Geoderma. 2008. Vol. 148. Iss. 2. P. 189–199. DOI: [10.1016/j.geoderma.2008.09.020](https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2008.09.020).
47. *Matschullat J., Ottenstein R., Reimann C.* Geochemical background – can we calculate it? // Environ. Geol. 2000. Vol. 39. P. 990–1000. DOI: [10.1007/s002549900084](https://doi.org/10.1007/s002549900084).
48. *Reimann C., Caritat P.* Distinguishing between natural and anthropogenic sources for elements in the environment: regional geochemical surveys versus enrichment factors // Sci. Total Environ. 2005. Vol. 337. Iss. 1–3. P. 91–107. DOI: [10.1016/j.scitotenv.2004.06.011](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2004.06.011).
49. *Reimann C., Garrett R.G.* Geochemical background – concept and reality // Sci. Total Environ. 2005. Vol. 350. P. 12–27. DOI: [10.1016/j.scitotenv.2005.01.047](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2005.01.047).
50. *Richardson J.B., Petrenko C. L., Friedland A.J.* Base cations and micronutrients in forest soils along three clear-cut chronosequences in the northeastern United States // Nutr Cycl Agroecosyst. 2017. Vol. 109. P. 161–179. DOI: [10.1007/s10705-017-9876-4](https://doi.org/10.1007/s10705-017-9876-4).
51. *Rodríguez-Eugenio N., McLaughlin M., Pennock D.* Soil Pollution: a Hidden Reality. FAO. Rome, 2018. 142 p. DOI: [10.3389/fenvs.2018.00130](https://doi.org/10.3389/fenvs.2018.00130).

REFERENCES

1. Avessalomova I.A., *Geokhimicheskie pokazateli pri izuchenii landshaftov* (Geochemical features in studies of landscapes), Moscow: Izd-vo MGU, 1987, 108 p.
2. Alekseenko V.A., Alekseenko L.P., *Geokhimicheskie bar'ery* (Geochemical barriers), Moscow: Logos, 2003, 144 p.
3. Arinushkina E.V., *Rukovodstvo po khimicheskому analizu pochv* (Manual to chemical soil analysis), Moscow: Izd-vo MGU, 1970, 488 p.
4. Beznosikov V.A., Lodygin E.D., Kondratenok B.M., Otsenka fonovogo soderzhaniya tyazhelykh metallov v pochvakh evropeiskogo severo-vostoka Rossii (Assessment of Background Concentrations of Heavy Metals in Soils of the Northeastern Part of European Russia), *Pochvovedenie*, 2007, No. 9, pp. 1064–1070.
5. Beznosikov V.A., Lodygin E.D., Chukov S.N., Landshaftno-geokhimicheskaya otsenka fonovogo soderzhaniya tyazhelykh metallov v pochvakh taezhnoi zony (Landscape-geochemical assessment of heavy metals' background content in soils of taiga zone), *Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta. Seriya 3. Pochvovedenie*, 2010, No. 2, pp. 114–127.
6. Vlasova N.V., Landshaftno-geokhimicheskoe sostoyanie geosistem srednei taiga (Soil-geochemical condition of middle taiga geosystems), *Vestnik TGU*, 2013, Vol. 18, Iss. 2, pp. 569–572.
7. Vodyanitskii Yu.V., Ladonin D.V., Savichev A.T., *Zagryaznenie pochv tyazhelyimi metallami* (Heavy metal contamination of soil), Moscow: Izd-vo Pochvennogo instituta im. V.V. Dokuchaeva RASKhN, 2012, 305 p.
8. Gavrilova I.P., Kasimov N.S., *Praktikum po geokhimii landshafta* (Practicum of geochemistry of landscape), Moscow: Izd-vo MGU, 1989, 72 p.
9. Gennadiev A.N., Kasimov N.S., Lateral'naya migratsiya veshchestva v pochvakh i pochvenno-geokhimicheskie katory (Lateral migration of substances in soils and soil-geochemical catenas), *Pochvovedenie*, 2004, No. 2, pp. 1447–1461.
10. Chertko N. K., Koval'chuk N.K., Khomich V.S., Karpichenko A.A., Zhumar' P.V., Timofeeva T.A., *Geokhimiya landshafta* (Geochemistry of landscape), Minsk: BGU, 2011, 303 p.
11. Glazovskaya M.A., Problemy i metody otsenki ekologo-geokhimicheskoi ustoichivosti pochv i pochvennogo pokrova k tekhnogennym vozdeistviyam (Problems and methods of assessment of the ecogegeochemical resilience of soils and the soil cover towards technogenic impacts), *Pochvovedenie*, 1999, No. 1, pp. 114–124

12. Glazovskaya M.A., *Geokhimicheskie osnovy tipologii i metodiki issledovanii prirodnnykh landshaftov* (Geochemical basis of typology and methodology in natural landscape studies), Smolensk: Oikumena, 2002, 288 p.
13. Demidov I.N., Lukashov A.D., Il'in V.A., *Rel'ef zapovednika "Kivach" i istoriya geologicheskogo razvitiya severo-zapadnogo Prionezh'ya v chetvertichnom periode* (Relief of the reserve territory "Kivach" and the geological evolution of the northwestern Pronezhie at quaternary time), *Trudy Karel'skogo nauchnogo tsentra RAN*, Iss. 10, 2006, pp. 22–33.
14. Dobrovol'skii V.V., *Biosfernye tsikly tyazhelykh metallov i regul'atory tornaya roli pochvy* (Biospheric cycles of heavy metals and regulatory role of soil), *Pochvovedenie*, 1997, No. 4, pp. 431–441.
15. Il'in V.B., Syso A.I., Baidina N.L., Konarbaeva G.A., Cherevko A.S., *Fonovoe kolichestvo tyazhelykh metallov v pochvakh yuga Zapadnoi Sibiri* (Background concentrations of heavy metals in soils of southern western siberia), *Pochvovedenie*, 2003, No. 5, pp. 550–556.
16. Inisheva L.I., Golubina O.A., *Bolotoobrazovatel'nyi protsess. Provedenie polevykh rabot na bolotnykh stasionarakh* (Mire formation. Fieldwork surveys on mire's permanent study areas), Tomsk: Izd-vo TGPU, 2010, 80 p.
17. Inisheva L.I., Sergeeva M.A., Szajdak L., Dynamics of biochemical processes and redox conditions in geochemically linked landscapes of oligotrophic bogs, *Eurasian Soil Science*, 2016, No. 4, pp. 466–474, DOI: [10.7868/S0032180X16040055](https://doi.org/10.7868/S0032180X16040055).
18. Kasimov N.S., Gennadiev A.N., Lychagin M.Yu., *Prostranstvennye aspekty fonovogo geokhimicheskogo monitoringa* (Spatial basis of baseline geochemical monitoring), In *Geokhimicheskie metody v ekologicheskikh issledovaniyah* (Geochemical methods in environmental investigations), Moscow, 1994, pp. 20–35.
19. Kasimov N.S., Vlasov D.V., Klarki khimicheskikh elementov kak etalonnye srovneniya v ekogeokhimii (Clarkes of chemical elements as comparison standards in ecgeochemistry), *Vestn. Mosk. un-ta, Iss. 5, Geografiya*, 2015, No. 2, pp. 7–17.
20. Kashulina G.M., Monitoring of soil contamination by heavy metals in the impact zone of copper-nickel smelter on the Kola Peninsula, *Eurasian Soil Sci.*, No. 51 (4), 2018, pp. 467–478, DOI: [10.7868/S0032180X1804010X](https://doi.org/10.7868/S0032180X1804010X).
21. Shishov L.L., Tonkonogov V.D., Lebedeva I.I., Gerasimova M.I., *Klassifikatsiya i diagnostika pochv Rossii* (Russian soil classification and diagnostic), Smolensk: Oikumena, 2004, 342 p.
22. Kuz'min V.A., Geokhimicheskie bar'ery v pochvakh Pribaikal'ya (Geochemical barriers in soils of Pribaikal'ye), *Pochvovedenie*, 2000, No. 10, pp. 1197–1202.

23. Lyanguzova I.V., *Tyazhelye metally v severotaezhnykh ekosistemakh Rossii* (Heavy metals in ecosystems of Russian northern taiga), Saarbrucken, 2016, 269 p.
24. Nечаева Е.Г., Белозертсева И.А., Напрасникова Е.В., Вороб'ева И.Б., Давыдова Н.Л., Дубынина С.С., Власова Н.В. *Monitoring i prognozirovaniye veshchestvenno-dinamicheskogo sostoyaniya geosistem Sibirskikh regionov* (Monitoring and forecasting of the substance-dynamical state of geosystems in the Siberian regions), Novosibirsk: Nauka, 2010, 315 p.
25. Pereverzhev. V.N., Genetic features of soils on sorted sand deposits of different origins in the Kola Peninsula, *Eurasian Soil Sci.*, 2009, Vol. 9, Iss. 42, pp. 976–983, DOI: [10.1134/S1064229309090038](https://doi.org/10.1134/S1064229309090038).
26. Перельман А.И., Касимов Н.С., *Geokhimiya landshafta* (Geochemistry of landscape), Moscow: Astreya-2000, 1999, 768 p.
27. Полнов Б.Б., *Izbrannye trudy* (Selectas), Moscow: Nauka, 1956, 751 p.
28. Федорет Н.Г., *Raznoobrazie pochv i bioraznoobrazie v lesnykh ekosistemakh srednei taigi* (Diversity of soils and biodiversity in forest ecosystems of middle taiga), Moscow: Nauka, 2006, 287 p.
29. Полянская Л.М., Никонов В.В., Лукина Н.В., Паникова А.Н., *Rasseyannye elementy v boreal'nykh lesakh* (Trace elements in boreal forests), Moscow: Nauka, 2004, 410 p.
30. Самофалова И.А., Рогова О.Б., Лузынина О.А., Савичев А.Т., Геохимические особенности распределения макроэлементов в почвах ненарушенных ландшафтов среднего Урала (на примере заповедника “Басеги”) (The geochemical specificities of distribution of macroelements within the soils of undisturbed landscapes of middle Ural (on the example of “Basegi” preserve), *Dokuchaev Soil Bulletin*, 2016, Vol. 85, pp. 57–76, DOI: [10.19047/0136-1694-2016-85-57-76](https://doi.org/10.19047/0136-1694-2016-85-57-76).
31. Семенов Ю.М., *Landshaftno-geokhimicheskii sintez i organizatsiya geosistem* (Landscape-geochemical synthesis and organization of geosystems), Novosibirsk: Nauka, 1991, 144 p.
32. Семенков И.Н., Касимов Н.С., Терская Е.В., Lateral'noe raspredelenie form metallov v tundrovyykh, taezhnykh i lesostepnykh katenakh Vostochno-Evropeiskoi ravniny (Lateral distribution of metal forms in tundra, taiga and forest steppe catenae of the East European Plain), *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya Geografiya*, 2016, No. 3, pp. 29–39.
33. Сердобольский И.П., Методы определения pH и окислительно-восстановительного потенциала при агрохимических исследованиях (Methods of determination pH and redox potential in agrochemical investigations), In: *Agrokhimicheskie metody issledovaniya pochv* (Argochemical methods of soil analysis), Moscow: Nauka, 1965, pp. 195–244.

34. Syso A.I. *Zakonomernosti raspredeleniya khimicheskikh elementov v pochvoobrazuyushchikh porodakh i pochvakh Zapadnoi Sibiri* (Trends of chemical elements distribution in parent rocks and soils of Western Siberia), Novosibirsk: Izdatel'stvo Sibirskogo otdeleniya RAN, 2007, 277 p.
35. Toikka M.A., Perevozchikova E.M., Levkina T.I., Zavarzin A.M., Mikhkiev A.I., Izergina M.M., *Mikroelementy v Karelii* (Trace elements in Karelia), Leningrad: Nauka, 1973, 284 p.
36. Urusevskaya I.S., Soil catenas on denudation plains in the forest-tundra and northern taiga zones of the Kola peninsula, *Eurasian soil science*, 2017, No. 7, Vol. 50, pp. 765–779, DOI: [10.7868/S0032180X17070127](https://doi.org/10.7868/S0032180X17070127).
37. Fedorets N.G., Bakhmet O.N., Solodovnikov A.N., Morozov A.K., *Pochvy Karelii: geokhimicheskii atlas* (Soils of Karelia. Geochemical atlas), Moscow: Nauka, 2008, 46 p.
38. Yashin I.M., Raskatov V.A., Shishov L.L., *Vodnaya migratsiya khimicheskikh elementov v pochvennom pokrove* (Water migration of chemical elements in soil cover), Moscow: MSKhA, 2003, 316 p.
39. Ander E.L., Johnson C.C., Cave M.R.A., Palumbo-Roe B., Nathanael C.P., R. Lark M., Methodology for the determination of normal background concentrations of contaminants in English soil, *Science of the Total Environment*, 2013, Vol. 454–455, pp. 604–618, DOI: [10.1016/j.scitotenv.2013.03.005](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.03.005).
40. Barsova N., Yakimenko O., Tolpeshtha I., Motuzova G., Current state and dynamics of heavy metal soil pollution in Russian Federation. A review, *Environmental Pollution*, 2019, Vol. 249, pp. 200–207, DOI: [10.1016/j.envpol.2019.03.020](https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.03.020).
41. Davydova N.D., Znamenskaya T.I., Lopatkin D.A., Landscape–Geochemical Approach to Solving Problems of Environmental Pollution, *Contemporary Problems of Ecology*, 2014, Vol. 7, Iss. 3, pp. 345–352, DOI: [10.1134/S1995425514030020](https://doi.org/10.1134/S1995425514030020).
42. Evseev A.V., Krasovskaya T.M., Toxic metals in soils of the Russian North, *J. Geochem. Explor.*, 2017, Vol. 174, pp. 128–131, DOI: [10.1016/j.gexplo.2015.05.018](https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2015.05.018).
43. Husson O., Redox potential (Eh) and pH as drivers of soil/plant/microorganism systems: a transdisciplinary overview pointing to integrative opportunities for agronomy, *Plant Soil*, 2013, Vol. 362, Iss. 1–2, pp. 389–417, DOI: [10.1007/s11104-012-1429-7](https://doi.org/10.1007/s11104-012-1429-7).
44. Jarva J., Tarvainen T., Reinikainen J., Eklund M., TAPIR – Finnish national geochemical baseline database, *Sci. Total Environ.*, 2010, Vol. 408, Iss. 20, pp. 4385–4395, DOI: [10.1016/j.scitotenv.2010.06.050](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2010.06.050).
45. Kiikkilä O., Nieminen T. M. Starr M. Mäkilä M., Loukola-Ruskeeniemi K., Ukonmaanaho L., Leaching of dissolved organic carbon and trace

- elements after stem-only and whole-tree clear-cut on boreal peatland, *Water Air Soil Pollut.*, 2014, 225:1767, DOI: [10.1007/s11270-013-1767-y](https://doi.org/10.1007/s11270-013-1767-y).
46. Lado L.R., Hengl T., Reuter H.I., Heavy metals in European soils: a geostatistical analysis of the FOREGS Geochemical database, *Geoderma*, 2008, Vol. 148, Iss. 2, pp. 189–199, DOI: [10.1016/j.geoderma.2008.09.020](https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2008.09.020).
47. Matschullat J., Ottenstein R., Reimann C., Geochemical background – can we calculate it? *Environ. Geol.*, 2000, Vol. 39, pp. 990–1000, DOI: [10.1007/s002549900084](https://doi.org/10.1007/s002549900084).
48. Reimann C., Caritat P., Distinguishing between natural and anthropogenic sources for elements in the environment: regional geochemical surveys versus enrichment factors, *Sci. Total Environ.*, 2005, Vol. 337, Iss. 1–3, pp. 91–107, DOI: [10.1016/j.scitotenv.2004.06.011](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2004.06.011).
49. Reimann C., Garrett R.G., Geochemical background – concept and reality, *Sci. Total Environ.*, 2005, Vol. 350, Iss. 1–3, pp. 12–27, DOI: [10.1016/j.scitotenv.2005.01.047](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2005.01.047).
50. Richardson J.B., Petrenko C.L., Friedland A.J., Base cations and micronutrients in forest soils along three clear-cut chronosequences in the northeastern United States, *Nutr Cycl Agroecosyst*, 2017, Vol. 109, pp. 161–179, DOI: [10.1007/s10705-017-9876-4](https://doi.org/10.1007/s10705-017-9876-4).
51. Rodriguez-Eugenio N., McLaughlin M., Pennock D., *Soil Pollution: a Hidden Reality*. FAO. Rome, 2018, 142 p., DOI: [10.3389/fenvs.2018.00130](https://doi.org/10.3389/fenvs.2018.00130).

УДК 631.4

DOI: 10.19047/0136-1694-2019-100-83-116

Ссылки для цитирования:

Плотникова О.О., Лебедева М.П., Варламов Е.Б., Нухимовская Ю.Д., Шуйская Е.В. Микроморфологическое строение почв полупустынных солонцовых комплексов Прикаспийской низменности под растительными сообществами с участием *Kochia prostrata* // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2019. Вып. 100. С. 83-116. DOI: 10.19047/0136-1694-2019-100-83-116

Cite this article as:

Plotnikova O.O., Lebedeva M.P., Varlamov E. B., Nukhimovskaya Yu. D., Shuyskaya E.V., Micromorphological features of soils of semidesertic solonetzic complexes under different herbaceous communities with the participation of fodder plant *Kochia prostrata* (Caspian lowland), Dokuchaev Soil Bulletin, 2019, V. 100, pp. 83-116, DOI: 10.19047/0136-1694-2019-100-83-116

**Микроморфологическое строение почв
полупустынных солонцовых комплексов
Прикаспийской низменности под
растительными сообществами с участием
*Kochia prostrata***

© 2019 г. О. О. Плотникова^{1*}, М. П. Лебедева^{1**},
Е. Б. Варламов^{1***}, Ю. Д. Нухимовская², Е. В. Шуйская³

¹Почвенный институт им. В.В. Докучаева, Россия,
119017, Москва, Пыжевский пер, 7, стр. 2,

^{*}<https://orcid.org/0000-0002-7719-2915>, e-mail: mrs.plotnikova@mail.ru

^{**}<https://orcid.org/0000-0001-8660-9922>, e-mail: m_verba@mail.ru

^{***}<https://orcid.org/0000-0003-4295-725X>, e-mail: evgheni968@rambler.ru.

²Институт проблем экологии и эволюции им. А.Н. Северцова
Российской академии наук (ИПЭЭ РАН), Россия,
119071, Москва, Ленинский проспект, д. 33.

³Институт физиологии растений им. К.А. Тимирязева РАН, Россия,
127276, Москва, ул. Ботаническая, 35.

Поступила в редакцию 24.07.2019, после доработки 29.08.2019,
принята к публикации 18.12.2019

Резюме: Целью исследования являлось изучение взаимосвязи химических и микроморфологических свойств почв на естественных пастбищах северо-западной части Прикаспийской низменности с произрастанием на них *Kochia prostrata* (прутняк простертый). Было заложено 4 почвенных полужмы (почвы – солонцы светлые и каштановая солонцеватая) с учетом максимальной глубины проникновения основной массы корней изучаемого растения. *K. prostrata* – очень пластичный кормовой вид, который способен произрастать на почвах с широким набором морфологических свойств, разным содержанием солей и их химическим составом. Выявлено, что на фоне практически одинакового содержания гумуса и высокого содержания обменного магния микроморфологические признаки отражают разную степень проявления элементарных почвообразовательных процессов – гумусово-аккумулятивного, выщелачивания легкорастворимых солей, гипсонакопления, окарбоначивания, осолонцевания. Несмотря на различное содержание обменного натрия, во всех почвах присутствуют свежие глинистые или гумусово-глинистые кутаны иллювиирования, свидетельствующие о проявлении современного элювиально-иллювиального перераспределения тонкодисперсного вещества (процесса лессиважа).

Ключевые слова: прутняк, солонцы светлые, каштановая солонцеватая почва, микростроение.

Micromorphological features of soils of semidesertic solonetzic complexes under different herbaceous communities with the participation of fodder plant *Kochia prostrata* (Caspian lowland)

O. O. Plotnikova^{1*}, M. P. Lebedeva^{1}, E. B. Varlamov^{1***},
Yu. D. Nukhimovskaya², E. V. Shuyskaya³**

¹*V.V. Dokuchaev Soil Science Institute,*

7 Bld. 2 Pyzhevskiy per., Moscow 2119017, Russian Federation,

**<https://orcid.org/0000-0002-7719-2915>, e-mail: mrs.plotnikova@mail.ru*

***<https://orcid.org/0001-8660-9922>, e-mail: m_verba@mail.ru*

****<https://orcid.org/0000-0003-4295-725X>, e-mail: evgheni968@rambler.ru.*

²*A.N. Severtsov Institute of Ecology and Evolution,*

33 Leninskiy prosp., Moscow 119071, Russian Federation.

³*Timiryazev Institute of Plant Physiology Russian Academy of Sciences,*

35 Botanicheskaya Str., Moscow 127276, Russian Federation.

Received 24.07.2019, Revised 28.09.2019, Accepted 18.12.2019

Abstract: The aim of the study was to research the relationship of chemical and micromorphological properties of soils with the growth of *Kochia prostrata*. The objects of study were the soils on natural pastures of the North-Western part of the Caspian lowland. It was laid 4 soil pits (soils – light solonetz, solonetzic chestnut) with the maximum penetration depth of the main mass of roots of the studied plants. *K. prostrata* is a very plastic forage species that can grow on soils with a wide range of morphological properties, different salt content and their chemical composition. It is revealed that on the background of almost the same content of humus and high content of exchangeable magnesium micromorphological features represent the different degree of manifestation of primary pedogenic processes – humus accumulation, leaching of soluble salts, gypsum accumulation, carbonate enrichment, solonetization. Despite the different content of exchangeable sodium, in all soils there are fresh clay or humus-clay illuvial coatings, indicating the manifestation of the modern eluvial-illuvial redistribution of fine matter (lessivage or illimerization).

Keywords: *Kochia prostrata*, light solonetz, solonetzic chestnut soil, microfabric.

ВВЕДЕНИЕ

В последние десятилетия в условиях аридизации климата, усиления процессов засоления и ветровой эрозии значительные территории юга России проявляют тенденцию к деградации. В результате нерационального ведения сельского хозяйства, животноводства, использования водных и растительных ресурсов аридные пастбища представляют собой антропогенно-трасформированные ландшафты с запасами кормовой массы ниже их потенциальных возможностей. Аридные территории занимают около 15% площади (более 250 млн га) Российской Федерации. Из общей площади пастбищ России (67.37 млн. га) 73% (более 49 млн га) сосредоточено на аридных территориях ([Шамсутдинов и др., 2005](#); [Зонн и др., 2004](#)).

Kochia prostrata (L.) Schrad (*Bassia prostrata* (L.) A.J. Scott) (прутняк простертый) (семейство Chenopodiaceae) – многолетний ксерогалофит (засухо- и солеустойчивое растение). Он является важным кормовым растением с высокой питательной ценностью, которое поедается всеми видами скота в течение всего сезона ве-

гетации естественных аридных пастбищ и известно как “люцерна” пустыни ([Шамсутдинов и др., 2005](#); [Тодорич и др., 2014](#)). *K. prostrata* обладает широким ареалом и экологической пластичностью, произрастаая в условиях полуаридной и аридной зоны ([Пратов, 1971](#)), и характеризуется значительным генетическим полиморфизмом в Средней Азии ([Шуйская и др., 2001](#)). Несмотря на то, что для полупустынной зоны Северо-Западного Прикаспия изучено экологическое разнообразие *K. prostrata* и определены перспективные экотипы и биотипы для введения в культуру ([Нидюлин, 2013](#)), в настоящее время недостаточно сведений об эдафических факторах, влияющих на произрастание *K. prostrata* в естественных аридных пастбищах ([Рахманкулова и др., 2013](#)).

Цель исследования – изучение взаимосвязи химических и микроморфологических свойств почв на естественных пастбищах северо-западной части Прикаспийской низменности с произрастанием на них *K. prostrata*.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Район исследований расположен на северо-западе заволжской части Прикаспийской низменности, территория которой относится к морской бессточной аккумулятивной равнине хвальинского возраста. Климат изучаемой территории отличает резкая атмосферная засушливость и безводность. Испаряемость доходит до 1000 мм, тогда как среднегодовое количество осадков не превышает 300 мм. В геоморфологическом отношении данная территория характеризуется сочетанием плоской поверхности с редкими сухими руслами, широкими балками и обширными депрессиями – котловинами соленых озер Булухта и Эльтон. Бессточная равнина лежит на высоте 20–25 м над ур. м., отметки уреза озерных котловин располагаются на высоте от +16 м (оз. Булухта) до –16 м (оз. Эльтон). Эти территории характеризуются контрастным почвенным покровом и выраженным мезо- и микрорельефом. Элементы мезорельефа: большие плоские лиманы глубиной до 2 м, площадью иногда больше 1000 га, и плоские понижения – падины глубиной до 1 м и площадью от 2–3 до 200 га. Лиманы заняты корневищно-злаковой растительностью на лугово-каштановых оглеенных почвах и солодах, так как они иногда затапливаются

талыми весенними водами. В падинах развита злаково-разнотравная растительность степного типа на лугово-каштановых или черноземовидных почвах ([Роде, Польский, 1961](#); [Лебедева, Сиземская, 2010](#)). Межпадинная территория района характеризуется комплексным почвенно-растительным покровом, разности которого имеют размеры от единиц до нескольких десятков метров и представлены светлокаштановыми и солонцовыми почвами; растительность на них в настоящее время относится к сообществам опустыненных степей ([Сафронова, 2006](#)), которые бедны по видовому составу, но пространственно очень неоднородны. Основная масса впитывающих корней у изученных видов растений расположена в верхнем слое 50–60 см ([Балян, 1972](#)), поэтому почвенные свойства анализировались на данную глубину.

Растительные сообщества с участием *K. prostrata* подбирались с учетом максимального разнообразия мест его обитаний, но расположенных на выполненных участках без выраженного микрорельефа. Геоботанические описания выбранных сообществ выполнены по общепринятой методике ([Полевая геоботаника, 1964](#); [Работнов, 1992](#)) в 5 местообитаниях. Долю участия видов оценивали по степени проективного покрытия (ПП): для *K. prostrata* и доминантов в % в составе общего проективного покрытия (ОПП), для прочих видов – словесно (часто, редко, рассеянно, единично), если оно незначительно. Результаты ботанических описаний представлены в таблице 1.

Для изучения эдафических факторов, влияющих на произрастание *K. prostrata* в естественных аридных пастбищах, были заложены почвенные полумямы в ботанически описанных местообитаниях. Глубина полумы выбиралась с учетом максимальной глубины проникновения основной массы корней *K. prostrata*. На основании морфологических свойств 4 изученных разрезов названия почвам присваивали по [Полевому определителю почв России \(2008\)](#), морфологические свойства сравниваемых почв представлены в таблице 2. По морфологическим свойствам только разрез 20 можно отнести к каштановой солонцеватой почве, остальные являются солонцами светлыми. Все изученные почвы засоленные, в разной степени карбонатные.

Таблица 1. Объекты исследования – почвы и растительные сообщества северо-западной части Прикаспийской низменности

Table 1. Objects of study – soils and herbaceous communitites of the north-western part of the Caspian lowland

Местонахождение, координаты	Проективно е покрытие <i>Kochia prostrata</i> , %	ОПП, %	Растительные сообщества
15EV18 солонец светлый засоленный корковый карбонатный солончаковый			
Эльтон – верховье р. Хары N 49°25'21.1"; E 46°19'12.9"	30	50	Вострецово-лиственнично-солянково-прутняковое с мятликом луковичным
1EV18 солонец светлый засоленный корковый карбонатный солончаковый			
Пологий склон к Финогенову пруду N 49°23'13.1"; E 46°21'50.9"	30–40	50	Прутняковое
20EV18 каштановая солонцеватая засоленная поверхностно-осветленная карбонатная солончаковатая			
Плакор, между каналом и Финогеновым прудом N 49°23'31.6"; E 46°23'22.8"	40–50	70–80	Лиственнично-солянково-чернополынно-прутняковое
14EV18 солонец светлый засоленный мелкий слабовыщелоченный солончаковый			
Плакор, около кургана N 49°22'09.4"; E 46°15'45.4"	15	70	Прутняково-вострецовое с житняком пустынным

Примечание: ОПП – общее проективное покрытие.

Таблица 2. Морфологические свойства почв северо-западной части Прикаспийской низменности
Table 2. Morphological properties of the soils of the north-western part of the Caspian lowland

Местополо- жение	Эльтон	Финогенов пруд		
	Верховье Хары	В 250 м от Финогенова пруда	Между каналом и Финогеновым прудом	Между Финогено- вым прудом и оз. Булухта около кур- гана
Почва	15EV18 солонец свет- лый засоленный кор- ковый карбонатный солончаковый	1EV18 солонец светлый засолен- ный корковый карбонатный со- лончаковый	20EV18 каштановая солонцева- тая засоленная поверхностно- осветленная карбонатная со- лончаковая	14EV18 солонец светлый засоленный мелкий слабовыше- лоченный солонча- ковый
Показатель	<i>Поверхностные горизонты</i>			
Глубина, см	SEL 0–3	SELs 0–4	AJ 0–5	SEL 0–10
Цвет	Палево-желтоватый, 2,5Y 7/3	Желтовато-палевый, 10YR 8/4	Серовато-палевый, 10YR 7/4	Серовато-палевый, 10YR 7/4
Структура	Слоистая, тонкоче- шуйчатая	Выраженная фрагментами чешуйчатая	Непрочно-комковатая с поро- шистостью	Комковато- порошистая, редкие бусы по кор- ням
Грануломе- трический состав	Пылеват. л.с.	Пылеват. л.с.	Пылеват. л.с. – с.с.	Пылеват. л.с.
Новообразова- ния	Нет	В нижней части кварцевые скелетаны	Нет	Нет

Срединные солонцовые и солонцеватые горизонты				
Глубина/ мощность, см	BSN 3–18 (15)	Состоит из 3 горизонтов BSN 4–18 (14) / [AJ] /sn 18–28 (10) / BSNs 28–44 (16)	BMKsn 5–22 (17)	BSN 10–32 (22)
Цвет	Коричневато-бурый, 10YR 3/4 с белесыми головками, 10YR 5/4	Светло желтовато-бурый, 10YR 6/2/ Темносеро-бурый, 10YR 4/2/ Желтовато-бурый, /	Коричневато-бурый, 10YR 3/4	Желтовато- коричневый, 10YR 5/4
Структура	Тонкие призмы / стол- бики, легко распада- ются на мелкие орехи	Крупно-ореховато-порошистая/ призмовидно-комковато-крупно- ореховатая	В верхней части зернистая, в нижней – уплотненные призмы	Призмовидно- крупно-плитчато- ореховатая
Гранулометри- ческий состав	Пылеват.т.с. – с.с.	Т.с. / Т.с.	Пылеват.т.с. – с.с.	Пылеват. с.с.
Новообразова- ния	Нет	Нет / по угловатым граням отдель- ные блестящие кутаны, по верти- кальным трещинам гумусовые про- красы, единичные марганцевые конкремции 0,1–2 мм/по нижней границе на вертикальных трещинах единичные карбонатные выделения мицелиального вида	Нет	Гумусовые кутаны по магистральной трещине
Наличие вски- пания, его глу- бина, см	Нет	Есть, 28	Есть, 20	Нет

Срединные карбонатно-аккумулятивные горизонты				
Глубина/ мощность, см	Состоит из 2 горизонтов: BCAdc,cs,s 18–27 (9) / BCAdc,cs,s 27–50 (23)	BCAdc,cs,s 44–60 (16)	Состоит из 3 горизонтов: BMd 22–36 (14) / BCAdc 36–48 (12) / BCdc,cs,s 48–70 (22)	BCAnc,s 32–43 (11)
Цвет	Темно бурый, 10YR 4/6 / Желтовато- рыжий, 10YR 6/6	Палево-бурый с кремовыми пятнами, 10YR 6/3	Палево-бурый, 10YR 6/3 / Желтовато-бурый, 10YR 6/6, с большим количеством крупных кремовых пятен / Желтоватый, 10YR 7/6	Буровато-светло рыжий, 10YR 6/4, с кремовыми пятнами
Структура	Крупно-глыбистая, распадается на крупные плитки / уплощенно-глыбистая	Непрочно-ореховато- призматическая	Призмовидно-плитчатая / мелко-ореховатая / непрочно-глыбисто-ореховатая	Непрочно-глыбистая
Гранулометрический состав	T.с. – с.с.	T.с.	T.с. / с.с. / с.с.	C.с.
Новообразования	Нет / Многочисленные соловые – точки, тонкие прожилки, диффузные пятна	на отдельностях граней прожилки и белоглазка карбонатов, гипса, солей, единичные глинистые кутаны	Диффузные карбонатные пятна / Большие диффузные карбонатные пятна, мощные гумусовые кутаны по ходам корней и гумусовые микрокамеры, внизу белые соли / Обилие гипсовых скоплений, мощных кутан на гранях агрегатов	Мелкая белоглазка, матовые гумусовые кутаны по трещинам и граням
Наличие вскипания, его глубина, см	Есть, 18	Есть	Есть	Есть, 32

Примечание: пылеват. – пылеватый, л.с. – легкий суглинок, с.с. – средний суглинок, т.с. – тяжелый суглинок.

