

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

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

БЮЛЛЕТЕНЬ
ПОЧВЕННОГО ИНСТИТУТА
имени В.В. ДОКУЧАЕВА

ВЫПУСК 99

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)**

Volume 99

**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 Стелленбош, 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)
Чендев 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. Пушкирова, 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 (Stellenbosh 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)

© ФГБНУ Почвенный институт им. В.В. Докучаева, 2019 г.

© V.V. Dokuchaev Soil Science Institute, 2019

СОДЕРЖАНИЕ

Использование ГИС для агрохимической характеристики почв и засоренности полей Гребневского питомника Щелковского учебно-опытного лесхоза

*Мартыненко О.В., Карминов В.Н., Югай Е.С.,
Мутыгуллин И.Р., Онтиков П.В.* 5

Построение цифровых моделей почвенного покрова западной части Большеземельской тундры

Векина В.Н. 21

Факторы засоления почв участков “Червленое” и “Дубоовражный” Светлоярской оросительной системы

Кравченко Е.И. 47

Морфологические свойства подводных почв речных дельт

Ткаченко А.Н., Козачук М.Н., Ткаченко О.В. 62

Оценка адекватности модели стока и температуры в Больших лизиметрах почвенного стационара МГУ

*Шишкин К.В., Белик А.А.,
Кокорева А.А., Ежелев З.С.* 76

Гетерогенность свойств копролитов дождевых червей *Aporrectodea caliginosa* и *Lumbricus rubellus* в модельном опыте на черноземе

Фролов О.А., Якушев А.В., Милановский Е.Ю. 92

Влияние способа сельскохозяйственной обработки на микробиологические характеристики дерново-подзолистой почвы

*Железова А.Д., Пассова Д.И., Никитин Д.А.,
Яшин М.А., Железова С.В.* 117

Состав, свойства и особенности плодородия красной ферраллитной почвы пятилетней залежи в Республике Чад

*Якума Е.Г., Кой К., Азовцева Н.А.,
Пивень Е.А., Шуравилин А.В.* 145

CONTENTS

The use of GIS for agrochemical soil characteristics and weed infestation of Grebnevskiy nursery of Shchelkovskiy teaching and experimental forestry <i>Martynenko O.V., Karminov V.N., Yugaj E.S., Mutygullin I.R., Ontikov P.V.</i>	5
The development of digital models of the soil cover in the western part of Bol'shezemel'skaya tundra <i>Vekshina V.N.</i>	21
Agents of soil salinization in "Chervlenoe" and "Dubovrazhniy" plots of the Svetloyarsk irrigation system <i>Kravchenko E.I.</i>	47
Morphological properties of underwater soils of river deltas <i>Tkachenko A.N., Kozachuk M.N., Tkachenko O.V.</i>	62
Adequateness assesment of percolate and temperature model using MSU Large lysimeters <i>Shishkin K.V., Belik A.A., Kokoreva A.A., Ezhelev Z.S.</i>	76
The heterogeneity of the properties of the coprolites <i>Aporrectodea caliginosa</i> and <i>Lumbricus rubellus</i> in model experiment with chernozem soil <i>Frolov O.A., Yakushev A.V., Milanovskiy E.Yu.</i>	92
The influence of agricultural treatment type on the microbial properties of sod-podzolic soil <i>Zhelezova A.D., Passova D.I., Nikitin D.A., Yashin M.A., Zhelezova S.V.</i>	117
Evaluation of the composition, properties and fertility of Haplic Ferralsol on the fields abandoned for five years in the Republic of Chad <i>Yakouma E.G., Koy K., Azovtseva N.A., Piven E.A., Shuravilin A.V.</i>	145

УДК 631.42

DOI: 10.19047/0136-1694-2019-99-5-20

Ссылки для цитирования:

Мартыненко О.В., Карминов В.Н., Югай Е.С., Мутыгуллин И.Р., Онтиков П.В. Использование ГИС для агрохимической характеристики почв и засоренности полей Гребневского питомника Щелковского учебно-опытного лесхоза // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2019. Вып. 99. С. 5-20. DOI: 10.19047/0136-1694-2019-99-5-20