Исходная индексация разрезов представлена в таблицах, в тексте для краткости будут использованы только номера разрезов.

Из почвенных образцов ненарушенного строения М.А. Лебедевым (Почвенный институт им. В.В. Докучаева) были изготовлены шлифы. В дальнейшем шлифы изучались микроморфологическим методом с помощью поляризационного микроскопа Olympus BX51 с цифровой камерой Olympus DP26 и программным обеспечением Stream Basic Центра коллективного пользования научным оборудованием “Функции и свойства почв и почвенного покрова” Почвенного института им. В.В. Докучаева.

Химические анализы почв были проведены ИЛЦ ФГБНУ “Почвенный институт им. В.В. Докучаева”. Анализ водной вытяжки проведен по ГОСТ 26428-85, определение емкости катионного обмена – по ГОСТ 17.4.4.01-84, содержание обменных катионов определено по Шолленбергеру ([Руководство.... 1990](#)).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Особенности химического состава изученных почв

Результаты исследования химического состава изученных почв представлены в таблице 3. По содержанию гумуса в верхнем горизонте все изученные почвы приблизительно одинаковы, наибольшее содержание в гор. AJ разр. 20 (2.4%), наименьшее – в гор. SEL разр. 1 (1.73%). При этом в срединных горизонтах всех почв, кроме солонца светлого коркового (разр. 15), содержание гумуса меньше, чем в верхних горизонтах. Содержание CO_2 карбонатов в карбонатно-аккумулятивных (в поле – вскипающих от 10% HCl) горизонтах всех почв примерно одинаковое и составляет около 4%. Немного пониженным содержанием CO_2 карбонатов характеризуются горизонты ВМ и ВСА разреза 20 – оно составляет 2.3 и 3.3% соответственно. Значения pH изученных почв находятся в диапазоне от слабощелочного до щелочного. Самые высокие значения pH имеют горизонт ВСА разр. 14 (pH = 9.4), горизонт ВМ разр. 20 и нижняя часть солонцовой толщи разр. 1 (pH = 9.1 в обоих случаях). Во всех почвах отмечается тенденция повышения pH с увеличением глубины.

Изученные нами солонцы характеризуются в целом низкими значениями ЕКО, от 8.54 ммоль(+)/100 г в гор. SEL разр. 1 до

17.04 ммоль(+)/100 г в горизонте ВМ разр. 20. Вообще все горизонты разреза 20 имеют более высокие значения ЕКО по сравнению с остальными разрезами. Общая закономерность распределения вклада обменных катионов в ЕКО такова: наименьшую долю имеет калий (до 10.8% – гор. AJ разр. 1), несколько большую – натрий (до 34.8% – второй гор. ВСА разр. 15), магний и кальций делят лидирующие позиции (до 71.9% в толще BSN + [AJ] разр. 1 и до 75.8% в гор. BSN разр. 14 соответственно). В целом выражена тенденция преобладания доли магния над всеми остальными обменными катионами в ЕКО.

В трех изученных почвах верхние и срединные горизонты характеризуются отсутствием засоления, кроме солонца светлого разр. 1. Степень засоления в этих почвах проявляется по-разному, различается и химизм засоления. Наименее засолена почва разр. 20, которая диагностирована нами как каштановая солонцеватая почва (табл. 3), здесь слабое хлоридно-сульфатно-магниевое засоление проявляется лишь в нижнем горизонте (ВС, 48–70 см). На этом участке проективное покрытие *K. prostrata* самое высокое. Наиболее засоленным можно считать солонец светлый корковый, вскрытый в верховье р. Хары близ оз. Эльтон (разр. 15), так как здесь сильная степень хлоридного засоления проявляется уже на глубине 27 см в верхнем карбонатно-аккумулятивном горизонте. Поскольку проективное покрытие *K. prostrata* на этой точке не является наименьшим, можно считать, что такое высокое хлоридное засоление не оказывает существенного негативного влияния на это кормовое растение (табл. 1).

Изученные нами почвы отличаются большим разнообразием *микроморфологических свойств*, таких как микроструктура, микроорганизация токодисперсного вещества (ТДВ), состав и содержание гумуса, элементарное микростроение, наличие и состав новообразований. Однако есть и общие характеристики: 1) наличие глинистых кутан; 2) присутствие во всех почвах микроскопических углефицированных растительных остатков, имеющих размеры первых десятков микрометров; 3) в минералогическом составе всех изученных почв во фракции песка преобладают кварц и полевые шпаты, во фракции крупной и средней пыли встречаются

Таблица 3. Химические свойства изученных почв северо-западной части Прикаспийской низменности
Table 3. Chemical properties of the studied soils of the north-western part of the Caspian lowland

Глу- бина, см	Гумус, %	CO ₂ карбо- натов, %	pH	Обменные катионы, вклад в ЕКО, %				ЕКО- эфф., ммоль(+) /100 г	Σ токс. солей, %	Cl/SO ₄ токс.	Степень засоления, химизм
				Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺				
15EV18 солонец светлый корковый солончаковый											
0–3	1.8	Нет	7.5	49	35.7	7.2	8	8.97	0.1	0.18	Нет
3–18	1.97	Нет	8.5	35.4	47.2	15.7	1.6	10.17	0.1	0.34	Нет
18–27	Не опр.	Нет	9.1	33.6	43.9	21.8	0.7	15.48	0.5	2.37	Сильная, Cl ⁻ – Na ⁺ с участием соды
27–50	Не опр.	4.31	8.7	16.1	48.2	34.8	0.9	14.93	1.3	1.06	Очень сильная, SO ₄ ²⁻ – Cl ⁻ – Mg ²⁺ – Na ⁺ с гипсом
1EV18 солонец светлый корковый солончаковый											
0–4	1.73	Нет	7.7	46.8	42.2	0.2	10.8	8.54	0.2	0.05	Слабая, SO ₄ ²⁻ – Mg ²⁺ – Na ⁺
4–17	1.36	Нет	8	42.6	53.2	2	2.2	11.27	0.1	0.3	Нет
17–28	1.14	Нет	8.6	17.3	71.9	10.2	0.6	13.9	0.1	1.45	Слабая, SO ₄ ²⁻ – Cl ⁻ – Mg ²⁺ – Na ⁺ с участием соды

28–44	Не опр.	4.1	9.1	48.6	35.6	15.1	0.7	12.35	0.4	0.69	Сильная, $\text{Cl}^- - \text{Na}^+$ с участием соды
44–60	Не опр.	4.0	8.7	37.6	47.8	13.9	0.7	11.7	1.0	0.96	Сильная, $\text{Cl}^- - \text{SO}_4^{2-} -$ $\text{Mg}^{2+} - \text{Na}^+$
20EV18 каштановая солонцеватая солончаковатая											
0–5	2.4	Нет	7.5	47.5	43.2	6.2	3.0	9.26	0	0.21	Нет
5–22	1.49	0.1	8.3	44.8	47.8	0.2	7.3	13.4	0.1	0.17	Нет
22–36	0.61	2.3	8.7	58.7	37.6	2.7	1.0	17.04	0.1	0.31	Нет
36–48	Не опр.	3.3	8.4	46.5	49	3.6	0.9	16.33	0	4.96	Нет
48–65	Не опр.	4.1	8.1	77.4	19.4	1.1	2.1	18.59	0.3	0.27	Слабая, $\text{Cl}^- -$ $\text{SO}_4^{2-} - \text{Mg}^{2+}$
14EV18 солонец светлый мелкий солончаковатый											
0–10	2	Нет	7.8	26.9	67.3	1.8	4	8.92	0.1	0.25	Нет
10–30	1.82	Нет	8.7	75.8	12.6	7.5	4.1	12.67	0.1	0.14	Нет
35–45	Не опр.	3.96	9.4	51.4	37.7	8.7	2.3	11.68	0.2	0.12	Слабая, SO_4^{2-} содовый $\text{Mg}^{2+} - \text{Na}^+$

Примечание: химизм и степень засоления определяли согласно монографии [Засоленные почвы России \(2006\)](#).

также глауконит и эпидот-циозиты, пироксены, реже амфиболы, мусковит; 4) при появлении карбонатных горизонтов с микритовыми новообразованиями (преимущественно пропиткой) в профиле встречаются в том или ином количестве обломки раковин моллюсков.

Разнообразие микроморфологических признаков поверхностных горизонтов

Поверхностные горизонты, за исключением разр. 20, в котором выявлен гор. AJ, представлены горизонтами SEL. Мощность поверхностных горизонтов увеличивается в ряду: разр. 15 – разр. 1, разр. 20 – разр. 14. При этом она примерно одинакова в разр. 1, 15, 20 и только в разр. 14 увеличивается в гор. AJ до 10 см. Все надсолонцевые горизонты изученных почв характеризуются наличием тонкого песка, которого ниже практически нет. В ряде разрезов (1, 14 – слабо, а в 15 – сильно) выражена кольцевая сепарация тонкого песка и крупной пыли (рис. 1) и присутствуют плотные тонкопылеватые инфильтринги в порах (рис. 2).

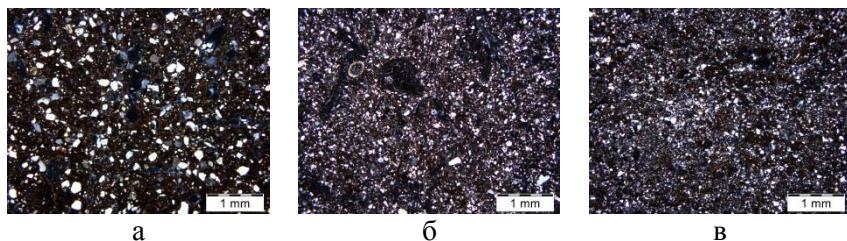


Рис. 1. Криогенная сепарация скелетных зерен в горизонтах SEL (XN): **а** – разр. 1 (0–4 см); **б** – разр. 14 (0–10 см); **в** – разр. 15 (0–3 см).

Fig. 1. Cryogenic separation of skeletal grains in horizons SEL (XN): **a** – pit 1 (0–4 cm); **б** – pit 14 (0–10 cm); **в** – pit 15 (0–3 cm).

Гор. SEL солонца коркового (разр. 15) характеризуется типичной для этого генетического горизонта чешуйчато-порошистой микроструктурой ([Лебедева и др., 2016](#); [Lebedeva et al., 2018](#)), преобладанием в составе органического вещества растительных остатков мха и лишайников, очень малым содержанием гумуса в виде пунктуаций.

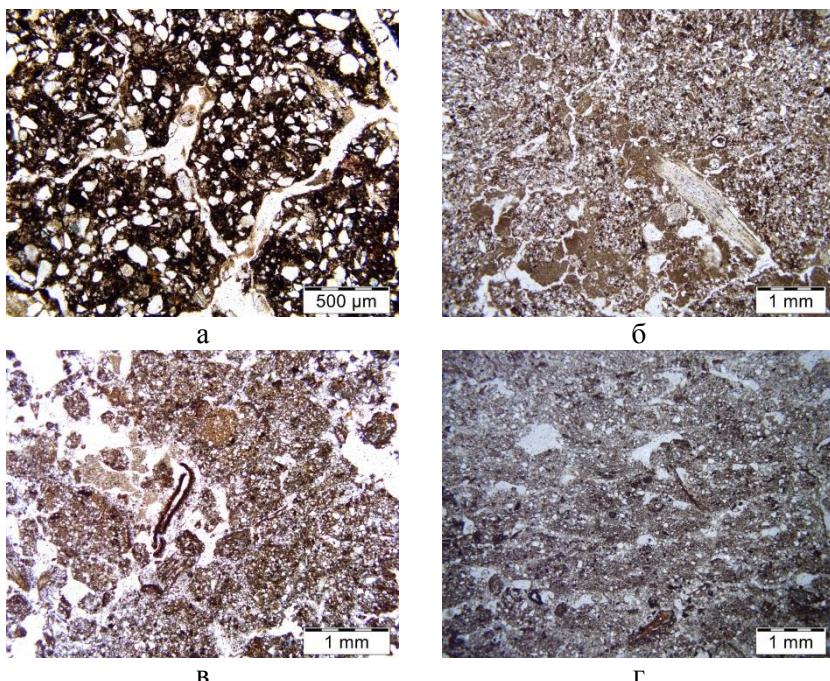


Рис. 2. Пылеватые инфиллинги в порах (IIN): **а** – тонкие тонкопылеватые в горизонте [AJsn] разр. 1 (22–28 см); **б** – мощные тонкопылеватые в горизонте SEL разр. 14 (0–10 см); **в** – фрагментарные тонкопылеватые в горизонте AJ разр. 20 (0–5 см); **г** – крупнопылеватые в порах между линзовидными агрегатами в горизонте SEL разр. 15 (0–3 см).

Fig 2. Silty infillings in pores (IIN): **а** – thin infillings of fine silt in horizon [AJsn] of the pit 1 (22–28 cm); **б** – thick infillings of fine silt in horizon SEL of the pit 14 (0–10 cm); **в** – fragmental infillings of fine silt in horizon AJ of the pit 20 (0–5 cm); **г** – infillings of coarse silt in pores between lenticular aggregates in horizon SEL of the pit 15 (0–3 cm).

Крупнопылеватых инфиллингов очень много, они заполняют примерно 50% межагрегатных пор, но являются признаком криогенной сепарации, а не иллювиирования частиц (рис. 2г). Горизонты SEL остальных солонцов имеют различные микроструктуры, которые имеют разный генезис: в разр. 1 – округло-блоковую, в разр. 14 – неоднородную лёссовидную с микрозонами комковатых агрегатов.

гатов (от 200 до 100 мкм). В разр. 1 отмечены единичные глинистые кутаны по растительным остаткам.

Микростроение гор. SEL разр 14 неоднородное: на фоне глинистой анизотропной плазмы отмечено больше всего практически изотропных гумусово-глинистых зон. В составе органического вещества преобладают корневые растительные остатки, гумуса меньше. Плотные тонкопылеватые инфильтринги занимают до 40% межагрегатных пор (рис. 2б).

В разр. 20 гор. AJ имеет особые элементы микростроения. Кроме комковатой структуры здесь отмечены микрозоны с более высоким двулучепреломлением за счет гумусово-глинистого ТДВ. По-видимому, оно является следом ассилированных агрегатов нижележащего осолонцованного горизонта. На поверхностях некоторых агрегатов встречаются обезыленные зоны. В составе органического вещества горизонта встречаются крупные средне разложившиеся углефицированные и ожелезненные растительные остатки. Отмечены копролиты. Единично отмечены “старые” ассилированные во внутрипедную массу глинистые кутаны.

Разнообразие микроморфологических признаков срединных горизонтов.

Срединные солонцовые и солонцеватые горизонты

Тенденция увеличения мощности горизонта с признаками осолонцевания в ряду почв разрезов 15, 1, 20, 14 в общем сохраняется, однако из нее выбивается разр. 1, заложенный вблизи Финогенова пруда. Здесь в толще солонцового горизонта был обнаружен погребенный гумусовый гор. AJ (18–28 см), образовавшийся вследствие трехъярусной вспашки, имевшей место на этой территории в 2004 г., и последующего орошения в течение 3 лет (устное сообщение главы местной администрации Егорова А.Г.). Поскольку вспашка продолжалась недолго, погребенная толща не успела перемешаться с общей массой солонцового горизонта, осталась выраженной даже на макроуровне (табл. 2). На макроуровне она демонстрирует признаки ассилияции: множество тонкопылевато-гумусовых инфильтрингов; неоднородное распределение ТДВ – есть зоны гумусированные и гумусово-глинистые. В гумусированных зонах гумус черный в форме равномерных про-

питок (рис. 3), в более глинистых зонах встречаются глинистые пленки по скелетным зернам и микритовые стяжения, единичные однородные Fe-Mn нодулы до 100 мкм. Также во вмещающей массе этого горизонта встречаются фрагменты глины (рис. 3).

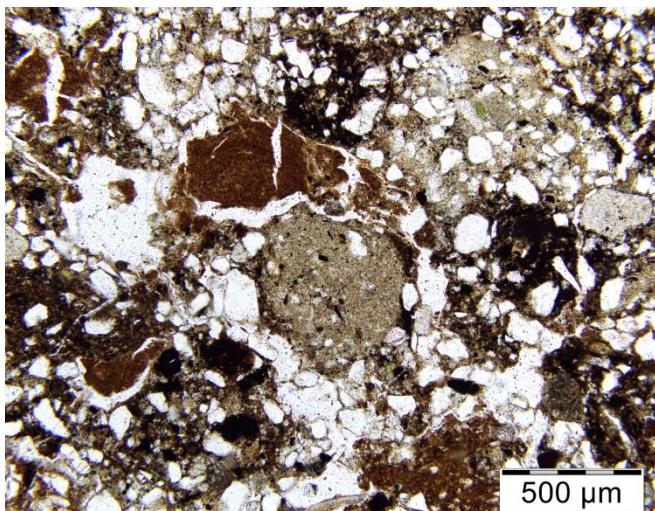


Рис. 3. Особенности микростроения горизонта [AJsn] разр. 1 (18–28 см) – черные гумусовые пропитки, тонкопылеватый инфиллинг, фрагменты коричневой (шоколадной) глины (IIN).

Fig .3. Specific features of the horizon [AJsn] of the pit 1 (18–28 cm) – black humus impregnations, fine-silt infilling, fragments of brown (chocolate) clay (IIN).

Две толщи солонцового горизонта разр. 1, разделенные по-гребенным гумусовым горизонтом, по микростроению весьма схожи. Верхняя часть гор. BSN (4–18 см) отличается наличием бурого гумуса в составе ТДВ, обилием тонкопылеватых инфиллингов, глинисто-гумусовых кутан, приуроченных к сильно разложившимся растительным остаткам (рис. 4а), обилием экскрементов почвенной микрофлоры в межагрегатных порах. В нижней части гор. BSN разр. 1 (28–44 см) тонкодисперсное вещество глинистое, гумуса в нем нет, среди новообразований меньше тонко-

пылеватых инфильтингов, отсутствуют глинисто-гумусовые кутаны, но множество глинистых кутан и стресс-кутан (рис. 4б).

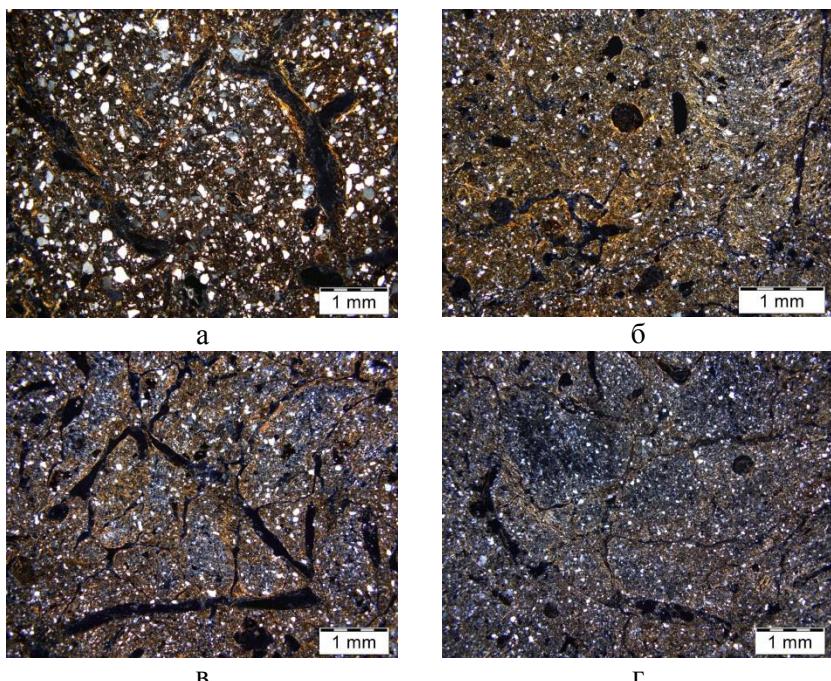


Рис. 4. Солонцовые и солонцеватые горизонты изученных почв (ХН): **а** – горизонт BSN разр. 1 (16–22 см); **б** – горизонт BSN разр. 1 (28–44 см); **в** – горизонт BSN разр. 15 (3–18 см); **г** – горизонт BMKsn разр. 20 (5–22 см).

Fig. 4. Solonetzic and solonetz-like horizons of the studied soils(XN): **a** – BSN of the pit 1 (16–22 cm); **б** – BSN of the pit 1 (28–44 cm); **в** – BSN of the pit 15 (3–18 cm); **г** – BMKsn of the pit 20 (5–22 cm).

Особенностями солонцового горизонта разр. 15 являются: наличие отдельных зон биогенной переработки, где имеются пропитки и пунктуации бурого гумуса; наличие единичных крупных углефицированных растительных остатков (до 500 мкм). Глинистые кутаны здесь имеют четкие границы с вмещающей массой (рис. 4в).

Солонцовый горизонт разр. 14 характеризуется комковато-округло-блоковой структурой, средним количеством растительных остатков, практически полным отсутствием светло-бурого гумуса в составе ТДВ, наличием копролитов, экскрементов микрофагуны, выраженной кольцевой сепарацией скелетных зерен. В порах отмечены отдельные тонкопылеватые инфильтринги. Особенность этого солонцового горизонта – наличие микритовых стяжений с диффузными границами и обломки ракушек.

В горизонте BMKsn разр. 20 нет микропризнаков гумуса, мало растительных остатков, но много следов деятельности почвенной микрофагуны. Особенностью глинистых кутан этого горизонта является их наличие на агрегатах, внутрипедный материал которых представлен пылеватым материалом с очень низким содержанием глины (рис. 4г).

Срединные карбонатно-аккумулятивные горизонты и переходные к породе гипс-содержащие

Все подсолонцовые горизонты характеризуются появлением микритовой пропитки глинистого материала, которая только для разр. 20 имеет микрозональное распределение, в остальных разрезах она интенсивная и сплошная (рис. 5). Микроморфологически выраженные карбонатные стяжения (рыхлые и/или с плотными границами – микробелоглазка) выражены только в разр. 14 и 20, примерно с одной и той же глубины (32–36 см) (рис. 5, табл. 4).

В трех из четырех изученных почв микроморфологически диагностируются гипсовые новообразования (рис. 5, табл. 4). Максимально высокое в профиле появление гипсовых аккумуляций в порах – инфильтрингов – отмечено в подсолонцовом горизонте разр. 15 (18–27 см). В солонце (разр. 1) и в каштановой солонцеватой почве (разр. 20) гипсовые новообразования выражены глубже, примерно с одной и той же глубины (44–48 см). Они представлены преимущественно плотными инфильтрингами из микрокристаллов гипса, имеющих неправильную форму (рис. 6). В разр. 1 и 15 встречаются и более крупные (до 500 мкм) кристаллы. В разр. 14 предполагаем более глубокое появление гипсовых новообразований, на момент исследования они не были вскрыты.

Таблица 4. Микроморфологические признаки изученных почв северо-западной части Прикаспийской низменности

Table 4. Micromorphological features of the studied soils of the north-western part of the Caspian lowland

Горизонт	Глуби-на, см	Структура	Органическое вещество	Состав ТДВ	Новообразования		Элементар-ное микро-строение
					(вид/кол-во)		
1	2	3	4	5	6	7	
разрез 15 – солонец светлый корковый солончаковый							
SEL	0–3	чешуйчато-порошистая	раст. ост., бурый гумус (пунктуации)	глинистое	глинистые кутаны по зернам / +++, Fe-Mn нодули / +, пылеватые инфиллинги / +++	песчано-плазменный	
BSN	3–18 (А)	округло-блоковая	угли, раст. ост.	гумусово-глинистое	Fe-Mn нодули / +++	песчано-плазменный	
BSN	3–18 (Б)	округло-блоковая / зоны комковатой	угли, бурый гумус (пропитки), раст. ост.	гумусово-глинистое	глинистые кутаны / +++, Fe-Mn нодули / ++	песчано-плазменный	
BCAdc,cs,s	18–27	гранулярная	-	глинисто-карбонатное	карбонатные стяжения / +++, гипсовые инфиллинги / +++ и гипсовые кристаллы / +++, пылеватые инфиллинги / +++	пылевато-плазменный	

1	2	3	4	5	6	7
BCAdc,cs,s	27–50	гранулярная	-	глинисто-карбонатное	гипсовые инфильтринги / +++ и гипсовые кристаллы / +++, пылеватые инфильтринги / ++	пылевато-плазменный
разрез 1 – солонец светлый корковый солончаковатый						
SELs	0–4	округло-блоковая	бурый гумус (пунктуации + сгустки)	глинисто-гумусовое / гумусово-глинистое	глинистые кутаны по зернам и раст. ост. / ±, Fe-Mn нодули / +	пылевато-песчано-плазменный
BSN	16–22	угловато-блоковая	раст. ост., бурый гумус (сгустки)	глинисто-гумусовое	глинистые кутаны / + и глинисто-гумусовые кутаны / +++, Fe-Mn нодули и стяжения / +	пылевато-песчано-плазменный / пылевато-плазменно-песчаный
[AJ] / sn	18–28	округло-блоковая / угловато-блоковая	черный гумус (пропитки)	гумусово-глинистое / глинисто-гумусовое	глинистые кутаны по зернам +, Fe-Mn нодули / ±	песчано-пылевато-плазменный
BSNs	28–44	угловато-блоковая	раст. ост.	глинистое	глинистые кутаны и стресс-кутаны / +, Fe-Mn нодули / +++	песчано-пылевато-плазменный
BCAdc,cs,s	44–60	угловато-блоковая / округло-блоковая	-	глинисто-карбонатное	гипсовые инфильтринги / ± и гипсовые кристаллы / +, Fe-Mn нодули / +	пылевато-плазменный

1	2	3	4	5	6	7
разрез 20 – каштановая солонцеватая солончаковатая						
AJ	0–5	комковатая	раст.ост., бурый гумус (густки, пунктуации), угли	глинисто-гумусовое / глинистое	Fe-Mn нодули и стяжения / ++, пылеватые инфильтринги / ++	песчано-пылевато-плазменный
BMKsn,	5–22	угловато-блоковая / округло-блоковая	раст.ост.	глинистое	глинистые кутаны / +++, Fe-Mn нодули и дендриты / +++	пылевато-плазменный
BMdc	22–36	массивная / гранулярная	раст.ост.	карбонатно-глинистое	Fe-Mn нодули и стяжения / ++, пылеватые инфильтринги / +++	пылевато-плазменный
BCAdc	36–48	угловато-блоковая / уплотненная гранулярная	раст.ост.	глинисто-карбонатное	карбонатные стяжения / ±, Fe-Mn нодули и дендриты / +, пылеватые инфильтринги / +++	песчано-пылевато-плазменный
BCdc,cs,s	48–65	массивная / гранулярная	-	карбонатно-глинистое	гипсовые инфильтринги / +++, Fe-Mn дендриты / ±, пылеватые инфильтринги / +++	пылевато-плазменный

1	2	3	4	5	6	7
разрез 14 – солонец светлый мелкий солончаковый						
SEL	0–10	гранулярно-комковатая	раст. ост., бурый гумус (сгустки + пунктуации)	гумусово-глинистое	глинистые кутаны по зернам / +, Fe-Mn нодули /±, пылеватые инфильтринги /+++	песчано-плазменный
BSN	10–32	угловато-блоковая	раст. ост., светло-бурый гумус (пунктуации)	глинистое	глинистые кутаны /+++, Fe нодули /±	песчано-плазменный
BCAnc,s	32–43 (А)	комковато-угловато-блоковая	раст. ост.	глинисто-карбонатное	карбонатные стяжения /++, Fe нодули /±	пылевато-плазменный
BCAnc,s	32–43 (Б)	комковато-угловато-блоковая	раст. ост.	глинисто-карбонатное	белоглазка /++, Fe нодули /±	пылевато-плазменный

Примечание: ТДВ – тонкодисперсное вещество; раст. ост. – растительные остатки; угли – обугленные мелкие растительные остатки. Буквами А и Б в круглых скобках обозначены повторности шлифов из образцов одной глубины отбора. Встречаемость микропризнака: ± – единично, + – мало (до 15 штук на шлиф), ++ – среднее количество (15–20 штук на шлиф), +++ – много (более 20 штук на шлиф).

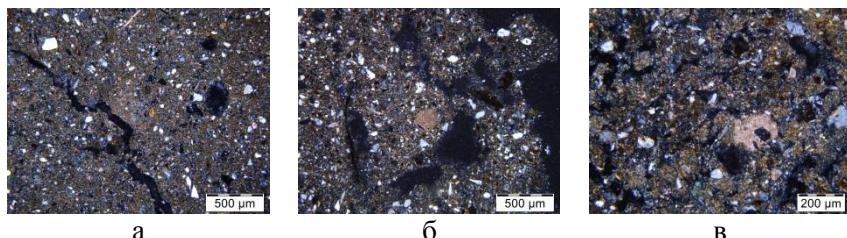


Рис. 5. Особенности микростроения карбонатно-аккумулятивных горизонтов (XN): **а** – микрозональность микритеевой пропитки гор. BCAdc разр. 20 (36–48 см); **б** – микробелоглазка – плотное микритеевое стяжение гор. BCAnc,s разр. 14 (32–43 см); **в** – микробелоглазка гор. BCAdc разр. 20 (36–48 см).

Fig. 5. Specific features of microstructure of the calcareous accumulation horizons (XN): **a** – microzonality of micrite impregnation of the horizon BCAdc (pit 20, 36–48 cm); **б** – micro loess doll – massive micrite nodule in the horizon BCAnc,s (pit 14, 32–43 cm); **в** – micro loess doll in the horizon BCAdc (pit 20, 36–48 cm).

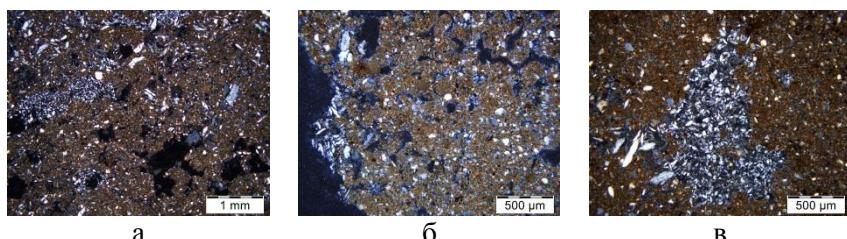


Рис. 6. Гипсовые инфиллинги в порах (XN): **а** – гор. BCAdc,cs,s разр. 15 (27–50 см); **б** – гор. BCAdc,cs,s разр. 1 (44–60 см); **в** – гор. BCdc,cs,s разр. 20 (48–65 см).

Fig. 6. Gypsic infillings in pores (XN) in the horizon: **a** – BCAdc,cs,s (pit 15, 27–50 cm), **б** – BCAdc,cs,s (pit 1, 44–60 cm), **в** – BCdc,cs,s (pit 20, 48–65 cm).

Во всех изученных нижних горизонтах данных почв отмечено присутствие признаков копрогенной агрегированности на фоне преобладания лессовидного материала слабой уплотненности и немногочисленные тонкопылеватые инфиллинги, каковые в большом количестве отмечены в верхних горизонтах.

Железистые и железо-марганцевые новообразования в изученных почвах представлены в основном плотными микронодулями, имеющими размер до 100 микрон. Причем в разр. 15 они железо-марганцевые и есть только в поверхностном и солонцовом горизонте (здесь они крупнее и чаще встречаются), а в разр. 14 они есть как чисто железистые, так и железисто-марганцевые, но встречаются при этом единично во всех горизонтах. Более интересная картина наблюдается в солонце разр. 1 и каштановой почве разр. 20. В обоих случаях встречаются железо-марганцево-органические дендриты, но в разр. 1 они мелкие (до 150 мкм) и отмечены только в нижней толще солонцового горизонта. В каштановой солонцеватой почве разр. 20 дендриты более крупные, в гор. ВМК до 300, а в ВСА и ВС – даже до 500 мкм (но в гор. ВС они уже без органики в составе). В целом этот разрез отличается наибольшим разнообразием новообразований железисто-марганцевого состава. Здесь также присутствуют железо-марганцевые с включениями скелетных зерен и чисто железистые микронодули.

Включения обломков раковин моллюсков встречаются во всех изученных почвах и приурочены в основном к карбонатно-аккумулятивным горизонтам. В разр. 15 они встречаются единично.

Включения мелких обломков коричневой глины (предположительно шоколадной ([Свиточ и др., 2017](#))) были отмечены в погребенной толще гор. AJ коркового солонца разр. 1 и в переходном к породе горизонте каштановой солонцеватой почвы разр. 20. По мнению авторов, обнаружение обломков глины в погребенной толще гор. AJ разр. 1 является результатом деятельности почвенной мезофауны.

Зерна глауконита встречаются во всех изученных почвах, их размеры составляют до 50–100 мкм. Основная тенденция – этот минерал встречается чаще в переходных к породе горизонтах. В поверхностных горизонтах разр. 15 и 1 их мало, в разр. 20 и 14 – среднее количество. Выделяется на общем фоне разр. 20 – здесь по всему профилю вплоть до переходного к породе горизонта зерна глауконита относительно мелкие – до 50 мкм, только в нижнем горизонте их размер увеличивается до 100 мкм. При этом в дан-

ном разрезе нет явного увеличения частоты встречаемости этого минерала с увеличением глубины.

Согласно результатам микроморфологического исследования почв Северо-Западного Прикаспия, на которых произрастает *K. prostrata*, все эти почвы обладают выраженной слоистостью по составу ТДВ и распределению новообразований: глинистых, карбонатных, гипсовых, железисто-марганцевых (табл. 4). Часто появление в составе глинистого ТДВ повышенной доли карбонатной плазмы сопутствует появлению карбонатных новообразований и обломков ракушек. Преобладание в составе ТДВ глинистого вещества чаще всего соответствует обнаружению и глинистых новообразований в таких горизонтах (пленок на скелетных зернах, кутан, гипо- и стресс-кутан на поверхностях агрегатов и в порах). Различия в химических и микроморфологических свойствах связаны с разными режимами, растительностью и эволюцией почв, образующих полупустынные солонцовые комплексы ([Роде, Польский, 1961](#)).

Слоистость отложений, по мнению авторов, диагностируется появлением обломков ракушек из арагонита (устойчивого к растворению минерала группы карбонатов), которые практически всегда связаны с карбонатным горизонтом с интенсивной микривальной пропиткой.

Особенностью изученного ряда почв является низкое значение ЕКО и очень высокое содержание обменного магния (табл. 3), что характерно для почв, развитых на морских хвальинских отложениях данного региона ([Роде, Польский, 1961](#)). Относительно высокая доля обменного натрия отмечена только в разр. 1 и 15, что соответствует критерию химического осолонцевания этих почв. Тем не менее микропризнаки подвижности глины с образованием кутан иллювирирования отмечены для всех почв (табл. 4), что определяется, вероятно, высоким содержанием обменного магния (магниевым осолонцеванием). Все изученные солонцы имеют примерно одинаковое содержание гумуса, каштановая солонцеватая отличается несколько более высокими значениями (табл. 3).

В ряду сравниваемых почв каштановая солонцеватая почва (разр. 20) отличается сочетанием микропризнаков, связанных с

почвообразовательными процессами, обеспечивающими наиболее высокое плодородие почв. Это более интенсивный гумусоаккумулятивный процесс (максимально высокое содержание гумуса, биогенная агрегированность, высокая межагрегатная пористость), наибольшая промытость от солей (появление слабого засоления только глубже 48 см). Проявление на этой глубине признаков гидроморфизма (наличие большого количества дендроидных Fe-Mn новообразований), вероятно, связано с подъемом уровня грунтовых вод из-за близости канала, в прошлом заполненного водой (сейчас сухого). Максимальное уплотнение лёссовидного материала нижних горизонтов с образованием плотных гипсовых инфильтингов произошло за счет выщелачивания легкорастворимых солей, но с остаточным современным гипсонакоплением, поскольку гипс является более трудно растворимой солью. На микроуровне морские шоколадные моноглинистые слои имеют отчетливые кристаллооптические свойства ([Lebedeva et al., 2018](#)) Появление в нижнем горизонте разреза 20 обломков этих шоколадных глин позволяет предположить, что они входят в состав неглубоко залегающей подстилающей породы данной почвы.

Солонец разр. 1 (на очень пологом склоне недалеко у Финогенова пруда) среди изученных почв выделяется наличием признаков агрогенеза – появлением темноцветного гумусового горизонта внутри солонцовой толщи, что, очевидно, связано с проведением трехъярусной вспашки и кратковременным орошением. В результате орошения в этом слое растительные остатки в восстановительных условиях углефицировались, что привело к появлению гумусовых новообразований, имеющих черную окраску (рис. 3). Другие микропризнаки не претерпели существенных изменений за столь короткий срок. Почва характеризуется слабым выщелачиванием солей с глубиной и наличием свежих глинистых кутан иллювирирования, которые особо видны на фоне темноцветного погребенного гумусового горизонта (рис. 4а, 4б). В этом разрезе также диагностированы мелкие обрывки шоколадной глины в погребенной толще, которые, по-видимому, занесены туда почвенной мезофауной.

Солонец разр. 14 занимает промежуточное положение по гумусированности и микроагрегированности в горизонтах SEL и

BSN между каштановой солонцеватой почвой разр. 20 и солонцом разр. 15. В последнем максимально выражены микропризнаки элювиально-иллювиального перераспределения глинистого вещества с образованием типичного тонкочешуйчатого пылеватого надсолонцового горизонта ([Лебедева, Герасимова, 2009](#)).

Практически для всех солонцовых горизонтов, несмотря на выраженность глинистых кутан ([Ярилова, 1966](#)), характерна смена типичной угловато-блоковой структуры на округло-блоковую, копротенную ([Лебедева, Конюшкова, 2011](#)), что связано с увеличением количества осадков в последние годы и активизацией деятельности почвенной мезофауны. Согласно исследованиям последних лет, начиная с конца 1970-х годов на юго-востоке Европейской России наблюдается увеличение увлажненности климата ([Сапанов, 2007](#); [Сапанов, Сиземская, 2015](#)). Порядок величин, характеризующих эти изменения, невелик: осадки увеличились на 50 мм, испаряемость за теплый период уменьшилась на 70 мм, однако, как известно, аридные и субаридные ландшафты очень чувствительны к таким изменениям. Для всех почв на всю изученную глубину характерны свежие пылеватые инфильтринги разной мощности и глинистые кутаны по остаткам растительных корней (рис. 2, 4). Все это свидетельствует об активных современных процессах иллювиирования ТДВ после весеннего снеготаяния.

Для того чтобы связать свойства изученных почв с произрастанием на них *K. prostrata*, была составлена таблица (табл. 5). В ней показано, что в ряду разрезов: 14, 15, 1, 20, – увеличивается проективное покрытие *K. prostrata*. В таком же ряду отмечаются следующие тенденции изменения почвенных свойств: 1) увеличение глубины обнаружения гипса на микроуровне; 2) уменьшение интенсивности проявления солонцового процесса, которое выражается в количестве глинистых кутан иллювиирования; 3) уменьшение глубины появления первого относительного для разреза максимума содержания обменного натрия; 4) увеличение глубины появления первого максимума содержания обменного магния. Для объяснения выявленных трендов необходимы дальнейшие углубленные исследования свойств почв и химического состава растений *K. prostrata*, произрастающих на них.

Таблица 5. Схема взаимосвязей проективного покрытия *Kochia prostrata* и почвенных свойств

Table 5. The diagram of interactions between the projective cover of *Kochia prostrata* and soil properties

Номер участка	14EV18	15EV18	1EV18	20EV18
Проективное покрытие <i>Kochia prostrata</i> , %	15 →	30 →	30–40 →	40–50
Количество зрелых глинистых кутан	++++ ←	+++ ←	++ ←	+
Средняя глубина 1-го max Na, см	40 ←	38.5 ←	36 ←	2.5
Средняя глубина 1-го max Mg, см	5 →	10.5 →	22.5 →	42

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Kochia prostrata – очень пластичный кормовой вид, который способен произрастать на почвах с широким набором морфологических свойств, разным содержанием солей и их химическим составом. На фоне практически одинакового содержания гумуса и высокого содержания обменного магния микроморфологические признаки отражают разную степень проявления элементарных почвообразовательных процессов – гумусово-аккумулятивного, выщелачивания легкорастворимых солей, гипсонакопления, окарбоначивания, осолонцевания.

Несмотря на различное содержание обменного натрия, во всех почвах присутствуют свежие глинистые или гумусово-глинистые кутаны иллювиирования, свидетельствующие о проявлении современного элювиально-иллювиального перераспределения тонкодисперсного вещества (процесса лёссиважа).

Результаты, полученные, при изучении микроморфологических и химических свойств почв солонцовых сухостепных комплексов северо-западной части Прикаспийской низменности, позволяют предполагать, что присутствие в растительном сообществе *K. prostrata* можно рассматривать как признак наличия современного лёссиважа в почвах данной территории при полевых исследованиях. В дальнейшем это предположение будет проверяться на

большем количестве разрезов для статистической оценки проявления процесса иллювирирования глины в почвах на микроуровне при наличии в растительном сообществе *Kochia prostrata*.

БЛАГОДАРНОСТЬ

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект № 18-016-00129 А), Президиума РАН по гранту в рамках Программы фундаментальных научных исследований государственных академий наук на 2013–2020 гг.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Балян Г.А. Прутняк простертый и его культура в Киргизии. Фрунзе: Кыргызстан, 1972. 263 с.
2. Засоленные почвы России / Отв. Редакторы Л.Л. Шишов, Е.И. Панкова. М.: ИКЦ “Академкнига”, 2006. 854 с.
3. Зонн И.С., Трофимов И.А., Шамсутдинов Н.З., Шамсутдинов З.Ш. Земельные ресурсы аридных территорий России // Аридные экосистемы. 2004. Т. 10. № 22/23. С. 87–102.
4. Лебедева (Верба) М.П., Герасимова М.И. Макро- и микроморфологические особенности генетических горизонтов почв солонцового комплекса Джаныбекского стационара // Почвоведение. 2009. № 3. С. 259–272.
5. Лебедева М.П., Конюшкова М.В. Временные изменения микропризнаков в целинных и мелиорированных солонцах Джаныбекского стационара // Почвоведение. 2011. № 7. С. 818–831.
6. Лебедева М.П., Конюшкова М.В., Колесников А.В., Хохлов С.Ф. Мониторинг изменений свойств целинного солонца Джаныбекского стационара по данным микроморфологических исследований // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2016. Вып. 83. С. 118–139. DOI: [10.19047/0136-1694-2016-83-118-139](https://doi.org/10.19047/0136-1694-2016-83-118-139).
7. Лебедева (Верба) М.П., Сиземская М.Л. Анализ микростроения мелиорированных солонцов Джаныбекского стационара для оценки их экологического состояния // Поволжский журнал. 2010. № 2. С. 166–176.
8. Нидюлин В.Н. Экологическое и биологическое разнообразие кохии простертый (*Kochia prostrata* (L.) Schrad.) и его использование для селекции в аридных районах северо-западного Прикаспия: Автoref. дис. ... канд. с.-х. наук. Санкт-Петербург, 2013. 21 с.
9. Полевая геоботаника. 1964. Т. 3. М.-Л.: Наука, 264 с.
10. Полевой определитель почв России. М.: Почвенный ин-т им.

В.В. Докучаева, 2008. 182 с.

11. *Пратов У.* Вопросы внутривидовой систематики *Kochia prostrata* (L.) Schrad. // Изень. Ташкент: Фан, 1971. С. 3–5.
12. *Работнов Т.А.* Фитоценология. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1992. 351 с.
13. *Рахманкулова З.Ф., Шуйская Е.В., Рогожникова Е.С.* Влияние дефицита воды на функции митохондрий и полиморфизм ферментов дыхания у растений // Журнал общей биологии. 2013. № 3. С. 167–179.
14. *Роде А.А., Польский М.Н.* Почвы Джаныбекского стационара, их морфологическое строение, механический и химический состав и физические свойства // Почвы полупустыни северо-западного Прикаспия и их мелиорация. Труды Почвенного института им. В.В. Докучаева АН СССР. М.: Издательство АН СССР. 1961. Т. 56. С. 3–214.
15. Руководство по лабораторным методам исследования ионно-солевого состава нейтральных и щелочных минеральных почв. М.: ВАСХНИЛ, Почвенный ин-т им. В.В. Докучаева, 1990. 235 с.
16. *Сапанов М.К.* Синхронность изменения уровней Каспийского моря и грунтовых вод в Северном Прикаспии во второй половине XX в. // Известия РАН. Серия географическая. 2007. № 5. С. 82–87.
17. *Сапанов М.К., Сиземская М.Л.* Изменение климата и динамика целинной растительности в Северном Прикаспии // Поволжский журнал. 2015. № 3. С. 307–320.
18. *Сафонова И.Н.* Характеристика растительности Палласовского района Волгоградской области // Биоразнообразие и природопользование в Приэльтоные. Волгоград: Прин Терра. 2006. С. 5–9.
19. *Свиточ А.А., Макшаев Р.Р., Ростовцева Ю.В., Клювиткина Т.С., Березнер О.С., Трегуб Т.Ф., Хомченко Д.С.* Шоколадные глины Северного Прикаспия. М.: Географический факультет МГУ, 2017. 140 с.
20. *Тодерич К.Н., Бобокулов Н.А., Шуйская Е.В., Раббимов А.Р., Попова В.В., Мукимов Т.Х., Хакимов У.Н.* *Kochia prostrata* (L.) Shrad: ценная кормовая культура для улучшения производительности пастбищ в засушливых и полузасушливых регионах Центральной Азии / Ред.: И. Шоаиб, Т. Матюнина. Ташкент: Фан ва технология, 2015. 152 с.
21. *Шамсутдинов З.Ш., Шамсутдинов Н.З.* Галофитное растениеводство. М.: 2005. 404 с.
22. *Шуйская Е.В., Тодерич К.Н., Войницка-Полторак А.* Генетическая изменчивость кохии простертой (*Kochia prostrata* (L.) Schrad.) в условиях аридной зоны Узбекистана // Проблемы освоения пустынь. 2001. № 3. С. 24–31.
23. *Ярилова Е.А.* Особенности микроморфологии солонцов черноземной и каштановой зон. // Микроморфологический метод в исследовании

генезиса почв. М.: Наука. 1966. С. 58–75.

24. Lebedeva M.P., Konyushkova M., Khokhlov S. Monitoring of micromorphological changes in a virgin Solonetz under regional changes in hydrology and climate (Northern Caspian Lowland, Russia) // Spanish journal of soil science. 2018. Vol. 8 No. 2. P. 164–182. DOI: [10.3232/SJSS.2018.V8.N2.03](https://doi.org/10.3232/SJSS.2018.V8.N2.03).

25. Lebedeva M., Makeev A., Rusakov A., Romanis T., Yanina T., Kurbanov R., Kust P., Varlamov E. Landscape dynamics in the Caspian Lowlands since the last deglaciation reconstructed from the pedosedimentary sequence of Srednaya Akhtuba, Southern Russia // Geosciences. 2018. Vol. 8. Iss. 12. 492. DOI: [10.3390/geosciences8120492](https://doi.org/10.3390/geosciences8120492).

REFERENCES

1. Balyan G.A., *Prutnyak prostertyi i ego kul'tura v Kirgizii* (Kochia stretched and its culture in Kyrgyzstan), Frunze: Kyrgyzstan, 1972, 263 p.
2. Shishov L.L., Pankova E.I. (Eds), *Zasolennye pochvy Rossii* (Saline soils of Russia), Moscow: IKTs "Akademkniga", 2006, 854 p.
3. Zonn I.S., Trofimov I.A., Shamsutdinov Z.Sh., Shamsutdinov N.S., Lands resources of Russia arid territories, *Arid ecosystems*, 2004, Vol. 10, No. 22/23, pp. 87–102.
4. Lebedeva-Verba M.P., Gerasimova M.I., Macro- and micromorphological features of genetic horizons in a Solonetzic soil complex at the Dzhanybek Research Station, *Eurasian Soil Science*, 2009, Vol. 42, No. 3, pp. 237–250.
5. Lebedeva M.P., Konyushkova M.V., Temporal changes in the microfabrics of virgin and reclaimed solonetzes at the Dzhanybek Research Station, *Eurasian Soil Science*, 2011, Vol. 44, No. 7, pp. 753–765.
6. Lebedeva M.P., Konyushkova M.V., Kolesnikov A.V., Khokhlov S.F., The monitoring of changes of properties of virgin solonetz at djanybek stationary according to the data of micromorphologic investigations, *Dokuchaev Soil Bulletin*, 2016, Vol. 83, pp. 118–139, DOI: [10.19047/0136-1694-2016-83-118-139](https://doi.org/10.19047/0136-1694-2016-83-118-139).
7. Lebedeva (Verba) M.P., Sizemskaya M.L., Analysis of the microfabrics of reclaimed solonetzes at the Dzhanybek Research Station for evaluation of their ecological status, *Povolzhskiy Journal of Ecology*, 2010, No. 2, pp. 166–176.
8. Nidyulin V.N., *Ekologicheskoe i biologicheskoe raznoobrazie kokhii prostertoi (Kochia prostrata (L.) Schrad.) i ego ispol'zovanie dlya selektsii v aridnykh raionakh severozapadnogo Prikaspiya: Avtoref. dis. ... kand. s.-kh. Nauk* (Ecological and biological diversity of Kochia stretched (*Kochia prostrata* (L.) Schrad.) and its use for breeding in arid areas of the north-

- western Caspian Lowland: Extended abstract of cand. agric. sci. thesis), St. Petersburg, 2013, 21 p.
9. *Polevaya geobotanika* (Field geobotany), 1964, Vol. 3. Moscow – Leningrad: Nauka, 264 p.
10. *Polevoi opredelitel' pochv Rossii* (Field guide of Russian soils), Moscow: V.V. Dokuchaev Soil Science Institute, 2008, 182 p.
11. Pratov U., Voprosy vnutrividovoi sistematiki *Kochia prostrata* (L.) Schrad (Questions of intraspecific taxonomy *Kochia prostrata* (L.) Schrad), In: *Izen'*, Tashkent: Fan, 1971, pp. 3–5.
12. Rabotnov T.A., *Fitotsenologiya* (Phytocenology), Moscow: MSU, 1992, 351 p.
13. Rogozhnikova E.S., Rakhmankulova Z.F., Shuyskaya E.V., *Effects of water deficiency on mitochondrial functions and polymorphism of respiratory enzymes in plants*, Zhurnal obshchei biologii, 2013, No. 3, pp. 167–179.
14. Rode A.A., Pol'skii M.N., *Pochvy Dzhanybekskogo statsionara, ikh morfologicheskoe stroenie, mekhanicheskii i khimicheskii sostav i fizicheskie svoistva* (Soils of Dzhanybek station, their morphological structure, mechanical and chemical composition and physical properties) In: *Pochvy polupustyni severo-zapadnogo Prikaspiya i ikh melioratsiya*, Works of the V.V. Dokuchaev Soil Science Institute of the USSR Academy of Sciences (Soils of the semi-desert of the North-Western Caspian sea and their reclamation), Moscow: USSR Academy of Sciences, 1961, Vol. 56, pp. 3–214.
15. *Rukovodstvo po laboratornym metodam issledovaniya ionno-solevogo sostava neitral'nykh i shchelochnykh mineral'nykh pochv* (Guidelines for laboratory methods for the study of ion-salt composition of neutral and alkaline mineral soils), Moscow: VASKHNIL, V.V. Dokuchaev Soil Science Institute, 1990, 235 p.
16. Sapanov M.K., Sinkhronnost' izmeneniya urovnei Kaspiiskogo morya i gruntovykh vod v Severnom Prikaspii vo vtoroi polovine XX v. (Synchronism of changes of Caspian sea level and ground waters in Northern near-Caspian Sea area at the second part of the XX century), *Regional research of Russia*, 2007, No. 5, pp. 82–87.
17. Sapanov M.K., Sizemskaya M.L., Izmenenie klimata i dinamika tselinnoi rastitel'nosti v Severnom Prikaspii (Climate changes and the virgin vegetation dynamics in the Northern Caspian lowland), *Povolzhskiy Journal of Ecology*, 2015, No. 3, pp. 307–320.
18. Safronova I.N., Kharakteristika rastitel'nosti Pallasovskogo raiona Volgogradskoi oblasti, Bioraznoobrazie i prirodopol'zoavanie v Priel'ton'e (Characteristics of vegetation Pallasovsky district of the Volgograd region,

- Biodiversity and prirodopolzoavanie in the Elton Region), In: *Collection of scientific papers*, Volgograd: Prin Terra, 2006, pp. 5–9.
19. Svitoch A.A., Makshaev R.R., Rostovtseva Yu.V., Klyuvitkina T.S., Berezner O.S., Tregub T.F., Khomchenko D.S., *Shokoladnye gliny Severnogo Prikaspiya* (Chocolate clays of the Northern Caspian sea region), Moscow, 2017, 140 p.
20. Toderich K.N., Bobokulov N.A., Shuiskaya E.V., Rabbimov A.R., Popova V.V., Mukimov T.Kh., Khakimov U.N., *Kochia prostrata (L.) Schrad: tsennaya kormovaya kul'tura dlya uluchsheniya proizvoditel'nosti pastbischch v zasushlivykh i poluzasushlivykh regionakh Tsentral'noi Azii* (Kochia prostrata (L.) Schrad: a valuable forage crop to improve pasture productivity in arid and semi-arid regions of Central Asia), Tashkent: Fan va tekhnologiya, 2015, 152 p.
21. Shamsutdinov Z.Sh., Shamsutdinov N.Z., *Galofitnoe rastenievodstvo* (Halophytic plant growing), Moscow, 2005, 404 p.
22. Shuiskaya E.V., Toderich K.N., Voinitska-Poltorak A., Geneticheskaya izmenchivost' kokhii prostertoi (Kochia prostrata (L.) Schrad.) v usloviyakh aridnoi zony Uzbekistana (Genetic variability of Kochia stretched (Kochia prostrata (L.) Schrad.) in the arid zone of Uzbekistan), *Problemy osvoeniya pustyn'*, 2001, No. 3, pp. 24–31.
23. Yarilova E.A., *Osobennosti mikromorfologii solontsov chernozemnoi i kashtanovoi zon, Mikromorfologicheskii metod v issledovanii genezisa pochv* (Features of macro-morphology solonetzes Chernozemic and chestnut zone, Micromorphological method in the study of soil Genesis), Moscow: Nauka, 1966, pp. 58–75.
24. Lebedeva M.P., Konyushkova M., Khokhlov S., Monitoring of micromorphological changes in a virgin Solonetz under regional changes in hydrology and climate (Northern Caspian Lowland, Russia), *Spanish journal of soil science*, 2018, Vol. 8, No. 2, pp. 164–182, DOI: [10.3232/SJSS.2018.V8.N2.03](https://doi.org/10.3232/SJSS.2018.V8.N2.03).
25. Lebedeva M., Makeev A., Rusakov A., Romanis T., Yanina T., Kurbanov R., Kust P., Varlamov E., Landscape dynamics in the Caspian Lowlands since the last deglaciation reconstructed from the pedosedimentary sequence of Srednaya Akhtuba, Southern Russia, *Geosciences*, 2018, Vol. 8, Iss. 12, 492, DOI: [10.3390/geosciences8120492](https://doi.org/10.3390/geosciences8120492).

Cite this article as:

Sanzharova N.I., Ratnikov A.N., Fesenko S.V., Sviridenko D.G., Review on uranium in soil: levels, migration, Dokuchaev Soil Bulletin, 2019, V. 100, pp. 117-132, DOI: 10.19047/0136-1694-2019-100-117-132

Review on uranium in soil: levels, migration

© 2019 г. N. I. Sanzharova*, A. N. Ratnikov**,
S. V. Fesenko***, D. G. Sviridenko****

*Russian Institute of Radiology and Agroecology,
109 km Kievskoye shosse, 249032 Obninsk,*

Kaluga region, Russian Federation,

** e-mail: natsan2004@mail.ru,*

*** e-mail: ratnikov-51@mail.ru,*

**** e-mail: corwin_17f@mail.ru,*

***** e-mail: sedelnikov167@gmail.com.*

Received 05.09.2019, Revised 05.09.2019, Accepted 18.12.2019

Abstract: The problems of radioactive contamination of biosphere with the ^{238}U in recent years have attracted a large number of experts in various fields of knowledge. Natural radionuclides are an integral part of the biosphere. They are concentrated everywhere: in rocks, in soil, water, air and food. Various types of phosphorus fertilizers and other natural ameliorants used in agriculture are also an additional source of heavy natural radionuclides. The review describes the behaviour and migration of ^{238}U in biosphere, which depend on various factors acting simultaneously. It is noted that the behaviour of ^{238}U in the soil depends on the forms of its presence in it and the physical and chemical properties of the soil. The processes of sorption and desorption of ^{238}U by different soil types are significant indicators.

Keywords: ^{238}U ; radioactive contamination; soils, behaviour of ^{238}U , uranium forms.

INTRODUCTION

Intensification of energy development on nuclear and fossil organic fuels, extraction of rare and non-ferrous metals, production of phosphorus fertilisers with a high content of heavy natural radionuclides (HNR) can lead to further dispersion of uranium in the bio-

sphere. A sharp increase in technogenic flows of HNR in the biosphere, including in the field of agricultural production, necessitates the study of patterns of inclusion and migration of HNR in biological chains. To reliably assess the sanitary and hygienic danger of HNR, it is necessary to study the processes of interaction of these radionuclides with the soil. Migration of HNR in the terrestrial biosphere is a serious theoretical and practical problem, largely unsolved by modern science.

ROCKS AND SOILS

Isotopes of uranium are widely distributed in the Earth's crust. Uranium mass concentrations in parent rocks vary from 0.1 to 1,250 ppm with a typical range of 2.0–6.1 ppm or 25–75 Bq kg⁻¹ ²³⁸U (Table 1) ([Rubtsov, Pravdina, 1971](#)). The estimated average ²³⁸U concentration in the continental crust is 32.9 Bq kg⁻¹.

Table 1. Typical U concentrations in various rocks (adapted from [Gascoyne, 1992](#))

Rock types	U (mg kg ⁻¹)	²³⁸ U (Bq kg ⁻¹)
Silicic rocks (granites-dacites)	2.2–6.1	27–75
Basalts	0.1–1	1–12
Gneiss	2	25
Schist	2–5	25–62
Limestone	2	25
Black shale	3–1,250	37–15,000
Phosphates	50–300	620–3,700

Relatively high uranium concentrations are observed in black shale and phosphate rocks. The high uranium concentrations in shale are likely due to associations of clay-rich material of organic origin, whereas phosphate rocks of sedimentary origin are composed of minerals rich in uranium. Silicic rocks, granites and basalts tend to have similar uranium concentrations.

Concentrations of uranium in the soil depend, to a large extent, on its concentration in the parent rock. Parent rocks are affected by many environmental factors, resulting in soil formation. In particular, because of uranium weathering from the parent rocks, uranium can be

transferred and deposited as loess, silt placers and Tertiary soils (Table 2).

Table 2. Uranium concentrations in soils ([Alexakhin et al., 1990](#); [Baranov, Morozova, 1971](#); [Saric et al., 1995](#))

Landscape	Type of soil	Texture	^{238}U mg kg^{-1}
Tundra	Soddy-Podzolic [*]	Loam	2.53 ± 0.6
Taiga	Soddy-Podzolic [*]	Loam	20.1 ± 2.5
Taiga	Soddy-Podzolic	Loam	4.7 ± 2.9
Mixed forests	Typical chernozem	Clay	2.7 ± 0.2
Deciduous forest	Grey forest	Loam	1.2 ± 0.1
Meadows, steppe	Chernozem, Brown earth ^b	Clay, clay-loam	3.03 ± 0.7
	Chernozem	Clay	2.6 ± 0.2
	Light brown	Clay; clay-loam	2.9 ± 0.7
Dry Subtropics	Red earth	Clay-loam	5.1 ± 0.3
Desert	Light brown desert soil		5.33 ± 0.5

^{*}Area with elevated natural background, the Komi Republic;

^bSamples taken from the arable soil.

The data in table 2 show that ^{238}U concentrations in soils in areas with normal natural radiation background vary from 0.4 to 20 mg kg^{-1} . The highest mean values of $20.1 + 2.5 \text{ mg kg}^{-1}$ were found in Soddy-Podzolic Loam soils of the taiga.