Cite this article as:

Martynenko O.V., Karminov V.N., Yugaj E.S., Mutygullin I.R., Ontikov P.V., The use of GIS for agrochemical soil characteristics and weed infestation of Grebnevskiy nursery of Shchelkovskiy teaching and experimental forestry, Dokuchaev Soil Bulletin, 2019, V. 99, pp. 5-20, DOI: 10.19047/0136-1694-2019-99-5-20

Использование ГИС для агрохимической характеристики почв и засоренности полей Гребневского питомника Щелковского учебно-опытного лесхоза

© 2019 г. О. В. Мартыненко^{*}, В. Н. Карминов^{**},
Е. С. Югай^{***}, И. Р. Мутыгуллин^{****}, П. В. Онтиков^{*****}

*Мытищинский филиал МГТУ им. Н.Э. Баумана, Россия,
141005, Мытищи, ул. 1-я Институтская, 1,*

^{*}<https://orcid.org/0000-0001-8927-1082>, e-mail: martinen@mgul.ac.ru,

^{**}<https://orcid.org/0000-0002-9298-956X>, e-mail: vnk57@yandex.ru,

^{***}<https://orcid.org/0000-0003-4863-5796>, e-mail: yugaj1998@mail.ru,

^{****}<https://orcid.org/0000-0002-0922-9261>, e-mail: iskyan13@icloud.com,

^{*****}<https://orcid.org/0000-0001-5636-8603>, e-mail: opv86@mail.ru.

*Поступила в редакцию 30.05.2019, после доработки 30.06.2019,
принята к публикации 21.11.2019*

Резюме: В статье рассмотрены особенности почвенно-агрохимического обследования территории питомника с применением геоинформационных технологий. Целью данной работы являлось проведение обследования пахотных дерново-подзолистых средне- или легкосуглинистых почв территории лесного питомника, а также учета засоренности производственных площадей сорными растениями. Особенность данного исследования заключалась в том, что процесс

сбора, систематизации и обработки всей получаемой информации был ориентирован на применение современных геоинформационных технологий. Выбор точек обследования осуществлялся по согласованию с администрацией питомника и корректировался по актуальному космоснимкам. Географическая привязка точек опробования осуществлялась с применением технологий глобального позиционирования (GPS, ГЛОНАСС) на базе мобильного приложения NextGIS (ОС Андроид). Фотофиксация полей питомника осуществлялась с применением технологий геотегирования, благодаря которым получаемую графическую информацию можно непосредственно внедрять и визуализировать в среде геоинформационной системы (ГИС). Отобранные в полевых условиях образцы анализировались в почвенной лаборатории по основным показателям почвенного плодородия. На основании полученных данных средствами ГИС были построены картограммы обеспеченности полей питомника основными элементами питания и важнейшими показателями, характеризующими состояние почвенного поглощающего комплекса (кислотность, степень насыщенности основаниями и др.). Изучение засоренности позволило получить тематическую карту, отражающую наличие сорных растений на полях питомника. Вся собранная информация была объединена в комплексную геоинформационную систему, разработанную на базе оболочки Quantum GIS. В результате на основе разработанной ГИС будет осуществляться оперативный мониторинг почвенного плодородия и информационное обеспечение реализуемой в питомнике агротехники выращивания посадочного материала.

Ключевые слова: лесные питомники, почвенное обследование, открытая геоинформационная система, засоренность полей питомника, агрохимическое обследование.

The use of GIS for agrochemical soil characteristics and weed infestation of Grebnevskiy nursery of Shchelkovskiy teaching and experimental forestry

O. V. Martynenko^{*}, V. N. Karminov^{**}, E. S. Yugaj^{***},
I. R. Mutygullin^{****}, P. V. Ontikov^{*****}

*Mytishchi branch MSTU named after N.E. Bauman,
1-ya Institutskaya Str., Mytishi 141005, Russian Federation,*

^{*}<https://orcid.org/0000-0001-8927-1082>, e-mail: martinen@mgul.ac.ru,

^{**}<https://orcid.org/0000-0002-9298-956X>, e-mail: vnk57@yandex.ru,

^{***}<https://orcid.org/0000-0003-4863-5796>, e-mail: yugaj1998@mail.ru,

*** <https://orcid.org/0000-0002-0922-9261>, e-mail: iskyan13@icloud.com,
**** <https://orcid.org/0000-0001-5636-8603>, e-mail: opv86@mail.ru.

Received 30.05.2019, Revised 30.06.2019, Accepted 21.11.2019

Abstract: The article deals with the features of soil-agrochemical inspection of the nursery area with the use of geoinformation technologies. The purpose of this work was to conduct a soil survey of arable sod-podzolic medium - or light-loamy soils of the territory of the forest nursery, as well as estimation of production area contamination with weeds. The peculiarity of this study was the fact that the process of collection, systematization and processing of all compiled information was focused on the use of modern geographic information systems. Survey points were chosen in coordination with the administration of the nursery and were precised according to the actual space images. Geographical reference of testing points was carried out using global positioning technologies (GPS, GLONASS) based on the NextGIS mobile application (Android OS). Photofixation of nursery fields was performed by means of geotagging technologies, which allow implementation of the obtained graphic information directly into the geographic information system (GIS). The soil samples collected in the field were analyzed in the soil laboratory in order to determine the main indicators of soil fertility. On the basis of the received data the cartograms were developed by means of GIS, which provide information on the main nutrients content in the soil of nursery fields as well as on the most important indicators characterizing the soil absorbing complex (soil acidity, degree of base saturation, etc.). The study of weed infestation allowed developing the thematic map representing the weeds propagation on the nursery fields. All collected information was combined into a comprehensive geographic information system developed on the basis of Quantum GIS shell. As a result, the developed GIS will contribute to operational monitoring of soil fertility and ensure informational support for agricultural machinery applied in the nursery for growing planting material.

Keywords: forest nurseries, soil survey, open geoinformation system, weed infestation of nursery fields, agrochemical survey.

ВВЕДЕНИЕ

Одной из важнейших производственных задач лесного хозяйства в сфере воспроизводства лесов является выращивание высококачественного посадочного материала древесных и кустарниковых растений. Качество посадочного материала, его наследственные свойства во многом обуславливают продуктивность и устойчивость будущих насаждений. Для успешного лесовосста-

новления (лесоразведения) требуется значительное количество сеянцев и саженцев, выращиваемых в лесных питомниках. Эффективное выполнение мероприятий по лесовосстановлению возможно только на почвенно-типологической основе, в связи с этим на первое место выходит учет почвенно-грунтовых факторов. Особенно это становится актуальным при выращивании посадочного материала в лесных питомниках, в условиях применения интенсивной агротехники, что роднит питомниководческие хозяйства с сельскохозяйственным производством.

В настоящее время основные пути интенсификации работ в аграрном секторе находятся в области внедрения систем точного земледелия. Аналогичные подходы справедливо переносить и на организацию работ в лесных питомниках. В основе точного земледелия лежат цифровые карты полей, составляемые с помощью геоинформационных систем. Это позволяет систематизировать имеющуюся информацию о состоянии почв, а также обновлять ее, получая визуальные данные в виде различных карт и картограмм, автоматизировать учет ведения всех хозяйственных мероприятий на территории питомника, а также осуществлять информационную поддержку принятия решений.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Исследования проводились на территории Гребневского питомника Щелковского учебно-опытного лесхоза МФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. Лесной питомник площадью 33 га расположен в северо-восточной части Московской области на территории Щелковского административного района в 11-м квартале Свердловского участкового лесничества. Питомник обеспечивает посадочным материалом лесокультурное производство в Щелковском и других хозяйствах Подмосковья; в ассортименте преобладают хвойные породы, наиболее часто используемые при лесовосстановлении.