Available data on uranium measurements in soils of different countries of the world are also reported in an UNSCEAR report ([Saric et al., 1995](#)), table 3 shows that ^{238}U concentrations in soil vary over a wider range than that reported in table 2, most likely because of the wider range of soil types investigated, inhomogeneity of the soils studied, the wider range of uranium concentrations in the parent rocks and other properties (in some cases localised) favouring uranium accumulation in the topsoil. Even within some countries, the ranges of reported ^{238}U concentrations in soils covered a large fraction of ^{238}U concentrations range presented in table 3. For example, this is the case for China (0.2–55 mg kg^{-1}) and Thailand (0.2–29.7 mg kg^{-1}).

Table 3. ^{238}U -concentrations in soil on a country-by-country basis (adapted from [Saric et al., 1995](#))

Region	Country	Bq kg^{-1}		mg kg^{-1}	
		Mean	Range	Mean	Range
Africa	Algeria	30	2–110	2.4	0.2–8.8
	Egypt	37	6–120	3.0	0.5–9.6
North America	Costa Rica	46	11–130	3.7	0.9–10.5
	United States	35	4–140	2.8	0.3–11.3
East Asia	China	33	2–690	2.7	0.2–55.5
	India	29	7–81	2.3	0.6–6.5
	Japan	29	2–59	2.3	0.2–4.7
	Kazakhstan	37	12–120	3.0	1.0–9.6
	Malaysia	66	49–86	5.3	3.9–6.9
	Thailand	114	3–370	9.2	0.2–29.7
West Asia	Armenia	46	20–78	3.7	1.6–6.3
	Syrian Arab Republic	23	10–64	1.8	0.8–5.1
North Europe	Lithuania	16	3–30	1.3	0.2–2.4
	Norway	50		4.0	
West Europe	Ireland	37	8–120	3.0	0.6–9.6
	Switzerland	40	10–150	3.2	0.8–12.1
East Europe	Bulgaria	40	8–190	3.2	0.6–15.3
	Hungary	29	12–66	2.3	1.0–5.3
	Poland	26	5–120	2.1	0.4–9.6
	Romania	32	8–60	2.6	0.6–4.8
	Russian Federation	19	1–67	1.5	0.1–5.4
	Slovakia	32	15–130	2.6	1.2–10.5
South Europe	Albania	23		1.8	
	Croatia	110	21–77	8.8	1.7–6.2
	Greece	25	1–240	2.0	0.1–19.3
	Portugal	49	26–82	3.9	2.1–6.6
Median		35	17–60	2.8	1.4–4.8

The median value for the ^{238}U concentration in soil calculated based on these data is 35 Bq kg^{-1} or 2.8 mg kg^{-1} . However, there are some areas in the world where the normal range of variation of naturally occurring radionuclides in soils or waters is greatly exceeded. These high radiation background regions are known as “Enhanced Natural Radiation Areas” or “ENRA”.

Maximum values were found to be for some Azerbaijan sites, Ramsar, Iran and the Komi Republic of the Russian Federation, where ^{238}U activity concentrations were two to three orders of magnitude higher than the average worldwide value of 32 Bq kg^{-1} reported in [UNSCEAR \(2008\)](#).

^{238}U AND AGRICULTURAL ECOSYSTEMS

Heavy natural radionuclide uranium participates in the formation of the Earth crust. Atomic mass of the natural uranium is 238. It was discovered by the German chemist M.H. Klaproth in 1789. Uranium is widely spread in nature ([Tananaev, 2011](#)). It was discovered in considerable concentrations in earth material, oceans, the Earth mantle and meteorites. The half-life of ^{238}U is 4.49×10^9 years (4.49 billion years) ^{238}U is the α -emitter with maximum energy of 4.7 MeV.

In areas where rocks containing ^{238}U and mine dumps come to the surface, there is an increased level of contamination of the biosphere with uranium. In the industrial production of phosphate fertilizers, there is also additional contamination of soils and vegetation with uranium ([Ishchenko, 1988](#))

The content of mobile forms of ^{238}U in ammophos and phosphogypsum comes up to 5.95 and 23% from gross content in water-soluble form.

Content of uranium in earth crust is $2 \cdot 10^{-4}\%$ ([Tananaev, 2011](#)). Average content of ^{238}U in all earth soils is $2.4 \times 10^{-4}\%$ ([Alexakhin et al., 1992](#)). The ^{238}U content in grey forest soils is equal to $3.4 \times 10^{-4}\%$, in chernozems – $3.0 \times 10^{-4}\%$, in the upper layers of sierozemic soils of semideserts it comes up to $2.2 \times 10^{-4}\%$. The average content of ^{238}U in soils all over the world is 24.4 Bq kg^{-1} . Global technogenic flows of ^{238}U in biosphere were approximately $1.5 \times 10^{14} \text{ Bq}$ at the operation of fuel cycle enterprises working on nuclear and fossil fuels and $1 \times 10^{14} \text{ Bq}$ at the application of phosphoric fertilizers. Volume of ^{238}U in

ploughed horizon of agricultural areas is 1.4×10^{17} Bq ([Alexakhin et al., 1992](#)).

Uranium belongs to the class of water migrants, and in natural media, it exists in (IV) and (VI) valency forms. In continental surface waters, the distribution of ^{238}U follows the natural and climatic zone sequence, where the concentration of this radionuclide varies from $n \times 10^{-8}$ to $n \times 10^{-5}$ L g^{-1} . In the waters of large rivers flowing through different climatic zones, the concentration of ^{238}U for the Northern Hemisphere increases from north to south ([Alexakhin et al., 1990](#)). In continental surface waters, the distribution of ^{238}U follows the natural and climatic zone sequence, where the concentration of this radionuclide varies from $n \times 10^{-8}$ to $n \times 10^{-5}$ L g^{-1} . In the waters of large rivers flowing through different climatic zones, the concentration of ^{238}U for the Northern Hemisphere increases from north to south ([Alexakhin et al., 1990](#)).

^{238}U in natural waters exists as a uranyl ion UO^{2+} , which forms complex compounds with inorganic and organic acids. The ability of the uranyl ion to form complexes with ions such as SO_4^{2-} , Cl^- , F^- , NO_3^- , CO_3^- , CH_3COO^- etc., to become a part of the negatively charged colloidal sols of the hydroxide and to form complexes of uranium-organic compounds plays a major role in the migration of ^{238}U to natural waters ([Drichko, 1983](#)). The forms of ^{238}U in surface waters depend on pH and the content of CO_2 and C_{org} . In neutral and slightly acidic waters of the cold and temperate zones of the humid zone, the dissolved ^{238}U migrates in the form of fulvates, hydroxycomplexes or pseudocolloids. For weakly alkaline waters of the arid zone containing carbonate-ion, the main forms of finding ^{238}U are stable carbonate complexes $[\text{UO}_2(\text{CO}_3)_2(\text{H}_2\text{O}_2)_2]^{2-}$ and $[\text{UO}_2(\text{CO}_3)_3]^{4-}$. The researchers also assume the presence of bicarbonate complex compounds ^{238}U ([Alexakhin et al., 1990](#)).

Anthropogenic sources of environmental pollution by ^{238}U , including agricultural ecosystems, are: extraction of uranium in mines and a formed uranium trace, the atomic and nuclear power industry, agriculture (mineral fertilizers, primarily phosphoric, may contain ^{238}U in high concentrations), uranium content in irrigation water ([Alexakhin et al., 1992](#); [Drichko, 1983](#)), the use of radioactive projectiles in military conflicts.

With the systematic use of waste (phosphogypsum) and complex phosphoric fertilizers, accumulation of gross and mobile forms of heavy natural radionuclides can occur in soils. It can reach the levels exceeding background concentrations by 1.5–2.0 times ([Drichko, 1983](#)).

The nature and direction of the soil formation processes determine the distribution of uranium in the soils of certain landscape zone. These factors result in the great variety of uranium content in soils. Uranium is accumulated mainly in the sod and the upper arable soil horizon.

²³⁸U IN SOILS OF AGRICULTURAL LANDS

The major factor determining the behaviour of the ²³⁸U, which enters the land cover, is its high mass concentration in the soils, whereby the chemical properties of the element itself play a more significant role in the behaviour of the radionuclide than the stable analogues ([Alexakhin et al., 1990](#)). At the same time, for ²³⁸U present in soils in ultramicroconcentrations, in some cases, the carrier may not be ²³⁸U, but some chemical elements being typomorphic for individual landscapes, which is confirmed by the deviation of the ratio ²³⁴U/²³⁸U from 1 ([Titaeva, 1992](#)).

Sorption of ²³⁸U in soils depends on many factors ([Alexakhin et al., 1990](#)). The degree of oxidation of ²³⁸U in soils is +4 and +6. In a highly reducing medium, ²³⁸U is predominantly in 4-valence, and in oxidative – in 6-valence forms.

Sorption of ²³⁸U in soils depends on the chemical properties, the physical and chemical state and concentration of elements, the granulometric and mineralogical composition of soils, the content of organic matter, the presence of certain ions in the solution, migratory-capable colloids, complexing agents, etc. ([Alexakhin et al., 1990](#); [Alexakhin et al., 1992](#); [Drichko, 1983](#)).

When pH varies from 5 to 6 ²³⁸U appears in soils mainly in the form of well-sorbed hydrolysed forms of uranyl, and for this reason, the transition of the radionuclide into water extract from these soils is negligible. At a small (about $1M \times 10^{-3}$) content of carbonates, hydrolysis forms of uranyl prevail in the pH range of 2–12 ([Iskra, Bakhurov, 1981](#)). Therefore, even at a high pH of the solutions, the recovery of

^{238}U from the soils does not increase. Thus, at pH 11, the fraction of radionuclide that has passed from leached chernozem to water extract is only 1.5%. In neutral and alkaline media, carbonate and phosphate compounds predominate ([Sultanbaev, Grigoryev, 1979](#)), and this can reduce and weaken the absorption of ^{238}U in the soil ([Iskra, Bakhurov, 1981](#)). At pH above 10, the equilibrium shifts again towards the formation of hydrolysis forms, the recovery of ^{238}U decreases. In media, rich in CaCO_3 and MgCO_3 , the absorption strength can increase due to the precipitation of $\text{Ca}_2(\text{UO}_2(\text{CO}_3)_3$ and $\text{Ca,Mg}(\text{UO}_2(\text{CO}_3)_3$). The minimum absorption of ^{238}U by sod horizons of sod-podzolic and sod-meadow soils was found at pH –3, maximum (97–98%) at pH 5–8.

A significant concentration of humus, as a rule, increases the sorption of radionuclides in the soil ([Rusanova, 1971](#); [Sultanbaev, Grigoryev, 1979](#)). Organic substances of the soil solution bind ^{238}U to complex compounds, differing in their solubility and stability ([Evseeva et al., 1974](#)). For example, the strength of the element complexes with humic acids is 1.5–2 times higher on average than with fulvic acids ([Kichigin, Nosova, 2004](#)). Under reducing conditions at pH 5, humic acids and, at pH 6.0–6.6, fulvic acids precipitate ^{238}U , in oxidative conditions, soluble compounds are formed. The carbonates concentration of $1\text{M} \times 10^{-3}$ almost eliminates the formation of soluble hydrolysis products and prevents the humate binding at the content of the humic acids lower than $0.1\text{M} \times 10^{-6}$. At their concentration of $50\text{M} \times 10^{-9}$ and low ($0.5\text{M} \times 10^{-3}$) carbonate content, the formation of uranium humates dominates ([Rachkova et al., 2010](#)). The effect of organic substances on the processes of absorption in the soil is due to the fact that they are themselves collectors of radioactive elements, or modify the absorption properties of other sorbents, and also form mobile compounds with radionuclides. Mechanisms of sorption and fixation of ^{238}U by soils have been poorly studied. Absorption process includes adsorption, ion exchange, precipitation, particularly due to oxidation-reduction reactions. Some authors ([Evseeva et al., 1974](#)) believe that the last of the above mechanisms is the most important in the process of sorption of uranium in the soil. At the same time, it was experimentally established that hexavalent uranium retains its valence in complexes with natural humic acid ([Teterin et al., 2001](#)). The mechanism of sorption consists of the exchange of hydrogen cations and uranyl UO^{2+} , that is why the

capacity and rate of absorption depend on the acidity of the medium. Fe^{3+} ions inhibit the formation of uranyl humates due to sorption on the surface of particles of colloidal humic acid ([Teterin et al., 2001](#)) that prevents the migration of ^{238}U in the form of absorbed or molecular solutions of uranyl humates. At the same time, the addition of humic acid to the hematite suspension reduces the absorption of the radionuclide, the degree of reduction depends on the pH of the medium and the amount of humic acid. In addition, the dominant factor is the fraction of ^{238}U bound to humates. In the presence of fulvates, the sorption of the radionuclide by the clayey soil components is completely inhibited ([Kornilovich et al., 2001](#)).

The sorption of ^{238}U in soil is related to the size and specific surface area of soil particles ([Arhipov et al., 1986](#); [Ishchenko, 1988](#); [Ishchenko, Butnik, 1990](#); [Rubtsov, Pravdina, 1971](#)). For soil with a high content of physical clay and silt, the high values of the distribution coefficients were set ([Drichko, 1983](#); [Rubtsov, Pravdina, 1971](#); [Rudnick, Gao, 2003](#); [Saric et al., 1995](#); [Titaeva, 1992](#)). The content of ^{238}U in the solid phase of clay soils is $200-7.9 \times 10^5$ times higher than in the equilibrium solution. For desert-sandy, meadow, meadow-swamp soils, light and typical sierozems, direct dependence of the absorption and mobility of ^{238}U on the content of humus, potassium, calcium and physical clay has been established ([Ishchenko, 1988](#); [Ishchenko, Butnik, 1990](#)). According to some estimates, the content of ^{238}U in the clay fraction is up to 3 times higher than its concentration in unfractionated soil. At the same time, little information indicates a lack of a close relationship between the sorption of radionuclides and the granulometric composition of soils. For example, for soils in the taiga zone, up to 50% of radionuclides of the uranium series are sorbed on the surface of particles with a size of 1–100 μm , and consolidation of aggregates in this range is accompanied by a decrease in the content of radioelements.

Fixation of ^{238}U in soils occurs due to its sorption by organic substances and clay minerals (illite, montmorillonite and kaolinite) ([Alexakhin et al., 1990](#); [Ratnikov et al., 2007](#); [Rusanova, 1998](#); [Taskaev, 1979](#)). Limestone weakly absorbs ^{238}U , and crystallised earth silicon does not absorb the uranium at all ([Alexakhin et al., 1990](#); [Savchenko, 2001](#)). The sorption centres of two types are significant for sorp-

tion of radionuclides by clay minerals. These centres are located on the basal surfaces of mineral particles, where ion exchange takes place, and on the lateral faces with the formation of strong sorption complexes. According to [Kornilovich et al. \(2001\)](#), uranium was primarily absorbed on the lateral faces of clay minerals. The X-ray diffraction analysis ([Iskra, Bakhurov, 1981](#)) showed that binding takes place according to the ion-exchange mechanism. ^{238}U competes with cations Ca^{2+} , Ba^{2+} , Mg^{2+} for sorption centres, but not with Na^+ and K^+ . According to the structural data, uranyl forms dissolved and absorbed by clay minerals are identical. Under sub-acidic conditions, they correspond to the hexahydrated ion ([Kornilovich et al., 2001](#)). In the pH range 6–12, the sorbed forms of uranyl are represented by UO_2OH^+ and $(\text{UO}_2)_2(\text{OH})$. Absorption of UO_2OH^+ predominates at pH 6, with a decrease in acidity, the ratio of sorption of $(\text{UO}_2)_2(\text{OH})$ increases. The isotherms of ^{238}U (VI) sorption by clay minerals have a maximum at pH 3–6 with a sharp decrease in the absorption parameters to the sides of this interval ([Kornilovich et al., 2001](#)).

Influence of the capacity of cation exchange on the sorption of ^{238}U by soils is practically absent. For example, the removal of organic matter and free ferrous oxides from the clayey fraction of silty loam reduces its cation-exchange capacity, without changing the absorption rate of ^{238}U . Along with this, there is an opinion ([Kornilovich et al., 2001](#)) that in surface media the Fe content controls the pH-dependent adsorption of ^{238}U . Oxide forms of metals (goethite, hematite, boehmite, etc.), on the one hand, themselves serve as sorbents of a radionuclide, and on the other – when they are adsorbed, these oxides form films on the surface of clay minerals changing their ion-exchange properties. The distribution coefficient of the radionuclide between solutions of its salts and Fe minerals reaches $2 \times 10^6 \text{ ml g}^{-1}$, which is 100 times greater than for secondary minerals.

Behaviour of ^{238}U and its forms in soils are determined both by the state of the radionuclide itself and by the physical and chemical properties of the soils. The original form of the radionuclide fallout plays an essential role in the processes of sorption and desorption of ^{238}U . For example, the sorption of ^{238}U by 5 types of soil (17 soil differences) with contrasting physical and chemical properties and indicators of texture when introducing a radionuclide in the form of a solu-

tion of uranyl nitrate is 82.2–99.2%, desorption by water is 1.1–7.5%, by 1N ammonium acetate solution – 2.4–40.8%, and by 2N HNO_3 solution – 51.3–79.2% ([Alexakhin et al., 1985](#)) (Table 4).

Table 4. Rate and strength of sorption of ^{238}U in different types of soils (in relation to the original quantity), %

Soil type	Sorption	Desorption		
		H_2O	1N $\text{CH}_3\text{COONH}_4$	2N HNO_3
Sod-podzolic	97.0	1.7	2.4	54.6
Dark-grey forest	98.4	1.2	11.7	59.5
Grey forest	96.9	1.4	3.2	51.3
Brown forest	88.4	1.2	36.2	79.2
Chernozem				
leached	98.5	1.2	13.4	68.4
podzolic	82.2	5.9	24.1	51.3
usual	85.9	7.5	9.6	57.0
southern	90.9	3.6	25.6	68.4
firm	98.1	1.1	22.2	76.4
Meadow chernozem	89.1	5.6	22.3	69.5
Sod	82.2	5.9	24.1	51.3
Meadow	99.2	1.5	23.6	60.8
Humic-gleyed	98.1	1.1	14.8	72.8
Meadow-swampy	87.5	3.6	23.0	69.2
Dark kastanozem	93.6	3.8	32.8	77.2
Kastanozem	87.0	4.8	40.8	61.2
Light kastanozem	87.4	4.4	26.4	72.0

In works of [Arkhipov et al. \(1986\)](#), there were established the limits of the absolute and relative content of gross, acid-soluble and exchangeable forms of natural radionuclides (^{238}U , ^{232}Th , ^{226}Ra , ^{210}Po and ^{210}Pb) in the soils of the agricultural territory of the country. The gross content of ^{238}U is 0.2–0.5 pCi g^{-1} in sod-podzolic soils, 0.6–1.0 pCi g^{-1} in chernozems, 0.7 pCi g^{-1} in kastanozems, 0.8 pCi g^{-1} in brown semi-desert soils, 0.7 pCi g^{-1} in sierozems. The content of the acid-soluble forms of ^{238}U is 6–26% of the gross content, depending on the agrochemical properties of the soil. The amount of exchangeable and

water-soluble forms of ^{238}U in sod-podzolic soils varies between 18–40%, in chernozem – 9–12% of gross soil content ([Arkhipov et al., 1986](#)).

By this means, a generalisation of the accumulated data indicates that intensive and strong absorption of ^{238}U in soils occurs mainly due to organic matter and clay minerals. The processes of ion exchange, complexation, hydrolysis and oxidation-reduction designate the fixation of ^{238}U in soils.

To date, there is a lack of the investigation of the temporal aspects of ^{238}U absorption processes in various soils. The existing research methodologies do not allow evaluating fully the transformation of forms and mechanisms of radionuclide binding in soils. One of the ways to overcome these difficulties can be carrying out complex ^{238}U full-scale and model studies.

Study of [Ishchenko and Butnik \(1990\)](#) conducted on different soil types in Central Asia gives a comprehensive assessment of the effect of ^{238}U on the bioavailability, depending on the time of interaction of the radionuclide with the soil.

Transformation of the ^{238}U forms in time was studied on a typical sierozem. Soil samples were taken from the plots, where cotton was grown in the first and second years, in the third year – wheat. The concentration of ^{238}U was 53 mg kg⁻¹ of soil.

^{238}U from soil samples was successively extracted with distilled water, acetate-ammonium buffer solution (pH 4.8), solution of citric acid (0.033M), mixture of citric (0.033M) and oxalic (0.5M) acids, hydrochloric acid. The content of the ^{238}U forms was calculated in %, assuming the initial value to be 100%.

It was found that uranium, introduced into the soil as a solution of $^{238}\text{U}(\text{NO}_3)_2$, comprises mainly exchangeable forms with soil components in desert-sandy soil, light and typical sierozems, and in meadow soils, the uranium interaction with soil components results in acid-soluble form. From such soils as desert-sandy, light and typical sierozems, most of the ^{238}U passed into aqueous and acetate-ammonium extracts (from 48.4 to 51.5%), into which readily soluble, exchangeable compounds and organomineral complexes are displaced. There is an inverse relationship between the physical and chemical soil properties and the amount of water-soluble and exchangeable forms of ^{238}U , and

with the number of fixed ^{238}U compounds, the relationship is direct. Correlation coefficients between the amount of radionuclide in water-soluble and exchangeable forms and all indicated soil parameters turned out to be rather high ($R = 0.73\text{--}0.88$).

The ratio of water-soluble, exchangeable, acid-soluble and fixed forms had been determined for three years in order to study the influence of the time factor on the transformation of the occurrence of ^{238}U in a typical sierozem, the ratio of the forms of radionuclide was determined two weeks after its introduction into the soil. A year later, the number of exchangeable compounds of ^{238}U increased, and the number of acid-soluble compounds decreased. After two years of radionuclide stay in the soil, no further changes in the content of the various forms of ^{238}U were detected. With a 3-year incubation of ^{238}U in the soil, the number of fixed compounds increased significantly in comparison with their content in the first year, while the fraction of the exchangeable forms of the radionuclide remained unchanged ([Ratnikov et al., 2019](#); [Kornilovich et al., 2001](#)) (Table 5).

Table 5. The content of various forms of ^{238}U , depending on the time of their stay in the soil, % of application

Timing of determination	Water soluble	Exchangeable	Acid-soluble	Fixed
In 2 weeks	7.5	41.5	27.6	23.8
In 1 year	5.9	47.0	21.6	25.5
In 2 years	4.1	49.1	20.8	25.6
In 3 years	2.7	47.5	10.7	39.2

The amount of water-soluble and essentially acid-soluble forms has decreased. This occurs because acid-soluble compounds of ^{238}U have been transformed into fixed ones with time. As for the water-soluble compounds of the radionuclide, it is possible that some of them migrated down the soil profile, and a part entered the plants, so their content in the plough horizon of the soil decreased.

Describing, in general, the behaviour and migration of ^{238}U in biosphere, it should be noted that all this occurs under the influence of various factors acting simultaneously. For the chemical element as a whole, it will depend mainly on three main parameters: 1) the chemical

properties of the element; 2) the physical and chemical conditions of the environment; 3) the forms of finding the element in the initial rocks. The second factor is a function of climatic and partly geological conditions; the third one is completely determined by geological conditions.

REFERENCES

1. Aleksakhin R.M., Bufatin O.I., Malikov V.G., Perepelyatnikov G.P., Parashchukov N.P., Sanzharova N.I., Prister B.S., Zhukov B.I., Perepelyatnikova L.V., Shukhovtsev B.I., Fomkina N.D., Sakharov I.F., Kuznetsov V.K., *Radioekologiya oroshaemogo zemledeliya* (Radioecology of Irrigated Agriculture), Moscow: Energoatomizdat, 1985, 224 p.
2. Aleksakhin R.M., Arkhipov N.P., Burkudarov R.M., Basilenko I.Ya., Drichko V.F., Ivanov Yu.A., Maslov V.I., Maslova K.I., Nikiforov V.S., Polikarpov G.G., Popova O.N., Sirotnik A.N., Taskaev A.I., Testov B.V., Titaeva N.A., Fevraleva L.T., *Tyazhelye yestestvennye radionuklidy v biosphere. Migratsiya i biologicheskoye deistviye na populyatsii i biogeotsenozy* (Heavy natural radionuclides in the biosphere. Migration and biological effect on populations and biogeocenoses), Moscow: Nauka, 1990, 367 p.
3. Aleksakhin R.M., Vasil'ev A.V., Dikarev V.G., Egorova V.A., Zhigareva T.L., Ivanov Yu.A., Koz'min G.V., Kruglikov B.P., Kruglov S.V., Morganova E.A., Panteleev L.I., Povalyaev A.P., Popova G.I., Rasin I.M., Ratnikov A.N., Sanzharova N.I., Sarapul'tsev I.A., Sirotnik A.N., Sokolov V.A., Spirin E.V., Fesenko S.V., Filipas A.S., Khvostunov I.K., Shevchenko A.S., Shukhovtsev B.I., *Selskokhozyajstvennaya radioekologiya* (Agricultural radioecology), Moscow: Ekologiya, 1992, 400 p.
4. Arkhipov N.P., Fedorova T.A., Fevraleva L.T., Ratio of forms of compounds of heavy natural radionuclides in soils, *Pochvovedeniye*, 1986, Vol. 1, pp. 69–72.
5. Baranov V.I., Morozova N.G., Behavior of natural radionuclides in soils, In: Alexakhin R.M., Klechkovsky V.M. (Eds), *Sovremennye problemy radiobiologii* (Current problems of radiobiology), Moscow: Atomizdat, 1971, pp. 13–40.
6. Drichko V.F., Behaviour of heavy natural radionuclides in the natural environment, In: *Itogi nauki i tekhniki: Radiatsionnaya Biologiya*, 1983, Vol. 4, pp. 66–98.
7. Evseeva L.S., Perelman A.I., Ivanov K.E., *Geokhimiya urana v zone gipergeneza* (Geochemistry of uranium in the hypergenesis zone), Moscow: Atomizdat, 1975, 280 p.

8. Gascoyne M., Geochemistry of the actinides and their daughters, In: Ivanovich, M., Harmon, R.S. (Eds), *Uranium-series disequilibrium: applications to earth, marine, and environmental sciences*, Oxford, Clarendon Press, 1992, pp. 34–61.
9. Ishchenko G.S., *The patterns of migration of uranium-238 and thorium-232 in the soil-plant system in Central Asia*, Cand. biol. sci. thesis, RIARAE, Ochninsk, 1988.
10. Ishchenko G.S., Butnik A.S., The forms of ^{238}U and ^{232}Th in the soils of Central Asia, *Agrokhimiya*, 1990, No. 1, pp. 92–96.
11. Iskra A.A., Bakhurov V.G., *Estestvennye radionuklidy v biosfere* (Natural radionuclides in the biosphere), Moscow: Energoizdat, 1981, 124 p.
12. Kichigin O.V., Nosova O.A. (2004). Potentiometric study of the stability of U (VI), Ni (II), Sr (II) complexes with soil humic acids, *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy: Khimiya. Khimicheskaya Tekhnologiya*, 2004, Vol. 47, No. 1, pp. 94–96.
13. Kornilovich B.Y., Pshinko G.N., Kovalchuk I.A., Influence of fulvic acids on the interaction of U (VI) with clayey components of soils, *Radiokhimiya*, 2001, Vol. 43, No. 5, pp. 404–407.
14. Malikov V.G., Zhukov B.I., Perepelyatnikova L.V., Behavior of radionuclides in the soils of the North Caucasus, *Agrokhimiya*, 1988, No. 3, pp. 84–89.
15. Megumi K., Lagmay N.R., Concentration of natural radionuclides in soil particles in relation to their surface area, *J. Radiat. Res.*, 1980, Vol. 21, No. 1, pp. 48–53.
16. Rachkova N.G., Shuktomova I.I., Taskaev A.I., The state of natural radionuclides of uranium, radium, and thorium in soils, *Eurasian Soil Sc.*, 2010, 43, pp. 651–658, DOI: [10.1134/S1064229310060050](https://doi.org/10.1134/S1064229310060050).
17. Ratnikov A.N., Zhigareva T.L., Sviridenko D.G., Popova G.I., Petrov K.V., Kasyanenko A.A., Kuliyeva G.A., Behaviour of the ^{238}U in the soil-plant system, *Proc. Intern. Symposium “Agroecological Safety under the Conditions of Technogenesis”*, Part I, 2007, Kazan, pp. 307–311.
18. Ratnikov A.N., Sviridenko D.G., Popova G.I., Sanzharova N.I., Mikailova R.A., The Behaviour of Uranium in Soils and the Mechanisms of Its Accumulation by Agricultural Plants. In: Gupta D., Walther C. (eds) *Uranium in Plants and the Environment. Radionuclides and Heavy Metals in the Environment*, Springer, Cham, 2019, pp. 113–135, DOI: [10.1007/978-3-030-14961-1_5](https://doi.org/10.1007/978-3-030-14961-1_5).
19. Rubtsov D.M., Pravdina E.I., The content and distribution of natural radioactive elements (uranium, radium, thorium) in the soils of some landscapes of the Northern Urals, *Inf. byul. nauch. Soveta po problemam radiobiologii AN SSSR*, 1971, Iss. 13, pp. 130–134.

20. Rudnick R.L., Gao S., Composition of the continental crust, *Treatise on Geochemistry*, 2003, Vol. 3, pp. 1–64.
21. Rusanova G.V., Content and regularities of the distribution of radium-226 in the soil cover of the region with the increased natural radiation, In: Popova O.N., Kodaneva R.P., Maslov V.I. (Eds), *Materials of Radioecological Research in Natural Biogeocenoses*, Syktyvkar, 1971, pp. 32–65.
22. Rusanova G.V., Forecast of long-term behaviour of radionuclides in soils of the taiga zone, *Proc. of VI International Symposium “Nuclear Urals. Industrial Urals”*, Ekaterinburg, 1998, pp. 52–54.
23. Savenko A.V., Sorption of UO_2^{2+} on calcium carbonate, *Radiokhimiya*, 2001, Vol. 43, No. 2, pp. 174–177.
24. Saric M.R., Stojanovic M., Babic M., Uranium in plant species grown on natural barren soil, *Journal of Plant Nutrition*, 1995, Vol. 18, Iss. 7, pp. 1509–1518.
25. Sheppard I.C., Campbell M.J., Retention of radionuclides by mobile humic components and soil particles, *Environ. Sci. Technol.*, 1980, Vol. 14, No. 11, pp. 1349–1353.
26. Sultanbaev A.S., Grigoryev A.F., The content of uranium in the soils and plants of the Tien Shan, In: *Perfection and cultivation of agricultural crops as the scientific basis for the intensification of plant growing in Kyrgyzstan*, Frunze, 1979, Iss. 16, pp. 240–250.
27. Taylor S.R., Trace element abundances and the chondritic Earth model, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, Vol. 28, Iss. 12, 1964, pp. 1989–1998.
28. Tananaev I.G., *Uran: Uchebnoe posobie* (Uranium: Educational guidance), Moscow: NRNU MEPhI, 2011, 92 p.
29. Taskaev A.I., *Regularities in the distribution and migration of U, Th and Ra isotopes in the soil-vegetation cover of the region of increased natural radiation*, Cand. biol. sci. thesis, Syktyvkar, 1979.
30. Teterin Y.A., Nefedov V.I., Nikitin A.S., Teterin A.Y., Ivanov K.E., Maslakov K.I., Utkin I.O., Bubner M., Reich T., Pompe S., Heise K.H., Nitsche H., Interaction of UO_2^{2+} and Fe^{3+} ions with natural humic acid, *Russ. J. Inorg. Chem.*, 2001, Vol. 46, No. 6, pp. 886–891.
31. Titaeva N.A., *Yadernaya Geokhimiya* (Nuclear Geochemistry), Moscow: MSU, 2000, 336 p.
32. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR), Report to the General Assembly, with scientific annexes, 2008.

УДК 631.454; 54.11; 66.02

DOI: 10.19047/0136-1694-2019-100-133-158

Ссылки для цитирования:

Сметанников А.Ф., Косолапова А.И., Корляков К.Н., Оносов Д.В., Фомин Д.С., Ямалтдинова В.Р., Шишков Д.Г., Оносова Е.Ф. Концепция использования комплексных удобрений пролонгированного действия на основе отходов переработки калийно-магниевых руд как новой парадигмы в улучшении плодородия почв // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2019. Вып. 100. С. 133-158. DOI: 10.19047/0136-1694-2019-100-133-158

Cite this article as:

Smetannikov A.F., Kosolapova A.I., Korlyakov K.N., Onosov D.V., Fomin D.S., Yamaltdinova V.R., Shishkov D.G., Onosova E.F., Concept of use of comprehensive fertilizers of long-term action on the basis of waste processing of potassium-magnesium ore as a new paradigm in improving soil fertility, Dokuchaev Soil Bulletin, 2019, V. 100, pp. 133-158, DOI: 10.19047/0136-1694-2019-100-133-158

**Концепция использования комплексных
удобрений пролонгированного действия на
основе отходов переработки калийно-магниевых
руд как новой парадигмы в улучшении
плодородия почв**

© 2019 г. А. Ф. Сметанников^{1*}, А. И. Косолапова^{2**},
К. Н. Корляков^{2***}, Д. В. Оносов^{1****}, Д. С. Фомин^{2,3*****},
В. Р. Ямалтдинова^{2*****}, Д. Г. Шишков^{2*****},
Е. Ф. Оносова^{1*****}

¹Пермский федеральный исследовательский центр. Горный институт
Уральского отделения Российской академии наук
(ПФИЦ “ГИ УрО РАН”), Россия,
614007, г. Пермь, ул. Сибирская 78 А

*<https://orcid.org/0000-0002-9444-7748>, e-mail: smetannikov@bk.ru,
**** <https://orcid.org/0000-0001-7136-7158>, e-mail: onosov@inbox.ru,
***** <https://orcid.org/0000-0003-0656-6964>,
e-mail: ekaterinaonosova@bk.ru.

²Пермский федеральный исследовательский центр.
Пермский НИИ сельского хозяйства Уральского отделения

Российской академии наук. (ПФИЦ ПНИИСХ УрО РАН), Россия,
614532, г. Пермь, Пермский р-н, с. Лобаново, ул. Культуры 12,
** <https://orcid.org/0000-0002-9929-4488>, e-mail: pniish@rambler.ru,
*** <https://orcid.org/0000-0002-5715-2027>,
**** <https://orcid.org/0000-0001-8261-7191>,
***** <https://orcid.org/0000-0003-2945-0585>,
***** <https://orcid.org/0000-0002-6869-9722>.

³Пермский государственный аграрно-технологический университет
имени академика Д.Н. Прянишникова,
(ФГБОУ ВО Пермский ГАТУ), Россия,
614990, Пермский край, г. Пермь, ул. Петропавловская, 23,

e-mail: gd@parmail.ru.

Поступила в редакцию 05.09.2019, после доработки 01.10.2019,
принята к публикации 18.12.2019

Резюме: В Пермском федеральном исследовательском центре разрабатывается технология получения и применения новых комплексных удобрений пролонгированного действия из глинисто-солевых отходов переработки К-Mg руд после получения калийных удобрений. Основными процессами в технологии являются обогащение отходов и высокотемпературный обжиг концентрата обогащения. В результате формируется продукт, получивший название огарок, имеющий свойства комплексных удобрений пролонгированного действия, мелиоранта и микроудобрения. Проведены лабораторные и полевые опыты по применению огарка в качестве калийного удобрения. Изучаемые культуры – яровая пшеница, ячмень, картофель. Схема опытов включала варианты: контроль (без удобрений), NP – фон; NP + KCl и NP + огарок. Для зерновых культур (пшеница, ячмень) применение огарка на фоне NP повысило урожайность на 1.7–1.9 т/га по отношению к контролю, применение стандартных удобрений NPK – на 1.8–2.0 т/га, разница – в пределах ошибки опыта ($HCP_{05} = 0.21; 0.38$ т/га). Содержание азота, фосфора и калия в зерне и соломе обеих культур в вариантах с применением огарка было на уровне варианта с применением стандартного удобрения и достоверно выше по сравнению с контролем. Различия между вариантами с применением огарка были несущественными. Внесение N₉₀P₉₀ и полного минерального удобрения (N₉₀P₉₀K₉₀) способствовало повышению урожайности клубней картофеля на 1.43–4.51 т/га соответственно. Применение удобрений-огарков на фоне NP не уступало по эффективности использованию хлористого калия. Показатели качества урожая картофеля (содержание сухого вещества и крахмала в клубнях, содержание тяжелых металлов) также не

уступали применению традиционного калийного удобрения. Применение огарка под картофель и зерновые культуры в дозах эквивалентных K_{60-120} не приводило к ухудшению показателей плодородия дерново-подзолистой почвы. При получении огарка можно использовать дополнительно неограниченный набор компонентов. Иначе говоря, это концептуальная модель для создания новых видов минеральных удобрений с заданными свойствами для разных почвенно-климатических условий и культур с различными требованиями к минеральному питанию.

Ключевые слова: глинисто-солевые отходы, шламы, гранулят, огарки, высокотемпературный обжиг, комплексные удобрения пролонгированного действия, микроэлементы, минералы-мелиоранты, урожайность, пшеница яровая, ячмень, картофель, семеноводство картофеля.

Concept of use of comprehensive fertilizers of long-term action on the basis of waste processing of potassium-magnesium ore as a new paradigm in improving soil fertility

A. F. Smetannikov^{1*}, A. I. Kosolapova^{2***}, K. N. Korlyakov^{2***},
D. V. Onosov^{1****}, D. S. Fomin^{2,3*****}, V. R. Yamaltdinova^{2*****},
D. G. Shishkov^{2*****}, E. F. Onosova^{1*****}

¹Perm Federal Research Center of UB RAS, Mining Institute,
A Bld. 78 Sibirskaia Str., 614007 Perm, Russian Federation,

* <https://orcid.org/0000-0002-9444-7748>, e-mail: smetannikov@bk.ru,
**** <https://orcid.org/0000-0001-7136-7158>, e-mail: onosov@inbox.ru,
***** <https://orcid.org/0000-0003-0656-6964>,
e-mail: ekaterinaonosova@bk.ru.

²Perm Federal Research Center of UB RAS,
Perm Agricultural Research Institute,
12 Kulturi Str., 618032 Lobanovo, Perm, Russian Federation,

** <https://orcid.org/0000-0002-9929-4488>, e-mail: pniish@rambler.ru,
*** <https://orcid.org/0000-0002-5715-2027>,
**** <https://orcid.org/0000-0001-8261-7191>,
***** <https://orcid.org/0000-0003-2945-0585>,
***** <https://orcid.org/0000-0002-6869-9722>.

³*Perm State Agro-Technological University
named after Academician D.N. Pryanishnikov
23 Petropavlovskaya Str., 614990 Perm Russian Federation,

e-mail: gd@parmail.ru.*

Received 05.09.2019, Revised 01.10.2019, Accepted 18.12.2019

Abstract: Technology for the production and use of new multiple slow-release fertilizers from clay-salt waste (sludge) remaining as a result of potassium fertilizers production from natural K-Mg ores, is elaborated in Perm Federal Research Center. The main processes in the technology are waste enrichment and subsequent high-temperature calcination of the enriched concentrate. As a result, the product, received the name the calcine of clay-salt sludge, was formed having the properties of multiple slow-release fertilizer and ameliorant. Laboratory and field experiments on the calcine use as a potassium fertilizer were fulfilled. The studied crops were spring wheat, barley, and potato. The experimental scheme included such treatments: control (without fertilizers), NP – background; NP + KCl and NP + calcine. The use of calcine for grain crops (wheat, barley) on the NP background promoted the yield gains by 1.7–1.9 t/ha compared with the control, the use of standard NPK fertilizers – by 1.8–2.0 t/ha, the difference was within the error of the experiment ($HCP_{05} = 0.21$; 0.38 t/ha). The content of nitrogen, phosphorus and potassium in the grain and straw of both crops in the treatments using calcine was approximately equal to the variants using standard fertilizer and significantly higher compared to the control. Differences between calcine treatments were not significant. The application of $N_{90}P_{90}$ and full mineral fertilizer ($N_{90}P_{90}K_{90}$) contributed to the yield increase of potato tubers by 1.43–4.51 t/ha respectively. The use of unconventional potassium fertilizer – calcine on the background of NP was not inferior in efficiency to the use of traditional fertilizer – potassium chloride. The quality parameters of the potato crop (dry matter and starch content in tubers, the content of heavy metals) were also not inferior compared to the use of traditional potassium fertilizer. The use of calcine for potato and cereals in rates equal to K_{60-120} did not lead to deterioration of the fertility indicators of sod-podzolic soil. Upon receipt of the cinder, one can use the additional unlimited set of components. In other words, this is a conceptual model for creating new types of mineral fertilizers with desired properties for different soil and climatic conditions and crops with different requirements for mineral nutrition.

Keywords: clay-salt waste, sludge, granulate, calcine, high-temperature calcination, multiple slow-release fertilizers, trace elements, ameliorants, yield, spring wheat, barley, potato, potato seed production.

ВВЕДЕНИЕ

Картофель клубненосный (*Solanum tuberosum*) – важнейшая мировая продовольственная, кормовая и техническая культура. Россия производит более 10% общемирового объема картофеля, однако средняя урожайность этой культуры в стране остается одной из самых низких ([Жевора и др., 2017](#)). К основным причинам можно отнести низкое качество посадочного материала, значительные потери в процессе вегетации в результате поражения многочисленными вредителями и болезнями, а также вследствие засоренности посадок.

Существенный вклад в снижение потенциальной урожайности вносят последствия абиотических стрессов: засухи, неблагоприятные физические и агрохимические свойства почв, несбалансированное минеральное питание ([Коршунов, 2003б](#)).

К важнейшим особенностям данной культуры относятся повышенные требованиям к элементам питания, особенно к калию, а также продолжительный период питания, причем максимум азота и фосфора поступает в растения до цветения, а поступление калия продолжается до полной физиологической зрелости клубней. Калий [стимулирует синтез](#) сахаров и высокомолекулярных углеводов – крахмала, целлюлозы, пектиновых веществ, ксиланов – как в листьях, так и в [клубнях картофеля](#) ([Коршунов, 2003а](#)).

Картофель отзывчив на внесение удобрений, прежде всего калийных. Основным видом калийного удобрения, применяемого в сельском хозяйстве, является хлористый калий. Однако для картофеля нежелательно применение удобрений, содержащих хлор, так как нарушается углеводный обмен при формировании урожая. Поэтому необходимо расширение ассортимента калийных удобрений других форм.

Посадки картофеля часто размещаются на торфянистых почвах, где наблюдается нехватка микроэлементов, прежде всего, меди. Медь также входит в состав многих фунгицидов, поэтому полноценная обеспеченность растений картофеля медью может играть определенную роль в профилактике грибных болезней. Растения картофеля нуждаются и в других микроэлементах, среди которых основными являются халькофильные элементы

([Fernandes et al., 2011](#); [Soratto et al., 2011](#); [Sharipova et al., 2016](#); [Cuchiara et al., 2017](#)). Применение комплексного удобрения Микровит, в состав которого входят макроэлементы, а также медь, железо, цинк, бор, молибден, сокращает на 30% пестицидную нагрузку на растения, способствует увеличению урожайности на 15–30% ([Кузнецов и др., 2017](#)).

Поэтому во многих случаях целесообразно применение комплексных удобрений, в состав которых входят макро- и микроэлементы, а также минералы-мелиоранты: доломит, карбонаты и сульфаты кальция ([Сметанников и др., 2017](#)).

При основном (осеннем) внесении удобрений часто происходят потери питательных веществ в течение осенне-зимнего периода и весеннего в процессе таяния снега. Особенно большие потери наблюдаются в регионах с промывным водным режимом, а также в случае применения быстрорастворимых форм удобрений, например, хлористого калия. В связи с этим проводятся поиски способов сокращения подобных потерь. Применение удобрений с пониженной растворимостью (пролонгированного действия) позволяет до определенной степени синхронизировать скорость растворения в почвенной среде и скорость поступления в растения питательных веществ. Наиболее распространенными (традиционными) видами удобрений пролонгированного действия являются комплексонаты металлов: хелаты (на основе комплексона этилендиаминтетра-уксусная кислота (ЭДТА)), фосфорсодержащие комплексоны (гидроксистилиден-дифосфоновая кислота (ОЭДФ), нитрилтри (метиленфосфоновая) кислота (НТФ)) и другие ([Груздева и др., 2015](#)).

Доказано, что ЭДТА и другие традиционные комплексоны со временем накапливаются в биосфере и вызывают растворение отложений токсичных металлов с переходом их в раствор в виде стабильных комплексонатов, что приводит к отравлению планктона, рыб, птиц и высших животных, а также вызывает гипоксию в природных водах ([Мартыненко, Кузьмина, 1986](#)). По этой причине в последнее время ставка делается на применение менее токсичных комплексонов (ОЭДФ, НТФ, производных янтарной кислоты), которые легко поддаются биодеструкции в естественных условиях, в отличие от аналогичных комплексов с классическим

комплексонами, способны повышать урожайность сельскохозяйственных культур и улучшать качество продукции ([Мартыненко, Кузьмина, 1986](#)).

Другими способами замедления поступления питательных компонентов в почву являются гранулирование и капсулирование, но данные приемы замедляют растворение в незначительной степени ([Гурбанова и др., 2017](#); [Старовойтова и др., 2018](#); [Крутко, Шевчук, 2011](#); [Сабиров и др., 2005](#)).

Применяются в качестве пролонгированных удобрений продукты спекания шламов и химических реагентов ([Hu et al., 2018](#)) и продукт синтеза мерлиноита ($K_5Ca_2(Si_{23}Al_9)O_{64} \cdot 24H_2O$) из золы угля ([Li et al., 2014](#)) и другие продукты ([Ruthrof et al., 2018](#)).

Исследования продуктов переработки отходов горнодобывающей промышленности заставили обратить внимание на глинисто-солевые отходы переработки K-Mg руд Верхнекамского месторождения. Состав отходов (шламов) свидетельствует о возможности их использования в качестве комплексных удобрений ([Сметанников и др., 2013](#); [Оносов, Сметанников, 2014](#)). Утилизация шламов, накопление которых в шламохранилищах создает высокий уровень экологической опасности ([Бачурин и др., 2014](#)), имеет большое значение для решения экологических проблем региона.

Основными составляющими шламов являются нерастворимый в воде остаток (НО), остаточные хлориды и вода. В НО шламов содержатся калиевые полевые шпаты (КПШ) – источник калия, сульфаты кальция (гипс) и доломит, являющиеся минералами-мелиорантами, а также сульфиды, содержащие микроэлементы. Использованию шламов в качестве удобрений мешают остаточные хлориды и техногенные элементы ([Сметанников и др., 2018](#)). В связи с этим проблема их использования в качестве удобрений включала необходимость разработки технологии, исключающей из состава шламов техногенные компоненты и воду обогащательными методами, а также преобразование (разрушение) остаточных хлоридов калия и натрия с целью обеспечить вхождение продуктов преобразования во вторичные калиевые минералы и в минералы, обладающие мелиорирующими свойствами. Основным способом стал высокотемпературный обжиг, позволивший

получить безхлоридный продукт – огарок.

Предварительные исследования, проведенные в 2014–2016 гг. учеными Горного института УрО РАН и Пермского НИИСХ показали, что применение огарка под зерновые культуры не уступает действию традиционного калийного удобрения при условии равенства доз в действующем веществе ([Сметанников и др., 2017](#)).

Существенными преимуществами данного вида удобрений являются комплексный характер (наличие K, Ca, Mg и микроэлементов), способность улучшать не только агрохимические, но и агрофизические свойства почвы, практическое отсутствие хлоридов, пролонгированность действия. В отличие от других видов удобрений пролонгированного действия, для производства которых требуется проведение дополнительных технологических операций (синтез органических соединений – комплексонов и др.), в указанном виде удобрения – огарке – присутствует готовая минеральная матрица. Минералы, входящие в его состав, могут служить основой или матрицей для макро- и микроэлементов, что позволяет добавлять в нее практически неограниченный набор компонентов (включая стимуляторы роста и бактериальные препараты). Таким образом, формируется концептуальная модель создания новых видов минеральных удобрений, позволяющая применять их в разных почвенно-климатических условиях и для культур с различными требованиями к минеральному питанию.

Для реализации данной модели в Пермском федеральном исследовательском центре, в который на правах филиалов вошли Горный институт и ПНИИСХ, с 2017 г. проводятся расширенные исследования по разработке и совершенствованию технологии получения комплексных удобрений и их применения на посадках семенного картофеля.

Цель исследования – разработать и реализовать концепцию использования отходов переработки K-Mg руд в качестве комплексных удобрений пролонгированного действия, изучить влияние их применения на урожайность и комплекс хозяйствственно-ценных признаков семенного картофеля, изучить влияние на агрохимические и агрофизические свойства почвы, а также на показатели плодородия дерново-подзолистой почвы.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Исходные шламы представляют собой суспензию, состоящую из твердой и жидкой фаз. Твердая фаза – это нерастворимый в воде остаток шламов (НО), который содержит до 35% смеси гипса и ангидрита, до 16% калиевого полевого шпата (далее КПШ), до 15% доломита, до 15% кварца и до 35% смеси сильвина и галита. Кроме того, НО содержат от 0.1 до 0.3% Zn, Cu и Co в виде примеси в сульфидах ([Сметанников и др., 2018](#)). Особенностью состава жидкой фазы шламов является присутствие остаточных хлоридов и технологических реагентов, применяемых в технологических процессах, выполняющих роль вспенивателей, сгустителей, собирателей (амины, полиакриламид, карбамиды, неонол и др.). Поэтому главными задачами разрабатываемой технологии были:

1. Удаление влаги, излишков хлоридов и техногенных компонентов обогатительными методами (отмывка, сушка, грануляция и досушивание при 150–200 °C).
2. Глубокая переработка высокотемпературным обжигом, с получением продукта – огарка.

После обогащения и обжига в составе огарка образуется пироксен и сульфат калия – сингенит – за счет разрушения хлоридов, доломита, гипса. Количество кварца и КПШ сохраняется. Сульфиды отжигаются, и микроэлементы после обжига (отжига) преобразуются в оксидную форму. Огарок приобретает свойства комплексного удобрения пролонгированного действия. Пролонгированность обеспечивается присутствием в огарке труднорастворимого КПШ и сингенита как источников калия. Функции минерала мелиоранта переходят от гипса и доломита к Ca, Mg-содержащему пироксену.

Эти исследования по разработке технологии получения и применения удобрений проводились в лаборатории Горного института УрО РАН и на опытном поле Пермского НИИСХ. Технология разрабатывалась в 2005–2013 гг. В ходе исследований 2013–2017 гг. технология была существенно доработана ([Оносов, Сметанников, 2014](#); [Бачурин и др., 2014](#)).

При обогащении шламов была понижена температура воды

при отмывке до 40 °С (вместо 60–70 °С) с целью максимального избавления от хлорида натрия. Но главным образом изменения коснулись параметров высокотемпературного обжига с целью максимального преобразования минерального состава шламов.

Для выявления оптимальных параметров концентрат обогащения гранулят обжигался тремя партиями при температуре 600 °С (УЛТП-1), 800 °С (УЛТП-2) и 900 °С (УЛТП-3). Минеральный состав продуктов обжига показан в таблице 1. Данные таблицы 1 демонстрируют, что преобразование шлама в огарок характеризуется разрушением хлоридов, доломита, ангидрита и их участием в формировании новых калиевых и кальциевых, магниевых минералов. Причем интенсивность разрушения тесно связана с повышением температуры обжига. Наибольшая интенсивность преобразования и количество новообразованных минералов отмечается при температуре 900 °С (рис. 1).

Таблица 1. Минеральный состав огарков

Table 1. Mineral composition of calcine

T, °C	Минеральный состав огарков по данным РКФА (масс. %)							
	кварц	КПЩ	доломит	гипс	сильвин	ангидрит	гематит	нироксен
600	10	18	8	5	4	44	2	13
800	9	15	5	3	4	40	2	19
900	8	13	2	1	2	18	2	43

* Сингенит – $K_2Ca(SO_4)_2 \cdot H_2O$.

Таким образом, оптимальный режим обжига приводит к перераспределению (вхождению) калия, хлора, кальция и магния в новообразованные минералы.

Баланс калия в огарке распределяется по трем минералам, содержащим калий, – КПЩ, сингенит и остаточный сильвин (KCl), – обладающим разной растворимостью. Существует возможность рассчитать оптимальную дозу с прогнозным действием одного внесения на 4–8 лет. Кроме того, уникальным качеством огарка является его стерильность ([Сметанников, 2017](#)).



Рис. 1. Огарок – гранулят, обожженный при температуре 900 °С.
Fig. 1. Calcine – granulate, annealed by 900 °C temperature.

Полевые опыты проводились на дерново-сильноподзолистой тяжелосуглинистой почве ($\text{pH}_{\text{KCl}} = 5.2\text{--}5.4$; гумус – 2.21–2.30 %, сумма поглощенных оснований – 19.6–22.0 мг-экв/100 г почвы; подвижный фосфор – 121–124, обменный калий – 110–120 мг/кг почвы). Схемы опытов с зерновыми культурами и картофелем представлены в таблицах 2, 3.

Агротехника в опыте – общепринятая для возделывания яровой пшеницы, ячменя и картофеля в Пермском крае. В предварительных лабораторных исследованиях использование огарка в качестве собственно субстрата для выращивания растений приводило к их угнетению, и не может быть рекомендовано к применению в сельскохозяйственной практике. Поэтому в серии полевых опытов подход к использованию отходов калийной промышленности был принципиально изменен. Огарок использовался как ми-

неральное удобрение в дозах, сопоставимых с дозами традиционных удобрений с учетом процентного содержания в них питательных веществ, в данном случае – с хлористым калием. При этом соотношение массы удобрения и массы пахотного горизонта почвы радикально отличаются от соотношения, полученного в лабораторных исследованиях. Дозы удобрений составляют от 100 до 800 кг на 1 га, масса пахотного горизонта с 1 га – до 2 400 т.

Способ и сроки применения огарка были аналогичными общепринятой технологии применения минеральных удобрений: поверхностное внесение с последующей заделкой в почву в ходе осенней зяблевой вспашки. В опытах с зерновыми культурами и картофелем для установления эффективности огарка разной степени обжига наряду с контролем были включены следующие варианты: фон – $N_{60}P_{60}$, $N_{60}P_{60}K_{30}$, $N_{60}P_{60}K_{60}$.

Учет урожая сплошной, поделяочный. Статистическая обработка полученных данных выполнена по методике, изложенной [Б.А. Доспеховым \(1985\)](#).

Качественный состав зерна, соломы зерновых культур и клубней картофеля определяли по общепринятым методикам в изложении [В.В. Кирина \(2008\)](#).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты разработки способа преобразования шламов.

Главным результатом стало получение продукта – огарка, который позиционируется как комплексное удобрение пролонгированного действия.

Основная позиция заключается во включении питательных компонентов (K, Ca, Mg) в минералы, обладающие низкой растворимостью, и в их замедленном поступлении в почву. Другое свойство – наличие мелиорирующих компонентов и компонентов, позиционируемых как микроудобрения. Кроме того, технология получения огарка не исключает возможности смешивания на стадии обогащения с отходами обогащения фосфоритов (эфелями) и получения K-P огарков.

Вторая позиция – это сохранение мелиорирующих свойств огарка после обжига и разрушения доломита и гипса, поскольку продукты разрушения локализуются в пироксене, также облада-

ющим мелиорирующими свойствами. Третья позиция – это перевод микроэлементов, включенных в сульфиды после обжига, в оксидную форму ([Сметанников и др., 2017](#); [Сметанников и др., 2018](#)). Все эти три позиции характеризуют “огарок” как комплексное удобрение пролонгированного действия. Кроме указанных выше свойств, применение огарка может рассматриваться как новый способ сохранения плодородия почв в комплексе с восстановлением и улучшением ее физико-химических, агрономических свойств и улучшением устойчивости работы агроэкосистемы.

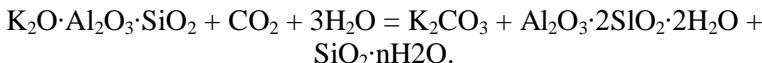
Таким образом, сформирована концептуальная модель создания новых видов минеральных удобрений, позволяющая применять их в разных почвенно-климатических условиях и для культур с различными требованиями к минеральному питанию.

В то же время возникает ряд вопросов, основным из которых является вопрос о времени разрушения КПШ и “форме” поступления калия в почву.

Известно, что образование осадков, их постепенное погружение с накоплением новых осадков способствует появлению градиента давления и температуры. Сочетание этих факторов способствует преобразованию (метаморфизации) погружающихся осадков и преобразованию первичных минералов осадков в другие (метаморфогенные) минералы. Подобное явление происходит и при обжиге шламов, однако доминирующим является температурный фактор.

В почве агентами химического выветривания являются: вода, кислород, углекислота и различные органические соединения преимущественно кислотного типа. При воздействии этих агентов в почвах идут реакции растворения, окисления, гидратации и гидролиза минералов. В ряду устойчивости минералов огарка к химическому выветриванию можно выстроить следующий ряд: 1) гипс и органические вещества; 2) доломит; 3) хлорит, серицит; 4) пироксен; 5) ортоклаз (КПШ). К устойчивым минералам относятся кварц, циркон, оксиды титана и др. Добавочным фактором, способствующим разрушению КПШ, является размерность его зерен, как в исходном шламе, так и в огарке, которая составляет менее 40 микрон.

Как видно из этой последовательности, КПШ может подвергаться химическому выветриванию в почвах с несравненно более сильным эффектом, чем в коре выветривания горных пород. Разложение КПШ по Перельману, Полынову ([Полынов, 1934](#); [Сапожников и др., 1972](#)) представляется следующей реакцией:



Последовательность вещественных превращений – ортоклаз-поташ-каолинит. Поташ, скорее всего, и является основным калиевым питательным компонентом.

Результаты испытания действия огарков на урожайность и качество полевых сельскохозяйственных культур.

Метеорологические условия в годы проведения опыта были различными. Вегетационный период 2015 г. характеризовался благоприятными условиями для формирования урожая зерновых культур, а 2016 г. – как засушливый с высокой теплообеспеченностью и недостаточным количеством осадков, 2017 г. отличался низкой теплообеспеченностью и большим количеством осадков.

Урожайность яровой пшеницы без удобрений в среднем за два года составила 1.68 т/га, ячменя – 2.04 т/га (табл. 2). Внесение азотно-фосфорных удобрений способствовало повышению урожайности яровой пшеницы по сравнению с контролем на 89 %, ячменя – на 76 %. Применение $\text{N}_{60}\text{P}_{60}\text{K}_{60}$ также обеспечивало существенные прибавки: на 117 % по сравнению с контролем и на 15–17 % по сравнению с фоном.

Применение огарка способствовало формированию урожайности зерновых культур на уровне КС1 (различия – в пределах ошибки опыта). Прибавка урожая яровой пшеницы по сравнению с контролем составила 1.42–1.78 т/га, с фоном – 0.23–0.28 т/га, ячменя – 1.30–2.02 и 0.34–0.47 т/га соответственно.

Анализ качества полученной продукции показал, что содержание азота, фосфора и калия в зерне и соломе обеих культур в вариантах с применением огарка было на уровне варианта с применением стандартного удобрения и достоверно выше по сравнению с контролем. Различия между вариантами с

применением огарка были несущественными.

Таким образом, применение нового типа удобрений под зерновые культуры в рекомендуемой дозе является эффективным приемом, так как повышается урожайность зерновых культур, качество продукции не ухудшается, а также решается экологическая проблема утилизации отходов калийной промышленности.

Кроме зерновых культур применение огарка в качестве удобрений изучали на картофеле в сравнении с азотно-фосфорными и азотно-фосфорно-калийными удобрениями. Недостаток тепла и избыток влаги в течение вегетационного периода отрицательно сказался на формировании урожайности картофеля, который на контроле составил 2.92 т/га (табл. 3).

Внесение азотно-фосфорных удобрений (фоновый вариант) и полного минерального удобрения (NPK) в рекомендуемой дозе способствовало повышению урожайности клубней картофеля на 1.43–4.51 т/га по сравнению с контролем. Наибольшего значения урожайность достигла при внесении $N_{90}P_{90}K_{90}$ (KCl) – 7.43 т/га. Сбалансированное минеральное питание картофеля повышало не только урожайность, но и способствовало улучшению качества клубней. Отмечена тенденция повышения содержания сухого вещества, крахмала и витамина С по сравнению с контролем.

Внесение азота, фосфора и огарков в рекомендуемой и повышенной дозах обеспечивало получение урожайности 6.41–6.88 т/га – на уровне хлористого калия. При этом показатели качества урожая: содержание сухого вещества, крахмала, нитратов, витамина С, – не уступали варианту с применением хлористого калия, различия между вариантами были в основном в пределах ошибки опыта. Содержание азота варьировало в ботве в пределах 0.29–0.32 %, а в клубнях – 0.31–0.33 %, P_2O_5 – 0.10–0.12 % и 0.12–0.16 %, K_2O – 0.85–1.03 % и 0.68–0.96 % соответственно.

Таблица 2. Влияние огарка на урожайность яровой пшеницы и ярового ячменя (среднее за 2015–2016 гг.)
Table 2. Spring wheat and barley yields as influenced by calcine application

Варианты	Яровая пшеница				Ячмень, т/га					
	урожай- ность, т/га	прибавка		урожай- ность, т/га	прибавка		урожай- ность, т/га	прибавка		
		к контролю			к контролю					
		т/га	%		т/га	%		т/га		
Без удобрений – контроль	1.68	-	-	-	-	-	2.04	-		
N ₆₀ P ₆₀ – фон	3.18	1.50	89	-	-	-	3.59	1.55		
N ₆₀ P ₆₀ K _{KCl} 30	3.30	1.62	96	0.12	4	3.83	1.79	76		
N ₆₀ P ₆₀ K _{KCl} 60	3.65	1.97	117	0.47	15	4.21	2.17	88		
N ₆₀ P ₆₀ +УЛТП–1 30	3.18	1.50	89	-	-	3.34	1.30	0.62		
N ₆₀ P ₆₀ +УЛТП–3 30	3.10	1.42	84	-	-	3.38	1.34	17		
N ₆₀ P ₆₀ +УЛТП–1 60	3.46	1.78	106	0.28	9	4.06	2.02	66		
N ₆₀ P ₆₀ +УЛТП–3 60	3.41	1.73	103	0.23	7	3.93	1.89	0.47		
HCP ₀₅		0.21					0.38	9		

Таблица 3. Урожайность и качественные показатели клубней картофеля (2017 г.)