Программа работ предусматривала проведение почвенно-агрохимического обследования полей питомника с использованием ГИС-технологий (закладка и морфологическое описание разрезов, отбор образцов для определения физических, физико-химических и химических свойств почвы), проведение топосъемки территории питомника, определение степени засоренности по-

лей питомника. Вся собранная информация оцифровывалась и объединялась в единую геоинформационную систему.

Географическая привязка точек почвенного обследования, точек топосъемки рельефа, а также полей питомника осуществлялась с помощью GPS/ГЛОНАСС навигации и мобильного приложения NextGIS ([Карминов и др., 2018](#); [Максимова и др., 2016](#)).

В почвенной лаборатории МФ МГТУ им. Н.Э. Баумана для отобранных почвенных образцов были определены основные физические (плотность, плотность твердой фазы, влажность), химические и физико-химические свойства почв (актуальная, обменная, гидрологическая кислотность, сумма обменных оснований, емкость поглощения катионов, степень насыщенности основаниями, содержание доступных форм азота, фосфора и калия, содержание гумуса).

В качестве программного обеспечения для создания ГИС питомника была выбрана система Quantum GIS. Quantum GIS (QGIS) – это бесплатная кроссплатформенная система с открытым кодом. Она поддерживает широкий спектр векторных и растровых форматов, отличается удобным русифицированным интерфейсом и наличием большого количества доступных методических материалов. Кроме того, QGIS напрямую связана с мобильным приложением NextGIS Mobil, так как это родственные разработки. Для получения геопривязанной топоосновы применялась программа SAS.Планета – одна из лучших программ среди тех, что позволяют получать геопривязанные картографические материалы из большого количества открытых источников в сети Интернет.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Во время полевого этапа исследований было установлено, что почвы питомника относятся к пахотным дерново-подзолистым средне- или легкосуглинистым.

При разработке геоинформационной системы важнейшей задачей является размещение всех пространственных объектов в выбранной системе координат. Для этого необходимо иметь некую базовую карту, имеющую географическую привязку, относительно которой можно размещать требуемые объекты. В качестве такой основы был использован космоснимок оператора

DigitalGlobe, полученный с сервиса Яндекс с помощью специализированной программы SAS.Планета. Непосредственно сама работа по созданию и наполнению геоинформационной системы осуществлялась в программе Quantum GIS. В качестве формата представления ГИС-данных был выбран формат Shape-файлов. Это один из наиболее распространенных форматов представления геопривязанных векторных данных, имеющий самую широкую поддержку среди соответствующего программного обеспечения. Разработанная структура базы данных, сопоставленной с пространственной информацией, включала в себя данные о названии почвы, ее гранулометрическом составе и материнской породе. Непосредственно построение почвенного плана осуществлялось методом интерполяции в зависимости от генезиса и морфологии почв, гранулометрического состава и рельефа местности ([Щепашенко и др., 2007](#)). Полученный почвенный план представлен на рисунке 1.



Рис. 1. Почвенный план части территории Гребневского питомника.

Fig. 1. Soil plan of the territory of the Grebnevskiy nursery.

При определении степени засоренности полей питомника ([Мазиров, Корчагин, 2009](#); [Югай и др., 2018](#)) было выяснено, что наибольшее видовое разнообразие имеют многолетние сорные растения, наиболее часто встречаемыми сорными растениями яв-

ляются одуванчик лекарственный, тимофеевка луговая и трехреберник непахучий (табл. 1) ([Шанцер, 2007](#)).