Table 3. Potato yield and tubes quality parameters (2017)

Варианты	Урожай- ность, т/га	Прибавка				Содержание			
		к контролю		к фону		сухое в-во, %	крахмал, %	нитраты, мг/кг	витамин С, мг
		т/га	%	т/га	%				
Контроль	2.92	-	-	-	-	18.9	13.6	13.2	11.91
N ₉₀ P ₉₀ фон1	4.35	1.43	49	-	-	18.6	13.9	14.0	12.79
N ₉₀ P ₉₀ K _{KCl 90}	7.43	4.51	154	3.08	71	19.1	13.8	18.1	14.81
Фон + 0–1 ₆₀	4.36	1.44	49	0.01	-	18.8	13.6	13.1	13.10
Фон + 0–1 ₉₀	6.41	3.49	119	2.06	47	18.7	11.6	16.9	13.45
Фон + 0–1 ₁₂₀	7.07	4.15	142	2.72	62	19.2	15.0	17.6	13.25
Фон + 0–2 ₆₀	4.89	1.97	67	0.54	12	19.1	13.5	15.0	13.60
Фон + 0–2 ₉₀	6.88	3.96	136	2.53	58	18.5	11.4	17.5	13.10
Фон + 0–2 ₁₂₀	6.99	4.07	139	2.64	61	18.7	11.6	17.8	13.29
Фон + 0–3 ₆₀	5.15	2.23	76	0.80	18	19.1	11.5	16.0	13.90
Фон + 0–3 ₉₀	7.37	4.45	152	3.02	69	19.1	14.4	17.2	14.40
Фон + 0–3 ₁₂₀	7.50	4.58	157	3.15	72	19.2	14.1	17.4	14.70
HCP ₀₅		0.88				F _Φ < F _T	F _Φ < F _T	3.2	1.1

В клубнях картофеля и почве провели определение содержания тяжелых металлов. Данные, приведенные в таблице 4, показывают, что содержание тяжелых металлов в клубнях картофеля не превышало ПДК и УДК и было на уровне фонового и контрольного вариантов, а также вариантов с внесением полного минерального удобрения в рекомендованной дозе.

Таблица 4. Влияние огарков на содержание тяжелых металлов в клубнях картофеля, мг/кг

Table 4. Heavy metals composition in potato tubes as influenced by calcine application

Варианты	Кадмий	Свинец	Бор	Кобальт
Без удобрений – контроль	0.012	0.22	11.27	0.28
N ₉₀ P ₉₀ – фон	0.022	0.42	13.73	0.40
N ₉₀ P ₉₀ K ₉₀	0.020	0.37	10.37	0.13
Фон + 0–1 120	0.012	0.22	12.91	0.21
Фон + 0–2 120	0.017	0.31	13.28	0.19
Фон + 0–3 120	0.0097	0.26	10.37	0.18
Фон + 0–3 90	0.010	0.16	11.49	0.32

Аналогичные результаты получены и по содержанию тяжелых металлов и микроэлементов в почве. Их содержание было практически одинаковым в вариантах с внесением огарка и хлористого калия (табл. 5).

Таким образом, применение огарка не ухудшило агрохимические показатели почвы по сравнению с внесением стандартного удобрения – хлористого калия.

В дальнейших исследованиях необходимо провести полный биохимический анализ (содержание сырого протеина, жира, клетчатки и др.) и определение содержания расширенного набора микроэлементов в испытываемых культурах.

Таблица 5. Влияние применения огарков на содержание тяжелых металлов и микроэлементов в почве, мг/кг

Table 5. Calcine application impact on heavy metals and trace elements content in soil, mg/kg

Варианты	Тяжелые металлы				Массовая доля подачи серы	Микроэлементы	
	Медь	Цинк	Свинец	Кадмий		Кобальт	Марганец
Контроль	24.33	48.05	10.64	0.198	3.66	1.20	39.15
N ₉₀ P ₉₀ – фон	25.39	47.61	9.92	0.201	4.26	0.83	44.65
N ₉₀ P ₉₀ K ₉₀	26.43	48.79	9.75	0.208	2.69	1.67	38.30
Фон + 0–1 120	26.52	48.13	10.19	0.210	1.93	1.13	39.33
Фон + 0–2 120	23.38	47.13	9.53	0.228	2.38	1.27	34.21
Фон + 0–3 120	21.99	47.71	10.44	0.237	3.38	1.47	26.92
Фон + 0–3 90	22.65	48.54	10.44	0.284	2.28	1.20	27.54

ВЫВОДЫ

1. Разработана и усовершенствована технология переработки шламов в комплексные удобрения пролонгированного действия, ключевым элементом которой является высокотемпературный ($t = 900^{\circ}\text{C}$) обжиг шламов. Полученный продукт называется огарок. Огарок содержит питательные компоненты (K, Ca, Mg), мелиорирующие компоненты (пироксен, доломит и гипс), микроэлементы (Cu, Zn, Co и др.).

2. Проведенная серия полевых опытов подтвердила возможность использования огарка в качестве удобрения в дозах, сопоставимых с дозами традиционных удобрений. Внесение огарков способствовало формированию урожайности зерновых культур и картофеля на уровне стандартного удобрения. Кроме того, показа-

тели качества урожая картофеля (содержание сухого вещества и крахмала в клубнях, содержание тяжелых металлов) не уступали таковым в вариантах с применением традиционного калийного удобрения.

3. Необходимо продолжить исследования по совершенствованию состава (включение макро- и микроэлементов), а также разработке технологии получения и применения на различных культурах новых комплексных РК удобрений пролонгированного действия.

4. Минералы, входящие в состав огарка, могут служить основой или матрицей для макро- и микроэлементов, что позволяет добавлять в нее практически неограниченный набор компонентов, включая стимуляторы роста и бактериальные препараты. Таким образом, формируется концептуальная модель создания новых видов минеральных удобрений с заданными свойствами, способствующими сохранению и повышению плодородия почвы, повышению устойчивости агроэкосистемы, а также позволяющая применять их в разных почвенно-климатических условиях и для культур с различными требованиями к минеральному питанию.

БЛАГОДАРНОСТЬ

Исследования выполнены при поддержке гранта РФФИ № 17-45-590998 “Разработка концептуального подхода к преобразованию (утилизации) глинисто-солевых отходов (шламов) после переработки К-Mg руд и использованию продуктов утилизации в качестве комплексных удобрений пролонгированного действия, содержащих питательные компоненты (K, Mg, Ca) на бесхлоридной основе, минералы-мелиоранты и микроэлементы”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бачурин Б.А., Сметанников А.Ф., Хохрякова Е.С. Эколого-геохимическая оценка продуктов переработки глинисто-солевых шламов калийного производства // Электронный журнал “Современные проблемы науки и образования”. 2014. № 6. URL: www.science-education.ru/120-15442.
2. Груздева Е.В., Архипова В.В., Бучинская А.В., Кульчинская А.С. Технология применения комплексов в жидких удобрениях и их роль в

воде и почве. URL: http://www.waterh.net/wp-content/uploads/2015/10/Article_09.pdf.

3. Гурбанова З.Р., Гумбатов М.О., Гурбанов Э.А. Получение гранулированного фосфорного удобрения, обогащенного микроэлементами // Проблемы современной науки и образования. 2017. № 6 (88). С. 17–19.
4. Доспехов Б.А. Методика полевого опыта (с основами статистической обработки результатов исследований). М.: Агропромиздат, 1985. 351 с.
5. Жевора С.В., Чугунов В.С., Шатилова О.Н., Анисимов Б.В. Современное состояние и прогноз производства картофеля в Российской Федерации // Картофелеводство: материалы международной научно-практической конференции “Инновационные технологии селекции и семеноводства картофеля” (29–30 июня 2017 г., ФГБНУ ВНИИКХ). М.: ФГБНУ ВНИИКХ, 2017. С. 3–28.
6. Коршунов А.В. Картофель России // Физиолого-биохимические особенности картофеля. М.: Достижения науки и техники АПК, 2003. Т. 2. С 3–87.
7. Коршунов А.В. Картофель России // Технологии возделывания. М.: Достижения науки и техники АПК, 2003. Т. 2. С 201–208.
8. Кидин В.В., Дерюгин И.П., Кобзаренко В.И. Практикум по агрохимии. М.: Колос, 2008. 599 с.
9. Крутько Н.П., Шевчук В.В. Совершенствование технологии производства гранулированных калийных удобрений и повышение их качества // Рудник будущего. 2011. № 4 (8). С. 12–14.
10. Кузнецов Д.А., Прокина Л.Н., Ибрагимова Г.Н., Калинина А.Д. Влияние хелатной формы микроудобрения (микровит) на фоне применения высоких доз минеральных удобрений на урожайность картофеля ранней группы спелости // Аграрная наука Евро-Северо-Востока. 2017. № 1 (56). С. 40–46.
11. Мартыненко Л.И., Кузьмина Н.П. О влиянии комплексонов на биосферу // Химия комплексонов и их применение. Калинин: Калин. гос. ун-т, 1986. С. 15–17.
12. Оносов Д.В., Сметанников А.Ф. Разработка технологии комплексной утилизации отходов переработки калийно-магниевых руд. // Материалы научно-практической конференции “ГИ УрО РАН”. Пермь: “ГИ УрО РАН”, 2014. С. 167–171.
13. Полынов Б.Б. Кора выветривания. Л.: Изд-во АН СССР, 1934. 243 с.
14. Сабиров Р.Р., Игнатьева Г.П., Себалло В.А. Исследование прочностных свойств гранулированных калийных удобрений // Обогащение руд. 2005. № 3. С. 11–13.

15. Сапожников Д.С., Перельман А.И., Петров В.П. Геология и минералогия коры выветривания. // Кора выветривания. М.: Наука, 1970. Вып. 11. 280 с.
16. Сметанников А.Ф., Оносов Д.В., Синегрибов В.А., Косолапова А.И., Новиков П.Ю. Способ переработки отходов калийного производства. Пермь: "ТИ УрО РАН". Патент РФ № 2497961. Заявка 2012142039. Зарегистрирован 10.11.2013 г.
17. Сметанников А.Ф., Косолапова А.И., Митрофанова Е.М., Бачурин Б.А., Оносов Д.В., Фомин Д.С., Ямалтдинова В.Р., Шишкин Д.Г., Оносова Е.Ф. Результаты испытаний отходов переработки калийно-магниевых руд в качестве удобрений пролонгированного действия // Вестник ПНЦ. 2017. № 4. С. 58–63.
18. Сметанников А.Ф., Косолапова А.И., Бачурин Б.А., Оносов Д.В., Фомин Д.С., Ямалтдинова В.Р., Шишкин Д.Г., Оносова Е.Ф. Разработка методологического подхода в применении комплексных удобрений пролонгированного действия для зерновых культур, многолетних трав и картофеля // Научные чтения памяти П.Н. Чирвинского. 2018. № 21. С. 415–423.
19. Старовойтова О.А., Старовойтov B.I., Манохина А.А. Влияние органического гранулированного удобрения и росторегуляторов на качество клубней картофеля // Аграрный вестник Верхневолжья. 2018. № 2 (23). С. 15–20.
20. Cuchiara C.C., Larré C.F., Peters J.A. The objective of this study was to evaluate the combined effects of copper (Cu) and zinc (Zn) on sweet potato plants based on morphological parameters, mineral profiles, and antioxidant metabolism // Iheringia – Serie Botanica. 2017. Vol. 72 (1). P. 142–149. DOI: [10.21826/2446-8231201772113](https://doi.org/10.21826/2446-8231201772113).
21. Fernandes A.M., Soratto R.P., Silva B.L. Nutrient extraction and exportation by potato cultivars: I – Macronutrients // Revista Brasileira de Ciencia do Solo. 2011. Vol. 35 (6). P. 2039–2056. DOI: [10.1590/S0100-06832011000600020](https://doi.org/10.1590/S0100-06832011000600020).
22. Hu P., Zhang Y., Wang X., Zhou Y., Tong W., Luan X., Ma X., Zhou F., Chu P.K., Zhao P. $K_2MgSi_3O_8$ in slow-release mineral fertilizer prepared by sintering of by-product of red mud-based flocculant // Environmental Engineering Science. 2018. Vol. 35 (8). P. 829–835. DOI: [10.1089/ees.2017.0340](https://doi.org/10.1089/ees.2017.0340).
23. Li J., Zhuang X., Font O., Moreno N., Vallejo V.R., Querol X., Tobias A. Synthesis of merlinoite from Chinese coal fly ashes and its potential utilization as slow release K-fertilizer // Journal of Hazardous Materials. 2014. Vol. 265. P. 242–252. DOI: [10.1016/j.jhazmat.2013.11.063](https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2013.11.063).

24. *Rutherford K.X., Steel E., Misra S., McComb J., O'Hara G., Hardy G.E.S.J., Howieson J.* Transitioning from phosphate mining to agriculture: Responses to urea and slow release fertilizers for Sorghum bicolor // *Science of the Total Environment*. 2018. Vol. 625. P. 1–7. DOI: [10.1016/j.scitotenv.2017.12.104](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.12.104).
25. *Sharipova D.S., Aitbayev T.E., Tazhibayev T.S., Nacheva E.K.* The impact of new and improved elements of agricultural technologies on potato productivity in the south-east of Kazakhstan // *Biosciences Biotechnology Research Asia*. 2016. Vol. 13 (2). P. 1031–1036. DOI: [10.13005/bbra/2129](https://doi.org/10.13005/bbra/2129).
26. *Soratto R.P., Fernandes A.M., de Souza-Schlick G.D.* Nutrient extraction and exportation by potato cultivars: II – Micronutrients // *Revista Brasileira de Ciencia do Solo*. 2011. Vol. 35 (6). P. 2057–2071. DOI: [10.1590/S0100-06832011000600021](https://doi.org/10.1590/S0100-06832011000600021).

REFERENCES

1. Bachurin B.A., Smetannikov A.F., Khokhryakova E.S., Ekologo-geokhimicheskaya otsenka produktov pererabotki glinisto-solevykh shlamov kaliinogo proizvodstva (Ecological and geochemical evaluation of products of processing clay-salt sludge of potash production), *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya*, 2014, No. 6, URL: www.science-education.ru/120-15442.
2. Gruzdeva E.V., Arkhipova V.V., Buchinskaya A.V., Kul'chinskaya A.C., *Tekhnologiya primeneniya kompleksonov v zhidkikh udobreniyakh i ikh rol' v vode i pochv* (The technology of the use of complexones in liquid fertilizers and their role in water and soil), URL: http://www.waterh.net/wp-content/uploads/2015/10/Article_09.pdf.
3. Gurbanova Z.R., Gumbatov M.O., Gurbanov E.A., Poluchenie granulirovannogo fosfornogo udobreniya, obogashchennogo mikroelementami (Obtaining granular phosphorus fertilizer enriched with trace elements), *Problemy sovremennoi nauki i obrazovaniya*, 2017, No. 6 (88), pp. 17–19.
4. Dospekhov B.A., *Metodika polevogo opyta (s osnovami statisticheskoi obrabotki rezul'tatov issledovanii)* (The methodology of field experience (with the basics of statistical processing of research results)), Moscow: Agropromizdat, 1985, 351 p.
5. Zhevora S.V., Chugunov V.S., Shatilova O.N., Anisimov B.V., Sovremennoe sostoyanie i prognoz proizvodstva kartofelya v Rossiiskoi Federatsii (Current state and forecast of potato production in Russian Federation), *Kartofelevodstvo: materialy mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii "Innovatsionnye tekhnologii selektsii i semenovodstva kartofelya"* (Potato growing: of the international scientific-

- practical conference “Innovative technologies of selection and seed production of potatoes”, 29–30, June, 2017, FGBNU VNIKKh, Moscow, 2017, 20 p.
6. Korshunov A.V., Kartofel' Rossii. Fiziologo-biokhimicheskie osobennosti kartofelya (Potato of Russia. Physiological and biochemical characteristics of potatoes), In: *Dostizheniya nauki i tekhniki APK*, Moscow, 2003, Vol. 2, pp. 3–87.
 7. Korshunov A.V. *Kartofel' Rossii. Tekhnologii vozdelyvaniya* (Potato of Russia. Technologies of cultivation), In: *Dostizheniya nauki i tekhniki APK*, Moscow, 2003, Vol. 2, pp. 201–208.
 8. Kidin V.V., Deryugin I.P., Kobzarenko V.I., *Praktikum po agrokhimii* (Workshop on agrochemistry), Moscow: Kolos, 2008, 599 p.
 9. Krut'ko N.P., Shevchuk V.V., Sovershenstvovanie tekhnologii proizvodstva granulirovannykh kaliinykh udobrenii i povyshenie ikh kachestva (Improving the production technology of granular potash fertilizers and improving their quality), *Rudnik budushchego*, 2011, No. 4 (8), pp. 12–14.
 10. Kuznetsov D.A., Prokina L.N., Ibragimova G.N., Kalinina A.D., Vliyanie khelatnoi formy mikroudobreniya (mikrovit) na fone primeneniya vysokikh doz mineral'nykh udobrenii na urozhainost' kartofelya rannei gruppy spelosti (The influence of the chelated form of microfertilizer (microvit) on the background of the use of high doses of mineral fertilizers on the yield of potatoes of the early ripening group), *Agrarnaya nauka Evro-Severo-Vostoka*, 2017, No. 1 (56), pp. 40–46.
 11. Martynenko L.I., Kuz'mina N.P., O vliyanii kompleksonov na biosferu (On the effect of complexones on the biosphere), *Khimiya kompleksonov i ikh primenie*, Kalinin: Kalin. gos. un-t, 1986, pp. 15–17.
 12. Onosov D.V., Smetannikov A.F., Razrabotka tekhnologii kompleksnoi utilizatsii otkhodov pererabotki kaliino-magnievykh rud. (Development of a technology for the integrated utilization of potash and magnesium ore processing wastes), *Materialy nauchno-prakticheskoi konferentsii “GI UrO RAN”*, Perm': “GI UrO RAN”, 2014, pp. 167–171.
 13. Polynov B.B., *Kora vyvetrivaniya* (Weathering Bark), Leningrad: Izd-vo AN SSSR, 1934, 243 p.
 14. Sabirov R.R., Ignat'eva G.P., Seballo V.A., Issledovanie prochnostnykh svoistv granulirovannykh kaliinykh udobrenii (The study of the strength properties of granular potash fertilizers), *Obogashchenie rud*, 2005, No. 3, pp. 11–13.
 15. Sapozhnikov D.S., Perel'man A.I., Petrov V.P., *Geologiya i mineralogiya kory vyvetrivaniya* (Geology and mineralogy of the weathering crust), *Kora vyvetrivaniya*, Moscow: Nauka, 1970, Vol. 11, 280 p.
 16. Smetannikov A.F., Onosov D.V., Sinegribov V.A., Kosolapova A.I., Novikov P.Yu., *Sposob pererabotki otkhodov kaliinogo proizvodstva*, Patent

- RF №2497961 (A method of processing potash waste, patent No. 2497961), Perm', "GI UrO RAN", Application 2012142039, registered 10.11.2013.
17. Smetannikov A.F., Kosolapova A.I., Mitrofanova E.M., Bachurin B.A., Onosov D.V., Fomin D.S., Yamaltdinova V.R., Shishkov D.G., Onosova E.F., Rezul'taty ispytanii otkhodov pererabotki kaliino-magnievykh rud v kachestve udobrenii prolongirovannogo deistviya (Test results of waste potash-magnesium ore processing as fertilizers of prolonged action), *Vestnik PNTs*, 2017, No. 4, pp. 58–63.
18. Smetannikov A.F., Kosolapova A.I., Bachurin B.A., Onosov D.V., Fomin D.S., Yamaltdinova V.R., Shishkov D.G., Onosova E.F., Razrabotka metodologicheskogo podkhoda v primenenii kompleksnykh udobrenii prolongirovannogo deistviya dlya zernovykh kul'tur, mnogoletnikh trav i kartofelya (Development of a methodological approach to the application of complex fertilizers of prolonged action for crops, perennial herbs and potatoes), *Nauchnye chteniya pamyati P.N. Chirvinskogo*, 2018, No. 21, pp. 415–423.
19. Starovoitova O.A., Starovoitov V.I., Manokhina A.A., Vliyanie organicheskogo granulirovannogo udobreniya i rostoregulyatorov na kachestvo klubnei kartofelya (The effect of organic granular fertilizer and growth regulators on the quality of potato tubers), *Agrarnyi vestnik Verkhnevolzh'ya*, 2018, No. 2 (23), pp. 15–20.
20. Cuchiara C.C., Larré C.F., Peters J.A., The objective of this study was to evaluate the combined effects of copper (Cu) and zinc (Zn) on sweet potato plants based on morphological parameters, mineral profiles, and antioxidant metabolism, *Iheringia – Serie Botanica*, 2017, Vol. 72 (1), pp. 142–149, DOI: [10.21826/2446-8231201772113](https://doi.org/10.21826/2446-8231201772113).
21. Fernandes A.M., Soratto R.P., Silva B.L., Nutrient extraction and exportation by potato cultivars: I – Macronutrients, *Revista Brasileira de Ciencia do Solo*, 2011, Vol. 35 (6), pp. 2039–2056, DOI: [10.1590/S0100-06832011000600020](https://doi.org/10.1590/S0100-06832011000600020).
22. Hu P., Zhang Y., Wang X., Zhou Y., Tong W., Luan X., Ma X., Zhou F., Chu P.K., Zhao P., $K_2MgSi_3O_8$ in slow-release mineral fertilizer prepared by sintering of by-product of red mud-based flocculant, *Environmental Engineering Science*, 2018, Vol. 35 (8), pp. 829–835, DOI: [10.1089/ees.2017.0340](https://doi.org/10.1089/ees.2017.0340).
23. Li J., Zhuang X., Font O., Moreno N., Vallejo V.R., Querol X., Tobias A., Synthesis of merlinoite from Chinese coal fly ashes and its potential utilization as slow release K-fertilizer, *Journal of Hazardous Materials*, 2014, Vol. 265, pp. 242–252, DOI: [10.1016/j.jhazmat.2013.11.063](https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2013.11.063).
24. Ruthrof K.X., Steel E., Misra S., McComb J., O'Hara G., Hardy G.E.S.J., Howieson J., Transitioning from phosphate mining to agriculture: Responses

- to urea and slow release fertilizers for *Sorghum bicolor*, *Science of the Total Environment*, 2018, Vol. 625, pp. 1–7, DOI: [10.1016/j.scitotenv.2017.12.104](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.12.104).
25. Sharipova D.S., Aitbayev T.E., Tazhibayev T.S., Nacheva E.K., The impact of new and improved elements of agricultural technologies on potato productivity in the south-east of Kazakhstan, *Biosciences Biotechnology Research Asia*, 2016, Vol. 13 (2), pp. 1031–1036, DOI: [10.13005/bbra/2129](https://doi.org/10.13005/bbra/2129).
26. Soratto R.P., Fernandes A.M., de Souza-Schlick G.D., Nutrient extraction and exportation by potato cultivars: II – Micronutrients, *Revista Brasileira de Ciencia do Solo*, 2011, Vol. 35 (6), pp. 2057–2071, DOI: [10.1590/S0100-06832011000600021](https://doi.org/10.1590/S0100-06832011000600021).

УДК 579.26:631.46

DOI: 10.19047/0136-1694-2019-100-159-189

Ссылки для цитирования:

Кутовая О.В., Тхакахова А.К., Семенов М.В., Чернов Т.И., Ксенофонтова Н.А., Железова А.Д., Гаджиумаров Р.Г., Стукалов Р.С., Иванова Е.А., Никитин Д.А. Сравнительная оценка влияния нулевой и традиционной обработки на биологическую активность агрочерноземов Ставропольского края // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2019. Вып. 100. С. 159-189. DOI: 10.19047/0136-1694-2019-100-159-189

Cite this article as:

Kutovaya O.V., Tkhakakhova A.K., Semenov M.V., Chernov T.I., Ksenofontova N.A., Zhelezova A.D., Gadzhiumarov R.G., Stukalov R.S., Ivanova E.A., Nikitin D.A. Comparative evaluation of the influence of no-till and traditional treatment on the biological activity of agricultural chernozem of the Stavropol region, Dokuchaev Soil Bulletin, 2019, V. 100, pp. 159-189, DOI: 10.19047/0136-1694-2019-100-159-189

Сравнительная оценка влияния нулевой и традиционной обработки на биологическую активность агрочерноземов Ставропольского края

© 2019 г. О. В. Кутовая^{1*}, А. К. Тхакахова¹, М. В. Семенов¹,
Т. И. Чернов¹, Н. А. Ксенофонтова^{1,2}, А. Д. Железова¹,
Р. Г. Гаджиумаров³, Р. С. Стукалов³, Е. А. Иванова^{1,4},
Д. А. Никитин^{1**}

¹Почвенный институт им. В.В. Докучаева, Россия,
119017, Москва, Пыжевский пер, 7, стр. 2,
*e-mail: langobard@mail.ru,

**<https://orcid.org/0000-0002-8533-6536>, e-mail: dimmik90@mail.ru.

²МГУ им. М.В. Ломоносова, Россия,
119991, Москва, Ленинские горы, 1,

³Ставропольский государственный аграрный университет, Россия,
356243, Ставропольский край, г. Михайловск, ул. Парковая, 19.

⁴Агрофизический научно-исследовательский институт, Россия,
195220, Санкт-Петербург, Гражданский просп., д.14.

*Поступила в редакцию 19.09.2019, после доработки 01.11.2019,
принята к публикации 18.12.2019*

Резюме: С помощью метода посева на элективные питательные среды оценена численность и активность таксономических (бактерии, актиномицеты, микромицеты) и функциональных (азотфиксаторы, аммонификаторы, денитрификаторы амилолитики, целлюлолитики) групп микроорганизмов в агроцерноземах Ставропольского края под влиянием различных систем обработки почвы – прямого посева (no-till) и вспашки с оборотом пласта (традиционная обработка). Анализы проводили для вариантов с озимой пшеницей, кукурузой, подсолнечником и соей при внесении/отсутствии минеральных удобрений. Традиционная обработка почвы для большинства сельскохозяйственных культур приводит к росту активности аэробных аммонификаторов, целлюлолитиков, денитрификаторов, актиномицетов и микромицетов. Технология no-till, в свою очередь, повышает интенсивность анаэробных целлюлолитиков и азотфиксаторов, аэробных диазотрофов и амилолитиков. Наиболее отзывчивой культурой, под которой увеличивалась биологическая активность практически всех групп микроорганизмов на полях no-till, стала кукуруза, тогда как озимая пшеница повышала численность микроорганизмов при вспашке. Применение минеральных удобрений повышало биологическую активность почвы под подсолнечником при прямом посеве, в то время как при традиционной обработке значения данного параметра увеличивались на фоне отсутствия минеральных удобрений.

Ключевые слова: численность КОЕ, целлюлолитики, амилолитики, азотфиксаторы, денитрификаторы, бактерии, актиномицеты, микроскопические грибы, нулевая и традиционная обработка почвы.

Comparative evaluation of the influence of no-till and traditional treatment on the biological activity of agricultural chernozem of the Stavropol region

**O. V. Kutovaya^{1*}, A. K. Tkhakakhova¹, M. V. Semenov¹,
T. I. Chernov¹, N. A. Ksenofontova^{1,2}, A. D. Zhelezova¹,
R. G. Gadzhiumarov³, R. S. Stukalov³,
E. A. Ivanova^{1,4}, D. A. Nikitin^{1**},**

¹*V.V. Dokuchaev Soil Science Institute,
7 Bld. 2 Pyzhevskiy per., Moscow 2119017, Russian Federation,*

^{*}*e-mail: langobard@mail.ru,*
^{**}*<https://orcid.org/0000-0002-8533-6536>, e-mail: dimnik90@mail.ru.*

²*Lomonosov Moscow State University,
1 Leninskie Gori, Moscow 119234, Russian Federation.*

³*Stavropol State Agrarian University,
19 Parkovaya Str., Stavropol'skiy kray, g. Mikhaylovsk,
356243, Russian Federation.*

⁴*Agrophysical Research Institute,
14 Grazhdansky prosp., St. Petersburg 195220, Russian Federation.*

Received 19.05.2019, Revised 01.11.2019, Accepted 18.12.2019

Abstract: Using the method of inoculation on elective nutrient media, the abundance and activity of taxonomic (bacteria, actinomycetes, micromycetes) and functional (nitrogen fixers, ammonifiers, denitrifiers of amylolytic, cellulolytic) groups of microorganisms in agrochernozems of the Stavropol region under the influence of various tillage systems – direct seeding (no-till) and moldboard plowing with the turnover of soil horizon (traditional treatment). Analyzes were carried out for such crops as winter wheat, corn, sunflower and soybean with/without application of mineral fertilizers. Traditional tillage for the majority of crops leads to increased activity of aerobic ammonifiers, cellulolytics, denitrifiers, actinomycetes and micromycetes. No-till technology, in its turn, increases the intensity of anaerobic cellulolytics and nitrogen fixers, aerobic diazotrophs and amylolytics activity. The most responsive crop, under which the biological activity of almost all groups of microorganisms increased in the no-till variant, was corn, while winter wheat contributed to the increase in the number of microorganisms in the moldboard plowing variant. The use of mineral fertilizers provoked the growth of soil biological activity under sunflower sown directly in the soil, while conventional tillage resulted in higher soil biological activity without application of mineral fertilizers.

Keywords: CFU abundance, cellulolytics, amylolytics, nitrogen fixators, denitrifiers, bacteria, actinomycetes, microscopic fungi, zero and conventional tillage.

ВВЕДЕНИЕ

Обработка почвы значительно определяет ее физические, химические и агрономические свойства (Delgado, Gómez, 2016). В зависимости от используемой системы механической обработки меняется структура почвы, ее плотность, порозность, водно-

воздушный и тепловой режимы, что оказывает влияние на аэрацию и общую продуктивность гумусовых горизонтов. Уровень аэрации, в свою очередь, сказывается на преобладании тех или иных функциональных групп микроорганизмов, влияющих на формы и запасы биогенных элементов в почве, определяя при этом питание растений и в конечном итоге качество и количество получаемого урожая ([Shukla et al., 2017](#)).

Поскольку биологические свойства почвы прямо или косвенно влияют на выход сельскохозяйственной продукции, необходим анализ данных показателей в результате длительного применения той или иной технологии обработки почвы ([Liu et al., 2016](#)). Микробиологические показатели часто используют в целях биоиндикации, поскольку прокариоты и микромицеты наиболее чутко откликаются на большинство воздействий, которым подвергаются почвы ([Anderson, 2003](#)). Важно понимать, что разные типы обработки почвы создают порой диаметрально противоположные условия для сохранения влаги и доступности в ней кислорода ([Trojan, Linden, 1998](#)), что определяет преобладание аэробных или анаэробных групп микроорганизмов. Их соотношение может служить индикатором степени насыщенности почвы атмосферным воздухом, парциального давления кислорода, а также интенсивности таких важных биологических процессов, как азотфиксация, аммонификация (минерализация азота), нитратредукция и другие ([Добровольская и др., 2015](#); [Кутовая и др., 2016, 2018](#); [Marinkovic et al., 2018](#)). Традиционная обработка почвы с использованием вспашки с оборотом пласта резко усиливает интенсивность некоторых негативных, с точки зрения агропочковедения, микробиологических процессов (минерализацию азота и углерода), однако данных о влиянии технологии no-till на их сбалансированность в столь важных для сельского хозяйства почвах как черноземы, практически нет ([Беляева, 2013](#)).

Цель работы – изучение влияния длительного применения технологии прямого посева (no-till) на биологическую активность в агрочерноземах Ставропольского края.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Исследования проводили с образцами агрочерноземов, отобранных на территории опытного хозяйства ФГБНУ “Северо-Кавказский ФНАЦ” Шпаковского района Ставропольского края ([45°07'48" с. ш.; 42°01'39" в. д.](#)). Почва опытного участка – чернозем обыкновенный среднемощный слабогумусированный тяжелосуглинистый, сформировавшийся на лёссовидных карбонатных суглинках (Гаджиумаров, 2018). Пахотный горизонт характеризуется низким содержанием гумуса – 3.87% и нитратного азота (в момент отбора – 11.9 мг/кг), средним количеством подвижного фосфора – 18.7 мг/кг (по Мачигину) и средней обеспеченностью обменным калием – 245 мг/кг. Реакция почвенного раствора нейтральная – pH = 6.32. Вниз по профилю значения всех показателей постепенно уменьшаются: гумус – до 0.65% в горизонте С (126–175 см); N-NO₃ – до 0.5 мг/кг; P₂O₅ – до 3.4 мг/кг; K₂O – до 155 мг/кг; щелочность увеличивается в нижних слоях до pH = 8.3. Почвы опытных полей 7 лет возделывали с помощью традиционной обработки (вспашки с оборотом пласта) и по технологии прямого посева no-till. Повторность опыта трехкратная, площадь делянок 300 м² (50 м × 6 м), учетная – 90 м². Для полей обоих типов обработки вносили минеральные удобрения (N₆₀P₆₀K₆₀) перед посевом (175 кг/га нитроаммофоски) и с помощью сеялки при посеве (200 кг/га нитроаммофоски). Плотность почвы полей перед уборкой урожая в слое 0–10 см с традиционной обработкой составляла 1.23 г/см³, тогда как для полей no-till – 1.24 г/см³. Анализы проводили для вариантов с сельскохозяйственными культурами (оимая пшеница, кукуруза, подсолнечник, соя) при внесении/отсутствии минеральных удобрений. Контролем служила необрабатываемая залежная почва вблизи опытных полей. Отбор образцов проводили из слоя 0–10 см в октябре 2018 г. в 3-кратной повторности с необходимыми мерами по предотвращению контаминации (табл. 1). До анализов образцы хранились при температуре +4 °C.

Таблица 1. Список образцов, отобранных для микробиологического анализа

Table 1. List of samples taken for microbiological analysis

Обработка почвы	Культура	Удобрения
Минимальная, прямой посев (no-till)	кукуруза соя озимая пшеница подсолнечник	— + — + — + — +
Традиционная (вспашка с оборотом пла- ста)	кукуруза соя озимая пшеница подсолнечник	— + — + — + — +
Залежь	разнотравье	—

Микробиологический посев.

Определение численности и активности эколого-трофических групп микроорганизмов проводили методом посева на питательные среды: мясопептонный агар (МПА – для аммонификаторов и сапротрофных бактерий), крахмалоаммиачный агар (КАА – для амилолитиков), голодный агар (ГА – для олиготрофов), среду Чапека (ЧА – для оценки обилия сапротрофных микроскопических грибов), среду Гетчинсона (с бумажными дисками – для аэробных микромицетов целлюлозолитиков) ([Теппер и др., 2005](#)); активность азотобактера оценивали по обрастванию почвенных комочеков на среде Эшби ([Теппер и др., 2005](#)); методом предельных разведений ([Практикум по микробиологии..., 1976](#)) на жидких средах учитывали анаэробные азотфиксаторы (среда Виноградского), микроорганизмы группы нитратного дыхания (среда ГНД) ([Ильина, Фомина, 1983](#)), анаэробные целлюлозолитики – на среде Гетчинсона с бумажными полосками фильтровальной беззольной бумаги. Количественные показатели на жидких средах представлены в наиболее вероятном количестве клеток микроорганизмов (ККМ) в единице объема суспензии – 1 мл. Повторность каждого варианта посева пятикратная. Для приготовления почвенной суспензии брали 5 г свежей почвы и суспендировали в 50 мл стерильной дистиллированной воды. Десорбцию клеток микроорганизмов от почвенных частиц осуществляли путем обработки почвенной суспензии на вортексе “MSV-3500” (Латвия) при скорости 3500 об/мин в течение 10 мин. Для подавления роста бактерий в питательные среды Чапека и Гетчинсона добавляли порошок стрептомицина (100 мг/л).

В таблице 2 указаны составы питательных сред, используемых для микробиологического посева, разведения почвенной суспензии и сроки учета микроорганизмов. Статистическую обработку результатов проводили в программах STATISTICA 10.0 и Microsoft Excel 2016.

Таблица 2. Состав твердых и жидких сред, используемых для микробиологического посева
Table 2. Composition of solid and liquid media used for microbiological culture

Название среды	Состав среды на 1000 мл H ₂ O	Показатель разведения почвенной суспензии	Объем суспензии для посева	Сроки учета, сутки
МПА	Пептон сухой ферментированный – 10.0 г; экстракт мясной – 11.0 г; NaCl – 5.0 г; агар – 15.0 г.	3–5	100 мкл	3
КАА	Крахмало-аммиачный агар K ₂ HPO ₄ – 1.0 г; (NH ₄) ₂ SO ₄ – 2.0 г; MgSO ₄ – 1.0 г; NaCl – 1.0 г; CaCO ₃ – 3 г; растворимый крахмал – 10; агар – 20 г.	3–5	100 мкл	3, 5
Среда Гетчинсона	K ₂ HPO ₄ – 1.0 г; CaCl ₂ – 0.1 г; MgSO ₄ – 0.3 г; NaCl – 0.1 г; FeCl ₃ – 0.01 г; NaNO ₃ – 2.50 г; CaCO ₃ – 10 г; агар – 20 г. После застывания среды в чашках Петри перед посевом на поверхность среды кладут стерильную фильтровальную бумагу в качестве источника целлюлозы	1–3	1 мл	7, 14, 21
Среда Чапека	KH ₂ PO ₄ – 1.0 г; MgSO ₄ – 0.5 г; NaNO ₃ – 3.0 г; KCl – 0.5 г; сахароза – 30 г; FeSO ₄ – 0.01 г; агар – 20 г. Перед разливом по чашкам Петри в колбу с горячей средой добавляют стрептомицин.	2–4	200 мкл	7, 14, 21

Название среды	Состав среды на 1000 мл Н ₂ О	Показатель разведения почвенной суспензии	Объем суспензии для посева	Сроки учета, сутки
Голодный агар	Агар – 20 г	3–5	100 мкл	7, 14, 21
Среда Эшби	KH ₂ PO ₄ – 0.2 г; MgSO ₄ – 0.2 г; NaCl – 0.2 г; K ₂ SO ₄ – 0.1 г; CaCO ₃ – 3.0 г; маннит – 10-15 г; агар – 20 г.	По 25 комочеков обраствания на 2 чашки Петри готовят из 2 г почвы с увлажнением стерильной водой		10
Жидкая среда Виноградского	K ₂ HPO ₄ – 0.5 г; MgSO ₄ – 0.5 г; глюкоза – 15 г; NaCl – следы; FeSO ₄ – следы; MnSO ₄ – следы; в каждую пробирку перед разливом среды добавляют CaCO ₃ на кончике шпателя.	2–6	1 мл	3, 6, 10, 14
Жидкая среда ГНД	KH ₂ PO ₄ – 1,0 г; молочная кислота (80%) – 0.6 г; яблочная кислота – 0.5 г; C ₂ H ₃ O ₂ Na – 0.5 г; мясопептонный бульон – 100 мл; FeCl ₃ – 0.02 г; NaOH – 1.0 г; бромтимоловый синий – 10.0 мл.	2–11	1 мл	3, 6, 10, 14

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Микробиологические посевы

1. Азотфиксаторы

Среди живых существ только некоторые из прокариот, азотфиксаторы (диазотрофы), способны переводить молекулярный азот из воздуха в соединения, доступные для большинства организмов. Благодаря диазотрофам фиксированный азот может переходить в почвенное органическое вещество, увеличивая почвенное плодородие ([Добровольская и др., 2015](#)). Результаты активности аэробных азотфиксаторов представлены на рисунке 1.1.

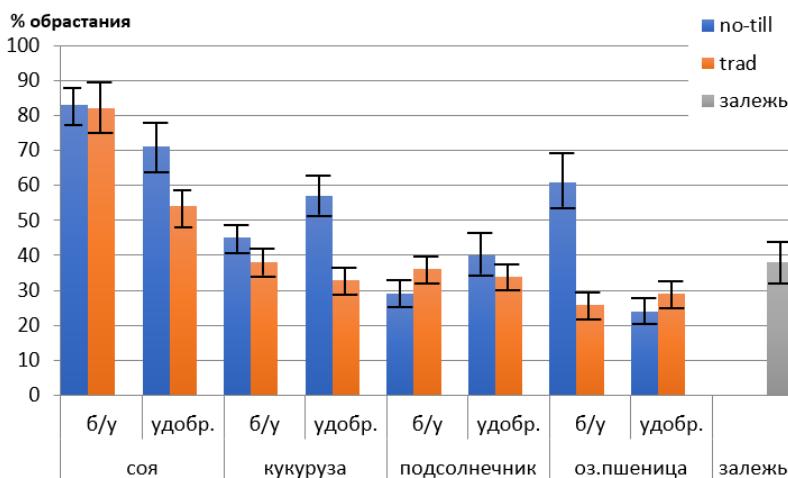


Рис. 1.1. Численность аэробных азотфиксаторов *Azotobacter* (среда Эшби) на опытах Северо-Кавказского ФНАЦ под разными культурами с применением минеральных удобрений и без них.

Fig. 1.1. Number of aerobic nitrogen fixers *Azotobacter* (Ashby medium) in the experiments of the North Caucasus FNAC under different crops with and without mineral fertilizers.

Минимальные значения обнаружены в образцах почвы под озимой пшеницей и подсолнечником, а максимальные – под соей, причем несколько большие значения характерны для полей с минимальной обработкой no-till. Исключение составляет

удобренный вариант озимой пшеницы и вариант подсолнечника без удобрений. Результаты согласуются с литературными источниками, демонстрирующими низкую долю аэробных азотфиксаторов под зерновыми, а высокую – под бобовыми культурами ([Кожемяков и др., 2004](#); [Добровольская и др., 2015](#); [Geddes et al., 2015](#)). Увеличение доли азотфиксаторов может косвенно свидетельствовать о повышении содержания в данных вариантах доступных для растений форм азота и, как следствие, сравнительно большим плодородием почв.

Количество анаэробных азотфиксаторов в исследованных образцах изменялось от 8.9×10^2 до 8.3×10^6 КОЕ/г почвы (рис. 1.2).

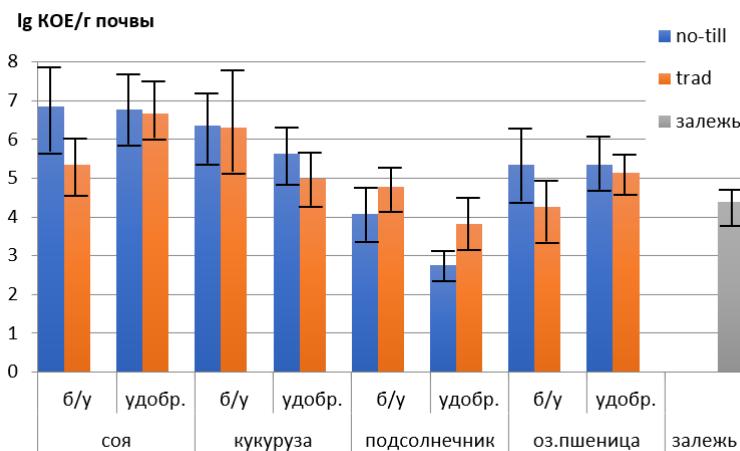


Рис. 1.2. Численность анаэробных азотфиксаторов (среда Виноградского) на опытах Северо-Кавказского ФНАЦ под разными культурами с применением минеральных удобрений и без них.

Fig. 1.2. The number of anaerobic nitrogen fixers (Vinogradskiy's medium) in the experiments of the North Caucasus FNAC under different crops with and without mineral fertilizers.

Минимальными показателями характеризуются варианты под подсолнечником при использовании no-till и внесении удобрений, а максимальными – под культурами сои и кукурузы

вне зависимости от обработки почвы и наличия удобрений. Это можно объяснить мощной стержневой корневой системой подсолнечника, проникающей на глубину до 1.5–3 м, которая обеспечивает значительную аэрацию ([Gregory, 2007](#); [Delgado, Gómez, 2016](#)). Необходимо также отметить, что культивируемые анаэробные азотфиксаторы, к которым относятся микроорганизмы рода *Clostridium*, более активны в вариантах с минимальной обработкой почвы no-till, за исключением подсолнечника.

2. Аммонификаторы

При аммонификации происходит минерализация азота из органических соединений, большая часть которого становится доступной растениям ([Добровольская и др., 2015](#)). Количество микроорганизмов этой неспецифической экологической группы является показателем интенсивности минерализации азота в почве ([Vlasova et al., 2015](#); [Marinkovic et al., 2018](#)).

Численность КОЕ аммонифицирующих бактерий на МПА в разных вариантах колебалась от 4.9×10^6 до 7.2×10^7 КОЕ/г почвы (рис. 2а), что соответствует результатам исследователей Ставропольского НИИСХ ([Фаизова и др., 2013](#)), а также данным по другим черноземным почвам ([Кутовая и др., 2018](#)). Минимум аммонифицирующих бактерий выявлен для вариантов полей с применением технологии no-till под кукурузой и подсолнечником без удобрений, а максимум – для полей с традиционной обработкой под кукурузой и озимой пшеницей без удобрений. Прослеживается общая тенденция уменьшения численности аммонификаторов при использовании минимальной обработки почвы, причем активность приближается к показателям образцов залежи, где процессы более консервативны, направлены на сохранение энергии и гумусовых веществ ([Шарков, 2011](#)). В большей степени этот процесс прослеживается под кукурузой, озимой пшеницей и подсолнечником без удобрений. Технология обработки почвы не повлияла на численность бактерий на среде МПА из образцов под соей. Эта сельскохозяйственная культура содержит много белка ([Marinkovic et al., 2018](#)), являющегося подходящим питательным субстратом для аммонификаторов независимо от локализации растительных остатков – на поверхности почвы в случае no-till или запаханными

в толщу обрабатываемого горизонта в случае вспашки. В зависимости от наличия/отсутствия удобрений численность аммонификаторов меняется незначительно (рис. 2). Внесение удобрений увеличило их активность в несколько раз под соей и более чем на порядок – под подсолнечником в системе минимальной обработки.

3. Денитрификаторы

Экологическая группа денитрификаторов приводит к восстановлению нитратов до закиси азота или молекулярного азота. Данный процесс обычно происходит при уменьшении содержания кислорода в почве (например, при снижении интенсивности обработки почвы) и приводит к потерям азота, что снижает уровень почвенного плодородия ([Добровольская и др., 2015](#)).

Для учета микроорганизмов группы нитратного дыхания выбран интегральный показатель, включающий в себя несколько факторов колониального роста: помутнение среды, изменение цвета (рН), эмиссия газа ([Ильина, Фомина, 1983](#)). Численность денитрификаторов для всех исследованных образцов сохраняла относительно высокий уровень вне зависимости от культуры, типа обработки почвы и внесения удобрения (рис. 3). Сходные результаты представлены коллегами ([Кутовая и др., 2016](#)). Максимальные значения характерны для делянок под подсолнечником, обрабатываемого по технологии no-till без удобрений. Значения показателей ниже, чем в остальных вариантах лишь в контроле на залежи и варианте “кукуруза – no-till – без удобрения”, что может быть связано с низким содержанием нитратов в указанных вариантах. Практически на всех точках отбора, кроме делянок с подсолнечником, процесс денитрификации снижен при использовании технологии no-till, по сравнению с традиционной обработкой почвы. Таким образом, можно предположить, что большие потери азота могут происходить при использовании вспашки с оборотом пласта. Однако возделываемая культура также влияет на интенсивность развития денитрификаторов ([Graf et al., 2016; Wang et al., 2017](#)). Значительное содержание соединений с анионом NO_3^- в почве, а также низкое парциальное давление кислорода приводит к инициации микроорганизмов группы нитратного дыхания и ак-

тивной денитрификации, что способствует потерям азота из почвы ([Graf et al., 2016](#); [Wang et al., 2017](#)).

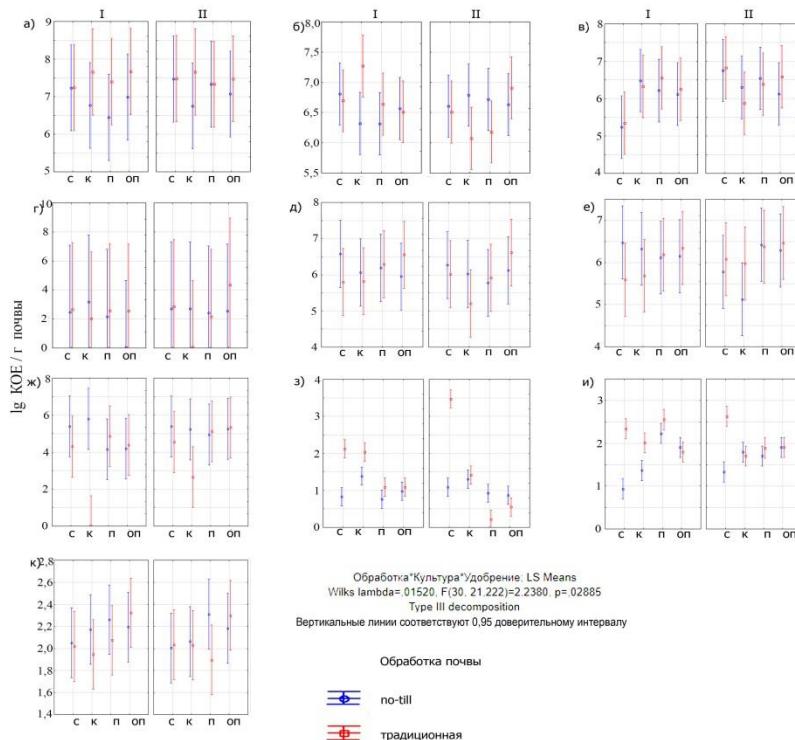


Рис. 2. Дисперсионный анализ численности КОЕ микроорганизмов различных эколого-трофических групп в зависимости от типа обработки почвы (no-till, традиционная), внесения удобрений (I – без удобрений, II – с расчетной дозой удобрений) и сельскохозяйственной культуры (с – сои, к – кукурузы, п – подсолнечника, оп – озимой пшеницы): **а**) – бактерий на среде МПА, **б**) – бактерий на среде КАА, **в**) – актиномицетов на среде КАА, **г**) – микромицетов на среде КАА, **д**) – бактерий на среде ГА, **е**) – актиномицетов на среде ГА, **ж**) – микромицетов на среде ГА, **з**) – микромицетов на среде Чапека, **и**) – микромицетов на среде Гетчинсона, **к**) – количество анаэробных целлюлозолитиков.

Fig. 2. Dispersion analysis of CFU number of microorganisms of various ecological and trophic groups depending on the type of tillage (no-till, traditional), fertilization (I – without fertilizers, II – with a calculated dose of fertilizers) and agricultural crop (с – soybean, к – corn, п – sunflower, оп – winter wheat): а) – bacteria grown on the meat infusion agar, б) – bacteria grown on starch-and-ammonia agar, в) – actinomycetes grown on starch-and-ammonia agar, г) – micromycetes grown on starch-and-ammonia agar, д) – bacteria grown on water agar, е) – actinomycetes grown on water agar, ж) – micromycetes grown on water agar, з) – micromycetes grown on Czapek's agar, и) – micromycetes grown on Getchinson's medium, к) – quantity of anaerobic cellulolytic bacteria.

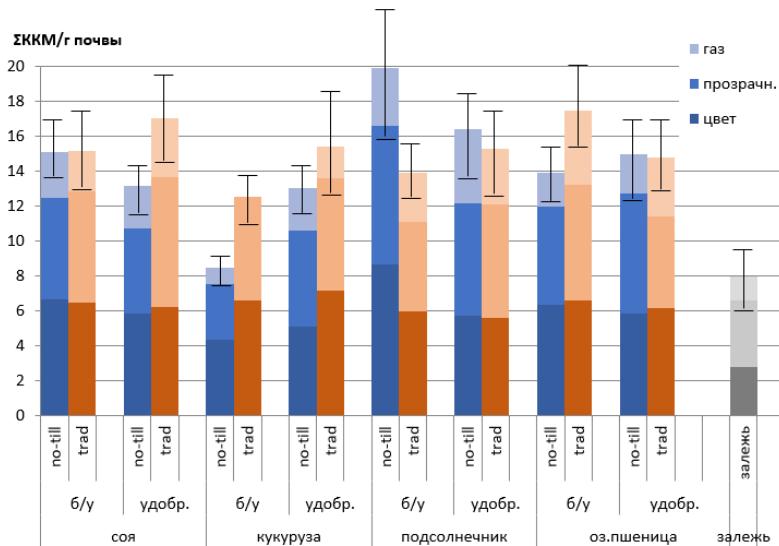


Рис. 3. Численность денитрификаторов (среда ГНД) на опытах Северо-Кавказского ФНАЦ под разными культурами с применением минеральных удобрений и без них.

Fig. 3. Number of denitrifiers (Nitrate Breathing Group medium, NBG medium) in the North Caucasus FNAC experiments under different crops with and without mineral fertilizers application.

4. Олиготрофные микроорганизмы

Органическое вещество в почве представлено остатками организмов, специфическими гумусовыми веществами и неспецифическими соединениями, в состав которых входят аминокислоты, белки, углеводы, моно- и полисахариды, лигнин, органические кислоты, липиды и многие другие соединения ([Lehmann, Kleber, 2015](#)). Органическое вещество распространено весьма неравномерно вследствие гетерогенности почвы. Часто оно недоступно для микроорганизмов из-за отсутствия достаточного количества влаги или необходимых ферментов ([Методы..., 1992](#)). Поэтому значительная часть почвенных микроорганизмов является олиготрофами ([Методы..., 1992](#); [Добровольская и др., 2015](#)). Часть из них способны усваивать целлюлозу и лигнин, разлагая их до более легкогидролизуемых соединений и гумусоподобных веществ, поэтому оценка их численности важна для сельскохозяйственной микробиологии ([Тихонович, Круглов, 2006](#)).

Большее количество КОЕ олиготрофных бактерий, культивируемых на среде ГА, в образцах составило от 9.8×10^4 до 5.7×10^6 КОЕ/г почвы, вне зависимости от сельскохозяйственной культуры, типа обработки почвы и внесения удобрений (рис. 2д). Такие значения достаточно высоки по сравнению с данными, полученными ранее для черноземной зоны ([Кутовая и др., 2016](#)). Достоверные различия обнаружены под озимой пшеницей, независимо от внесения удобрений: бактерий на ГА вырастало гораздо больше при использовании традиционной технологии, незначительное увеличение бактерий в вариантах при вспашке отмечено и под подсолнечником. Под культурами сои и кукурузы существенно увеличена активность олиготрофных бактерий в технологии прямого посева.

Многие актиномицеты являются олиготрофами ([Зенова и др., 2011](#)), их обилие и таксономический состав в почвах сельскохозяйственного использования часто зависит от возделываемых растений. Численность актиномицетов на ГА колебалась от 10^4 КОЕ/г почвы под кукурузой в системе no-till без удобрений до 10^7 КОЕ/г почвы под соей без удобрений также в системе no-till (рис. 2е).

Согласно результатам дисперсионного анализа, численность олиготрофных актиномицетов (рис. 2е) примерно одинакова в почвах под подсолнечником и озимой пшеницей и практически не меняется ни под воздействием обработки, ни при наличии минеральных удобрений. Тогда как под соей и кукурузой максимальные значения обнаружены при прямом посеве без внесения удобрений, а применение удобрений кардинально изменило картину – численность актиномицетов уменьшилась для полей no-till и увеличилась для пашни. Вероятно, отсутствие удобрений и недостаток элементов питания приводят к преобладанию олиготрофов, использующих растительные остатки на поверхности почвы в системе no-till.

Многие роды почвенных микроскопических грибов проявляют в сообществе олиготрофную стратегию ([Мирчинк, 1988](#); [Domsch et al., 2007](#)), поэтому их численность в большинстве проанализированных вариантов на ГА была весьма значительной и достигала 10^5 – 10^6 КОЕ/г почвы (рис. 2ж). Однако в образцах, отобранных под кукурузой в варианте с традиционной обработкой и внесением удобрений, количество грибных зачатков не превышало 10^2 КОЕ/г почвы, а без удобрений они обнаружены единично. Другие исследователи показывали снижение обилия микроскопических грибов в почве при традиционной обработке ([Irawan et al., 2017](#); [Schmidt et al., 2019](#)). В настоящих исследованиях вспашка с оборотом пласта повлияла на уменьшение количества микромицетов только под соей и кукурузой. В варианте с озимой пшеницей значимым фактором является применение минеральных удобрений: в случаях их отсутствия количество микроскопических грибов уменьшается как в вариантах со вспашкой, так и без нее, что также согласуется с литературными данными ([Fu et al., 2019](#)).

Количество КОЕ олиготрофных микромицетов достоверно выше только в варианте с кукурузой при технологии no-till (рис. 2ж), особенно без удобрений. Частоту численность микромицетов повышается в почве при внесении удобрений ([Семенов и др., 2019](#)). Увеличение численности микромицетов для делянок под соей при технологии прямого посева может быть связано с повышенным уровнем азота, продуцируемого бактериальными симбионтами бобовых ([Marinkovic et al., 2018](#)). Обилие олиготрофной

микробиоты под озимой пшеницей, вероятно, обусловлено сокращением численности копиотрофов при недостатке азота и других элементов питания для данных делянок, что подтверждается увеличением их численности при внесении минеральных удобрений почти на порядок независимо от технологии обработки почвы.

Экологическая роль микроскопических грибов в почве многогранна. Благодаря широкому набору ферментов данные организмы могут разлагать достаточно большой спектр органических веществ, при этом скорость данного процесса существенно превышает таковую по сравнению с бактериями в аэробных условиях. Процессы преобразования растительных остатков в почвенное органическое вещество и гумус также во многом определяются деятельностью микроскопических грибов ([Мирчинк, 1988](#); [Garrett, 2016](#)).

Общая численность культивируемых микромицетов в посевах исследованных почв (для индивидуального образца) на среде Чапека относительно невелика и составляла до 3.2×10^3 КОЕ/г почвы (рис. 2з). Наибольшее количество КОЕ отмечено в образцах с традиционной обработкой под культурами сои вне зависимости от внесения удобрений и кукурузы без удобрений. По-видимому, это может быть связано с культурой-предшественником на данных делянках, часто определяющей интенсивность развития микроорганизмов в полях ([Teotia et al., 2016](#)). Предшественником кукурузы в данном случае является подсолнечник, а сои – кукуруза, это пропашные культуры, оставляющие после уборки на поле достаточное количество пожнивных остатков, при запашке которых микромицеты могут активно развиваться ([Grebenikova et al., 2018](#)). На 2–3 порядка меньше численность культивируемых микроскопических грибов в остальных исследуемых вариантах полей. Минимум микромицетов отмечен для полей пшеницы и подсолнечника, особенно для почв, подвергающихся воздействию традиционной обработки с удобрениями. Отсутствие удобрений повлияло на увеличение численности микромицетов под всеми культурами на делянках с традиционной обработкой почвы. Отметим, что численность микроскопических грибов в целом ниже на среде Гетчинсона (в среднем от 0.6×10^2 КОЕ/г почвы, рис. 2и), чем на среде Чапека (в среднем 7.1×10^2 КОЕ/г почвы, рис. 2з).

Сапротрофный блок микромицетов в исследованных образцах представлен типичными почвенными родами: *Acremonium*, *Aspergillus*, *Aureobasidium*, *Cadophora*, *Coniothyrium*, *Cunninghamella*, *Epicoccum*, *Eurotium*, *Geotrichum*, *Metarhizium*, *Monilia*, *Mortierella*, *Mucor*, *Paecilomyces*, *Penicillium*, *Pseudogymnoas*, *Rhizopus*, *Sarocladium*, *Talaromyces*, *Trichoderma*, *Umbellopsis* и другими. Эта группа микроскопических грибов широко специализирована и может одинаково хорошо разлагать разнообразные типы субстрата – как сложные полисахариды (лигнин, целлюлозу и др.), так и легкодоступные органические вещества (сахара, аминокислоты и др.). В результате деятельности сапротрофных микромицетов разлагается большая часть отмерших растительных и животных остатков ([Domsch et al., 2007](#)), происходит минерализация органических веществ и образование гумуса, увеличивающего плодородие почвы ([Garrett et al., 2016](#); [Irawan et al., 2017](#)).

Фитопатогенные микромицеты, несмотря на широкую видовую представленность, были минорным компонентом сообщества, поскольку обладали крайне низкой численностью на грани погрешности (от 2.0×10^1 до 8.0×10^1 КОЕ/г почвы). Они представлены видами: *Alternaria tenuissima*, *Cladosporium* spp., *Cochliobolus lunatus*, *Fusarium poae*, *F. solani*, *Humicola fuscoatra*, *Phoma exigua*, *Ph. herbarum*, *Stachybotrys chartarum*, *Verticillium tenerum*. Фитопатогенные микромицеты являются естественным компонентом любой почвы, в том числе природной, поэтому обнаружены в минимальных количествах практически во всех вариантах полевого опыта независимо от технологии обработки, внесения удобрений и выращиваемой культуры.

5. Амилолитические микроорганизмы

Крахмал – один из наиболее распространенных полисахаридов в почве, содержащийся в значительных количествах в таких сельскохозяйственных растениях как кукуруза, картофель и другие ([Wang et al., 2015](#)). Судьба растительных остатков этих культур для агрочерноземов не вполне ясна ([Семенов и др., 2015](#)). Не известно, насколько полно и быстро они разлагаются, находясь на поверхности почвы или будучи запаханными в слое агрочернозема.

ма ([Турусов и др., 2017](#)). Для изучения этого вопроса исследовалась численность амилолитических микроорганизмов в образцах почвы.

Общая численность бактерий в различных вариантах на среде КАА варьировала в пределах одного порядка (рис. 2б). Максимальная численность амилолитиков (3.6×10^7 КОЕ/г почвы) отмечена в варианте под кукурузой при традиционной обработке и без внесения удобрений. Уменьшение количества амилолитиков отмечали на полях, обрабатываемых по традиционной технологии с внесением удобрений под соей, подсолнечником и особенно под кукурузой (1.3×10^6 КОЕ/г почвы), в последнем варианте численность микроорганизмов данной группы приближалась к таковой (минимальной) в фоновом биотопе – залежи (8.1×10^5 КОЕ/г почвы). По-видимому, снижение количества представителей данной эколого-трофической группы может быть обусловлено токсическим действием минеральных удобрений ([Geisseler, Scow, 2014](#)) под всеми культурами, кроме озимой пшеницы. Любопытно, что отрицательное действие удобрений на микроорганизмы-амилолитики при использовании минимальной обработки почвы нивелировано под всеми культурами, кроме пшеницы, где наблюдается небольшое стимулирующее действие, и численность бактерий, культивируемых на среде КАА, несколько возрастила. Подобный эффект отмечался в других исследованиях ([Geisseler, Scow, 2014](#)).

Дисперсионный анализ выявил достоверно большую численность амилолитических бактерий в варианте поля, обработанного традиционно без удобрений под кукурузой и в поле no-till с удобрениями также под кукурузой (рис. 2б). Данный факт можно объяснить тем, что в остатках кукурузы содержится достаточно много крахмала ([Wang et al., 2015](#)), являющегося субстратом для данной эколого-трофической группы микроорганизмов.

Среди бактерий-амилолитиков значительную долю составляли актиномицеты, играющие, благодаря мицелию, важную роль в формировании структуры почвы ([Зенова и др., 2011; Добровольская и др., 2015](#)). Их численность в различных вариантах на среде КАА варьировала в пределах трех порядков – от 1.0×10^4 до 4.4×10^7 КОЕ/г почвы (рис. 2в). Минимум выявлен в образцах почвы с

делянок сои без удобрений вне зависимости от технологии обработки почвы. Максимальная численность актиномицетов отмечена также под соей, но на полях с внесением удобрений. Также увеличение численности актиномицетов при внесении минеральных удобрений наблюдалось на делянках с подсолнечником при технологии no-till и с озимой пшеницей при вспашке. При выращивании пшеницы по технологии no-till эффекта от удобрений не наблюдали. Подобные закономерности для полей с обилием растительных остатков (мульчи) показаны и другими исследователями ([Fu et al., 2019](#)). Количество актиномицетов уменьшилось при внесении удобрений на полях с кукурузой независимо от способа обработки почвы, а также на делянках с подсолнечником при традиционной вспашке. Таким образом, не наблюдается четкой корреляции со способами обработки почвы и внесением удобрений, как показано в других исследованиях ([Семенов и др., 2019](#)), а наиболее значимым фактором выступают биологические особенности возделываемой культуры и ее корневой системы.

Судя по результатам дисперсионного анализа, численность амилолитических актиномицетов во всех вариантах под всеми культурами, кроме сои, практически одинакова и не связана с исследуемыми факторами (рис. 2). Имеются лишь тенденции к увеличению численности актиномицетов на полях с традиционной обработкой почвы под соей, подсолнечником и озимой пшеницей без внесения удобрений, а также на полях no-till под кукурузой без удобрений и под кукурузой и подсолнечником с удобрениями.

Численность микромицетов на среде КАА во всех исследованных образцах низка, и не превышает в среднем 10^3 – 10^4 КОЕ/г почвы, в большинстве образцов составляет 10^2 КОЕ/г почвы (рис. 2г). Максимальные значения численности микроскопических грибов, способных разлагать крахмал, соответствуют делянкам с кукурузой под минимальной обработкой без удобрений. Такое явление можно объяснить практически полным отсутствием фитопатогенных микромицетов для кукурузы, содержащей много крахмала ([Wang et al., 2015](#)). В остальных случаях на делянках no-till под соей, подсолнечником и озимой пшеницей минеральные удобрения увеличивали численность микромицетов. Показаны сходные результаты для полей с обилием растительной мульчи ([Fu et al.,](#)

2019). В образцах фонового биотопа залежи микромицетов-амилолитиков не выявлено.

Дисперсионный анализ для амилолитических микромицетов, так же как для актиномицетов, этой эколого-трофической группы не выявил достоверной разницы между рассматриваемыми вариантами, кроме единственного резкого превышения численности культивируемой микробиоты для поля под озимой пшеницей, обработанного традиционно независимо от удобрений (рис. 2г).

6. Целлюлолитические микроорганизмы

Целлюлоза – самый распространенный полисахарид в природе. Его запасы на полях, обрабатываемых по технологии no-till, могут быть весьма велики ([Кирюшин, 2013](#); [Железова и др., 2017](#); [Кутовая и др., 2018](#)). Однако преобладают ли на них фитопатогенные микроорганизмы или остатки быстро разлагаются типичными целлюлолитиками в агроочерноземе, не известно ([Железова и др., 2017](#)).

Аэробное целлюлолитическое сообщество исследованных образцов на селективной среде Гетчинсона представлено практически исключительно микроскопическими грибами *Chaetomium globosum*, *Doratomyces stemonitis*, *Oideodendron* sp., *Rhizopus stolonifer*, *Trichoderma* spp. Их общая численность мала во всех образцах – до 3.0×10^2 КОЕ/г почвы (рис. 2и). Максимум аэробных целлюлолитиков выявлен в посевах образцов почвы с делянок под соей, возделываемой по традиционной технологии вне зависимости от удобрений, а также в образцах почвы с делянок под подсолнечником без удобрений независимо от системы обработки почвы. Низкая целлюлолитическая активность в аэробных условиях может быть обусловлена относительно высоким содержанием в почве более питательных органических веществ – растительных остатков и корневых экссудатов, менее энергозатратных при их разложении и использовании микроорганизмами, а также удобрений, действующих токсично на часть целлюлозолитиков.

Целлюлолитическая активность в анаэробных условиях минимальна для образцов с делянок, где выращивали сою и кукурузу (рис. 2к). После уборки этих культур на полях остается мало растительных остатков, что, по-видимому, снижает численность и

активность в почве штаммов, разлагающих клетчатку ([Кутовая и др., 2016](#)). Более высокие значения деградации целлюлозы для no-till, где верхние слои почвы менее аэрированы ([Кирюшин, 2013](#); [Кутовая и др., 2018](#)), подтверждают данную гипотезу. Напротив, в почве под подсолнечником при отборе образцов выявлено значительное количество мульчи, что, в свою очередь, стимулировало развитие целлюлолитических микроорганизмов ([Fu et al., 2019](#)). Стоит отметить сравнительно большую величину анаэробной целлюлолитической активности на полях, обработанных по технологии no-till, практически во всех вариантах под всеми культурами, кроме озимой пшеницы. Такая закономерность может быть объяснена увеличением числа анаэробных зон и значительным количеством растительных остатков в почвах, обработанных по технологии no-till ([Кирюшин, 2013](#).)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Тип обработки почвы существенно влияет на биологическую активность черноземов и во многом определяет их агрономические свойства. Традиционная обработка почвы, по сравнению с no-till, приводит к увеличению численности аэробных аммонификаторов и целлюлолитиков, превращающих азот и углерод в доступную для растений форму. На вспаханных полях, по сравнению с минимально обработанными делянками, более активен процесс денитрификации, в результате которого происходит потеря азота из почвы. Также при этом типе почвенной обработки увеличивается количество актиномицетов, особенно при использовании минеральных удобрений, что связано со способностью большинства этих микроорганизмов развиваться в условиях повышенной концентрации солей. Кроме того, многие актиномицеты почв умеренной климатической зоны устойчивы к повышенным температурам и высушиванию почвы, поэтому в вариантах с традиционной обработкой они получили преимущество в росте. И напротив, минимальная технология обработки почвы, по сравнению со вспашкой, повышает активность анаэробных целлюлолитиков. На полях, обрабатываемых по технологии прямого посева, наблюдается максимальная численность азотфиксаторов, развивающихся как в аэробных, так и в анаэробных условиях, а также амилолити-

ков (особенно в вариантах с внесением удобрений), способных использовать для роста не только белковые, но и минеральные формы азота непосредственно из почвы.

Численность всех культивируемых микроорганизмов при длительном применении традиционной вспашки несколько увеличивается, что связано с лучшей аэрированностью пахотного горизонта. При этом поля, возделываемые с использованием традиционных приемов, содержат сравнительно меньшую долю фитопатогенных микромицетов, чем поля, где применяется no-till, что является важным для сельского хозяйства. Вместе с тем прямой посев, по сравнению со вспашкой, создает в почве большее количество микрозон с преимущественно анаэробными условиями и может нести риски вспышек фитопатогенных инфекций по сравнению с полями, обрабатываемыми традиционно. С другой стороны, повышение биологического разнообразия делает исследуемую почву под прямым посевом более устойчивой к факторам внешней среды, а уменьшение активности некоторых групп микроорганизмов приближает свойства почвы к консервативным природным черноземным почвам.

Полученные данные позволяют получить информацию о выраженности и направленности почвенно-биологических процессов в агрочерноземах в условиях применения технологии no-till при выращивании основных сельскохозяйственных культур. Показано, что биологическая активность практически всех групп микроорганизмов возрастает под кукурузой при технологии прямого посева, а под озимой пшеницей – при традиционной вспашке. Культура подсолнечника оказалась самой восприимчивой к внесению минеральных удобрений. Биологическая активность возрастила во вспаханных почвах в основном при отсутствии удобрений, тогда как для полей с применением технологии прямого посева их внесение не вызвало падение численности, а в вариантах с подсолнечником даже увеличило ее. Полагаем, что это может быть вызвано большим количеством углерода от растительных остатков, при обилии азота из удобрений на полях no-till.

Соотношения групп микроорганизмов можно использовать для оценки степени аэробных/анаэробных условий среды обитания в почвах степной зоны в условиях минимизации их обработки.

БЛАГОДАРНОСТЬ

Работа выполнена при поддержке Российского Научного Фонда, проект № 19-16-00053. Также благодарим д.с-х.н. Белоброва В.П. и д.с-х.н. Дридигера В.К. за помощь в выборе и характеристике объектов исследования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Беляева О.Н.* Система no-till и ее влияние на доступность азота почв и удобрений: обобщение опыта // Земледелие. 2013. № 7. С. 16–18.
2. *Добровольская Т.Г., Звягинцев Д.Г., Чернов И.Ю., Головченко А.В., Зенова Г.М., Лысак Л.В., Манучарова Н.А., Марфенина О.Е., Полянская Л.М., Степанов А.Л., Умаров М.М.* Роль микроорганизмов в экологических функциях почв // Почвоведение. 2015. № 9. С. 1087–1087. DOI: [10.7868/S0032180X15090038](https://doi.org/10.7868/S0032180X15090038).
3. *Железова С.В., Акимов Т.А., Белошапкина О.О., Березовский Е.В.* Влияние разных технологий возделывания озимой пшеницы на урожайность и фитосанитарное состояние посевов (на примере полевого опыта Центра точного земледелия РГАУ-МСХА им. КА Тимирязева) // Агрохимия. 2017. № 4. С. 65–75.
4. *Зенова Г.М., Манучарова Н.А., Звягинцев Д.Г.* Экстремофильные и экстремотолерантные актиномицеты в почвах разных типов // Почвоведение. 2011. № 4. С. 457–478.
5. *Ильина Т.К., Фомина О.М.* Авторское свидетельство № 113328а от 30.06.83. “Питательная среда для культивирования почвенных микроорганизмов”.
6. *Кирюшин В.И.* Проблема минимизации обработки почвы: перспективы развития и задачи исследований // Земледелие. 2013. № 7. С. 3–6.
7. *Кожемяков А.П., Проворов Н.А., Завалин А.А., Шотт П.Р.* Оценка взаимодействия сортов ячменя и пшеницы с ризосферными ростстимулирующими бактериями на различном азотном фоне // Агрохимия. 2004. № 3. С. 33–40.
8. *Кутовая О.В., Тхакахова А.К., Чевердин Ю.И.* Влияние поверхностного переувлажнения на биологические свойства лугово-черноземных почв Каменной Степи // Бюллетень Почвенного института им. В.В. Докучаева. 2016. Вып. 82. С. 56–70. DOI: [10.19047/0136-1694-2016-82-56-70](https://doi.org/10.19047/0136-1694-2016-82-56-70).
9. *Кутовая О.В., Гребенников А.М., Тхакахова А.К., Исаев В.А., Гармашов В.М., Беспалов В.А., Чевердин Ю.И., Белобров В.П.* Изменение

- почвенно-биологических процессов и структуры микробного сообщества агрочерноземов при Разных способах обработки почвы // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2018. Выпю 92. С. 35–61.
DOI: [10.19047/0136-1694-2018-92-35-61](https://doi.org/10.19047/0136-1694-2018-92-35-61).
10. Методы почвенной микробиологии и биохимии. Под ред. Д.Г. Звягинцева. М.: Изд-во МГУ, 1991. 304 с.
11. *Мирчинк Т.Г.* Почвенная микология. М.: Изд-во Московского университета, 1988. 220 с.
12. Практикум по микробиологии / Под ред. Егорова Н.С. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1976. 307 с.
13. *Семенов В.М., Когут Б.М., Степанов А.Л., Мамонтов В.Г.* Почвенное органическое вещество. 2015. 233 с.
14. *Семенов М.В., Никитин Д.А., Степанов А.Л., Семенов В.М.* Структура бактериальных и грибных сообществ ризосферного и внекорневого локусов серой лесной почвы // Почвоведение. 2019. № 3. С. 355–369.
DOI: [10.1134/S0032180X19010131](https://doi.org/10.1134/S0032180X19010131).
15. *Теппер Е.З., Шильникова В.К., Перееверзева Г.И.* Практикум по микробиологии. М.: Дрофа. 2005. 256 с.
16. *Тихонович И.А., Круглов Ю.В.* Микробиологические аспекты плодородия почвы и проблемы устойчивого земледелия // Плодородие. 2006. № 5. С. 9–12.
17. *Турусов В.И., Гармашов В.М., Нужная Н.А.* Засоренность посевов при разных приемах и системах основной обработки почвы в севообороте // Защита и карантин растений. 2017. № 9. С. 19–21.
18. *Фаизова В.И., Цховребов В.С., Калугин Д.В., Никифорова А.М.* Влияние распашки черноземов Центрального Предкавказья на численность аммонификаторов // Вестник АПК Ставрополья. 2013. № 4. С. 198–202.
19. *Шарков И.Н.* Концепция воспроизводства гумуса в почвах // Агрохимия. 2011. № 12. С. 21–27.
20. *Anderson T.H.* Microbial eco-physiological indicators to asses soil quality // Agriculture, Ecosystems & Environment. 2003. Vol. 98 (1–3). P. 285–293.
21. *Anderson R.L.* Diversity and No-till: keys for pest management in the U/S/Great Plains // Weed Science. 2008. Vol. 56. P. 141–145.
22. *Delgado A., Gómez J.A.* The soil. Physical, chemical and biological properties // Principles of Agronomy for Sustainable Agriculture. Springer, Cham. 2016. P. 15–26.
23. *Domsch K.H., Gams W., Anderson T.-H.* Compendium of soil fungi, 2nd taxonomically revised edition by W. Gams. Eching: IHW-Verlag, 2007. 627 p.

24. *Fu X., Wang J., Sainju U.M., Zhao F., Liu W.* 2019. Soil microbial community and carbon and nitrogen fractions responses to mulching under winter wheat // *Applied Soil Ecology*. Vol. 139. P. 64–68.
25. *Garrett S.D.* Soil fungi and soil fertility: an introduction to soil mycology. Elsevier: Pergamon press, 2016. 147 p.
26. *Geddes B.A., Ryu M.H., Mus F., Costas A.G., Peters J.W., Voigt C.A., Poole P.* Use of plant colonizing bacteria as chassis for transfer of N₂-fixation to cereals // *Current opinion in biotechnology*. 2015. Vol. 32. P. 216–222.
27. *Geisseler D., Scow K.M.* Long-term effects of mineral fertilizers on soil microorganisms – A review // *Soil Biology and Biochemistry*. 2014. Vol. 75. P. 54–63.
28. *Graf D.R., Zhao M., Jones C.M., Hallin S.* Soil type overrides plant effect on genetic and enzymatic N₂O production potential in arable soils // *Soil Biology and Biochemistry*. 2016. Vol. 100. P. 125–128.
29. *Grebennikova N., Korshunov A., Savchenko I., Marques M.* Root rot grain crops on Cereals caused by the phytopathogenic fungi / MATEC Web of Conferences. EDP Sciences. 2018. Vol. 245. No. 11006. DOI: [10.1051/matecconf/201824511006](https://doi.org/10.1051/matecconf/201824511006).
30. *Gregory P.* Plant roots. John Wiley & Sons, Limited. 2007. 318 p.
31. *Irawan B., Afandi A., Hadi S.* Effects of saprophytic microfungi application on soil fertility based on their decomposition properties // *Journal of Applied Biological Sciences*. 2017. Vol. 2. P. 15–19.
32. *Lehmann J., Kleber M.* The contentious nature of soil organic matter // *Nature*. 2015. Vol. 528 (7580). P. 60–68.
33. *Liu H., Crawford M., Carvalhais L.C., Dang Y.P., Dennis P.G., Schenk P.M.* Strategic tillage on a Grey Vertosol after fifteen years of no-till management had no short-term impact on soil properties and agronomic productivity // *Geoderma*. 2016. Vol. 267. P. 146–155.
34. *Marinkovic J., Bjelic D., Tintor B., Miladinovic J., Dukic V., Dorđevic V.* Effects of soybean co-inoculation with plant growth promoting rhizobacteria in field trial // *Romanian Biotechnological Letters*. 2018. Vol. 23 (2). No. 13401.
35. *Schmidt R., Mitchell J., Scow K.* Cover cropping and no-till increase diversity and symbiotroph: saprotroph ratios of soil fungal communities // *Soil Biology and Biochemistry*. 2019. Vol. 129, P. 99–109.
36. *Shukla S.K., Yadav R.L., Awasthi S.K., Gaur A.* Soil microbial biomass nitrogen, in situ respiration and crop yield influenced by deep tillage, moisture regimes and N nutrition in sugarcane-based system in subtropical India // *Sugar Tech*. 2017. Vol. 19 (2). P. 125–135.
37. *Teotia P., Kumar V., Kumar M., Shrivastava N., Varma A.* Rhizosphere Microbes: Potassium Solubilization and Crop Productivity – Present and

- Future Aspects. In: Potassium solubilizing microorganisms for sustainable agriculture. Springer, New Delhi. 2016. P. 315–325.
38. Trojan M.D., Linden D.R. Macroporosity and hydraulic properties of earthworm-affected soils as influenced by tillage and residue management // Soil Science Society of America Journal. 1998. Vol. 62 (6). P. 1687–1692.
39. Vlasova O.I., Perederieva V.M., Volters I.A., Tivikov A.I., Trubacheva L.V. Change in microbiological activity under the effect of biological factors of soil fertility in the central fore-caucasus chernozems // Biol Med (Aligarh). 2015. Vol. 7:5.
40. Wang S., Li C., Copeland L., Niu Q., Wang, S. Starch retrogradation: A comprehensive review // Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety. 2015. Vol. 14 (5). P. 568–585.
41. Wang Y., Li C., Tu C., Hoyt G.D., DeForest J.L., Hu S. Long-term no-tillage and organic input management enhanced the diversity and stability of soil microbial community // Science of The Total Environment. 2017. Vol. 609. P. 341–347.

REFERENCES

1. Belyaeva O.N., Sistema no-till i ee vliyanie na dostupnost' azota pochv i udobreniy: obobshchenie opyta (The no-till system and its effect on the availability of soil and fertilizer nitrogen: a generalization of experience), *Zemledelie*, 2013, Vol. 7, pp. 16–18
2. Dobrovolskaya T.G., Zvyagintsev D.G., Chernov I.Y., Golovchenko A.V., Zenova G.M., Lysak L.V., Manucharova N.A., Marfenina O.E., Polyanskaya L.M., Stepanov A.L., Umarov M.M., Rol' mikroorganizmov v ekologicheskikh funktsiyakh pochv (The role of microorganisms in the ecological functions of soils), *Eurasian soil science*, 2015, Vol. 48 (9), pp. 959–967, DOI: [10.7868/S0032180X15090038](https://doi.org/10.7868/S0032180X15090038).
3. Zhelezova S.V., Akimov T.A., Beloshapkina O.O., Berezovsky E.V., Vliyanie raznykh tekhnologiy vozdelivaniya ozimoy pshenitsy na urozhaynost' i fitosanitarnoe sostoyanie posevov (na primere polevogo opyta Tsentra tochnogo zemledeliya RGAU-MSKhA im. KA Timiryazeva) (The influence of different technologies of winter wheat cultivation on yield and phytosanitary condition of crops (on the example of field experience of the Center for Precision Agriculture of the RSAU-Moscow Agricultural Academy named after KA Timiryazev)), *Agrohimiya*, 2017, Vol. 4, pp. 65–75.
4. Zenova G.M., Manucharova N.A., Zvyagintsev D.G., Ekstremofil'nye i ekstremotolerantnye aktinomitsety v pochvakh raznykh tipov (Extremophilic and extremotolerant actinomycetes in different soil types), *Eurasian soil science*, 2011, Vol. 44 (4), pp. 417–436, DOI: [10.1134/S1064229311040132](https://doi.org/10.1134/S1064229311040132).

5. Ilyina T.K., Fomina O.M., Copyright certificate № 113328a of June 30, 83. "Nutrient medium for the cultivation of soil microorganisms".
6. Kiryushin V.I., Problema minimizatsii obrabotki pochvy: perspektivy razvitiya i zadachi issledovaniy (The problem of minimizing soil tillage: development prospects and research objectives), *Zemledelie*, 2013, Vol 1, pp. 5–14.
7. Kozhemyakov A.P., Provorov N.A., Zavalin A.A., Schott P.R., Otsenka vzaimodeystviya sortov yachmenya i pshenitsy s rizosfernymi roststimuliruyushchimi bakteriyami na razlichnom azotnom fone (Evaluation of the interaction of barley and wheat varieties with rhizospheric growth-promoting bacteria on different nitrogen backgrounds), *Agrohimiya*, 2004, Vol. 3, pp. 33–40.
8. Kutowaya O.V., Tkakakhova AK, Cheverdin Yu.I., The effect of surface waterlogging on the biological properties of meadow-chernozem soils of the Kamennaya Steppe, *Dokuchaev Soil Bulletin*, 2016, Vol. 82, pp. 56–70. DOI: [10.19047/0136-1694-2016-82-56-70](https://doi.org/10.19047/0136-1694-2016-82-56-70).
9. Kutowaya O.V., Grebennikov A.M., Tkakakhova A.K., Isaev V.A., Garmashov V.M., Bespalov V.A., Cheverdin Yu.I., Belobrov V.P. Changes in soil-biological processes and the structure of the microbial community of agro-chernozems with different methods of tillage, *Dokuchaev Soil Bulletin*, 2018, Vol. 92, pp. 35–61, DOI: [10.19047/0136-1694-2018-92-35-61](https://doi.org/10.19047/0136-1694-2018-92-35-61).
10. Zvyagintsev D.G., *Metody pochvennoy mikrobiologii i biokhimii* (Methods of soil microbiology and biochemistry), Moscow: Izd-vo MGU, 1991, 304 p.
11. Mircink T.G., *Pochvennaya mikrobiologiya* (Soil mycology), Moscow: Izd-vo MGU, 1988, 220 p.
12. Egorov N.S., *Praktikum po mikrobiologii* (Workshop on Microbiology), Moscow: Izd-vo MGU, 1976, 307 p.
13. Semenov V.M., Kogut B.M., Stepanov A.L., Mamontov V.G., *Pochvennoe organicheskoe veshchestvo* (Soil organic matter), 2015, 233 p.
14. Semenov M.V., Nikitin D.A., Stepanov A.L., Semenov V.M., Struktura bakterial'nykh i gribnykh soobshchestv rizosfernogo i vnekornevogo lokusov seroy lesnoy pochvy (The structure of bacterial and fungal communities in the rhizosphere and root-free loci of gray forest soil), *Eurasian Soil Science*, 2019, Vol. 52 (3), 319–332 pp., DOI: [10.1134/S0032180X19010131](https://doi.org/10.1134/S0032180X19010131).
15. Tepper E.Z., Shilnikova V.K., Pereverzova G.I., *Praktikum po mikrobiologii* (Workshop on microbiology), Moscow: Drofa, 2005, 256 p.
16. Tikhonovich I.A., Kruglov Yu.V., Mikrobiologicheskie aspekty plodorodiya pochvy i problemy ustoychivogo zemledeliya (Microbiological aspects of soil fertility and sustainable agriculture), *Plodorodie*, 2006, Vol. 5, pp. 9–12.

17. Turusov V.I., Garmashov V.M., Nuzhna N.A., Zasorennost' posevov pri raznykh priemakh i sistemakh osnovnoy obrabotki pochvy v sevooborote (Crop weed infestation with different methods and systems of primary tillage in crop rotation), *Zaschita I karantin rasteniy*, 2017, Vol. 9, pp. 19–21.
18. Faizova V.I., Tskhovrebov V.S., Kalugin D.V., Nikiforova A.M., Vliyanie raspashki chernozemov Tsentral'nogo Predkavkaz'ya na chislennost' ammonifikatorov (The influence of plowing chernozems of the Central Ciscaucasia on the number of ammonifiers), *Vestnik APK Stavropoliya*, 2013, Vol. 4, pp. 198–202.
19. Sharkov I.N., Kontsepsiya vospriyvoda gumusa v pochvakh (The concept of reproduction of humus in soils), *Agrokhimiya*, 2011, Vol. 12, pp. 21–27.
20. Anderson T.H., Microbial eco-physiological indicators to asses soil quality, *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2003, Vol. 98 (1–3), pp. 285–293.
21. Anderson R.L., Diversity and No-till: keys for pest management in the U/S/ Great Plains, *Weed Science*, 2008, Vol. 56, pp. 141–145.
22. Delgado A., Gómez J.A., The soil. Physical, chemical and biological properties, *Principles of Agronomy for Sustainable Agriculture*, Springer, Cham, 2016, pp. 15–26.
23. Domsch K.H., Gams W., Anderson T.-H., *Compendium of soil fungi*, 2nd taxonomically revised edition by W. Gams, Eching: IHW-Verlag, 2007, 627 p.
24. Fu X., Wang J., Sainju U.M., Zhao F., Liu W., Soil microbial community and carbon and nitrogen fractions responses to mulching under winter wheat, *Applied Soil Ecology*, 2019, Vol. 139, pp. 64–68.
25. Garrett S.D., *Soil fungi and soil fertility: an introduction to soil mycology*, Elsevier, Pergamon press, 2016, 147 p.
26. Geddes B.A., Ryu M.H., Mus F., Costas A.G., Peters J.W., Voigt C.A., Poole P., Use of plant colonizing bacteria as chassis for transfer of N₂-fixation to cereals, *Current opinion in biotechnology*, 2015, Vol. 32, pp. 216–222.
27. Geisseler D., Scow K.M., Long-term effects of mineral fertilizers on soil microorganisms – A review, *Soil Biology and Biochemistry*, 2014, Vol. 75, pp. 54–63.
28. Graf D.R., Zhao M., Jones C.M., Hallin S., Soil type overrides plant effect on genetic and enzymatic N₂O production potential in arable soils, *Soil Biology and Biochemistry*, 2016, Vol. 100, pp. 125–128.
29. Grebenikova N., Korshunov A., Savchenko I., Marques M., Root rot grain crops on Cereals caused by the phytopathogenic fungi, *MATEC Web of Conferences*, EDP Sciences, 2018, Vol. 245, No. 11006.
30. Gregory P., *Plant roots*, John Wiley & Sons, Limited, 2007, 318 p.
31. Irawan B., Afandi A., Hadi S., Effects of saprophytic microfungi

- application on soil fertility based on their decomposition properties, *Journal of Applied Biological Sciences*, 2017, Vol. 2, pp. 15–19.
32. Lehmann J., Kleber M., The contentious nature of soil organic matter, *Nature*, 2015, Vol. 528 (7580), pp. 60–68.
33. Liu H., Crawford M., Carvalhais L.C., Dang Y.P., Dennis P.G., Schenk P.M., Strategic tillage on a Grey Vertosol after fifteen years of no-till management had no short-term impact on soil properties and agronomic productivity, *Geoderma*, 2016, Vol. 267, pp. 146–155.
34. Marinkovic J., Bjelic D., Tintor B., Miladinovic J., Dukic V., Dorđevic V., Effects of soybean co-inoculation with plant growth promoting rhizobacteria in field trial, *Romanian Biotechnological Letters*, 2018, Vol. 23 (2), No. 13401.
35. Schmidt R., Mitchell J., Scow K. Cover cropping and no-till increase diversity and symbiotroph: saprotroph ratios of soil fungal communities, *Soil Biology and Biochemistry*, 2019, Vol. 129, pp. 99–109.
36. Shukla S.K., Yadav R.L., Awasthi S.K., Gaur A., Soil microbial biomass nitrogen, in situ respiration and crop yield influenced by deep tillage, moisture regimes and N nutrition in sugarcane-based system in subtropical India, *Sugar Tech*, 2017, Vol. 19 (2), pp. 125–135.
37. Teotia P., Kumar V., Kumar M., Shrivastava N., Varma A., Rhizosphere Microbes: Potassium Solubilization and Crop Productivity—Present and Future Aspects, In: *Potassium solubilizing microorganisms for sustainable agriculture*, Springer, New Delhi, 2016, pp. 315–325.
38. Trojan M.D., Linden D.R., Macroporosity and hydraulic properties of earthworm-affected soils as influenced by tillage and residue management, *Soil Science Society of America Journal*, 1998, Vol. 62 (6), pp. 1687–1692.
39. Vlasova O.I., Perederieva V.M., Volters I.A., Tivikov A.I., Trubacheva L.V., Change in microbiological activity under the effect of biological factors of soil fertility in the central fore-caucasus chernozems, *Biol Med (Aligarh)*, 2015, Vol. 7:5.
40. Wang S., Li C., Copeland L., Niu Q., Wang S., Starch retrogradation: A comprehensive review, *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 2015, Vol. 14 (5), pp. 568–585.
41. Wang Y., Li C., Tu C., Hoyt G.D., DeForest J.L., Hu S., Long-term no-tillage and organic input management enhanced the diversity and stability of soil microbial community, *Science of The Total Environment*, 2017, Vol. 609, pp. 341–347.

Научное издание

Бюллетень Почвенного института
имени В.В. Докучаева

юбилейный выпуск
100

Главный редактор *А.Л. Иванов*

Заместитель главного редактора *И.Ю. Савин*

Редактор, компьютерная верстка *А.Ю. Романовская*

Федеральное государственное бюджетное научное учреждение
Почвенный институт имени В.В. Докучаева
119017, Москва, Пыжевский пер., 7, стр. 2
<https://bulletin.esoil.ru>
e-mail: bulletin@esoil.ru

Сдано в набор 24.12.2019 г.
Подписано в печать 24.12.2019 г.
Формат 60×84/16. Бумага офсетная.
Усл. печ. л. 11,1 Тираж 75 экз. Заказ №

Цена договорная.

Отпечатано с готового макета по заказу
Почвенного института имени В.В. Докучаева
ИП Ерховой И.М. (ОГРНИП 319774600080241)
Тел. (495) 799-48-85
e-mail: apr-rpa@list.ru