Таблица 1. Распределение растений на биологические группы

Table 1. Classification of weeds into various biological groups

Биологическая группа		Название сорняка (латинское название)	Степень засоренности по А.И. Мальцеву
Многолетние	Эфемеры	Звездчатка средняя (<i>Stellaria media</i> L.)	2
	Яровые ранние	Полевичка малая (<i>Eragrostis</i> Wolf.)	2
		Галинсога мелкоцветковая (<i>Galinsoga Ruiz et Pav</i>)	2
	Яровые поздние	Ежовник обыкновенный (<i>Echinochloa crus-galli</i> L.)	2
		Гречиха татарская (<i>Fagopyrum tataricum</i> L.)	2
	Зимующие	Пастушья сумка (<i>Capsella bursa-pastoris</i> L.)	2
		Трехреберник непахучий (<i>Tripleurospermum inodorum</i> L.)	2
		Незабудка полевая (<i>Myosotis arvensis</i> L.)	2
		Фиалка трехцветная (<i>Viola tricolor</i> L.)	2
	Озимые	Метлица полевая (<i>Apera spica-venti</i> L.)	3
Многолетние	Корнеотпрысковые	Бодяк полевой (<i>Cirsium arvense</i> L.)	2
		Осот полевой (<i>Sonchus arvensis</i> L.)	2
		Сурепка обыкновенная (<i>Barbarea vulgaris</i> W.T.Aiton.)	2
		Мышиный горошек (<i>Vicia cracca</i> L.)	2

Многолетние	Ползучие	Лапчатка гусиная (<i>Potentilla anserina</i> L.)	2
		Люпин ползучий (<i>Lupinus polyphyllus</i> Lindl.)	2
		Лютик ползучий (<i>Ranunculus repens</i> L.)	2
	Корневищные	Хвощ полевой (<i>Equisetum arvense</i> L.)	2
		Вейник наземный (<i>Calamagrostis epigejos</i> L.)	2
		Мать-и-мачеха обыкновенная (<i>Tussilago farfara</i> L.)	2
		Гравилат городской (<i>Geum urbanum</i> L.)	2
	Стержнекорневые	Пижма обыкновенная (<i>Tanacetum vulgare</i> L.)	2
		Одуванчик лекарственный (<i>Taraxacum officinale</i> L.)	2
		Полынь обыкновенная (<i>Artemisia vulgaris</i> L.)	2
		Василек луговой (<i>Centaurea jacea</i> L.)	2
	Мочковатые	Подорожник большой (<i>Plantago major</i> L.)	2
		Щучка дернистая (<i>Deschampsia cespitosa</i> L.)	2
		Тимофеевка луговая (<i>Phleum pratense</i> L.)	2

Для оценки показателей плотности (рис. 2) и влажности (рис. 3) почвы исследуемых полей были сгруппированы с точки зрения их использования. Первую группу образуют поля, которые находятся в состоянии залежи. За счет активного развития травянистой растительности плотность верхнего горизонта здесь несколько ниже, но при этом варьирование по плотности довольно значительно, высокие значения влажности наблюдаются на залежных почвах, где густой напочвенный покров препятствует быстрому иссушению верхних горизонтов. В почвах второй группы, которые в настоящий момент интенсивно используются, показатели плотности несколько выше, но при этом они более однородны.

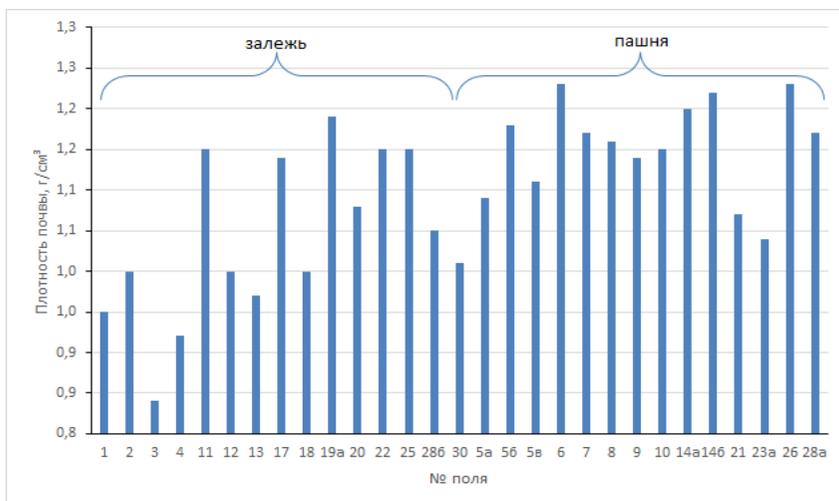


Рис. 2. Плотность почв полей Гребневского питомника.

Fig. 2. Soil density of Grebnevskiy nursery fields.

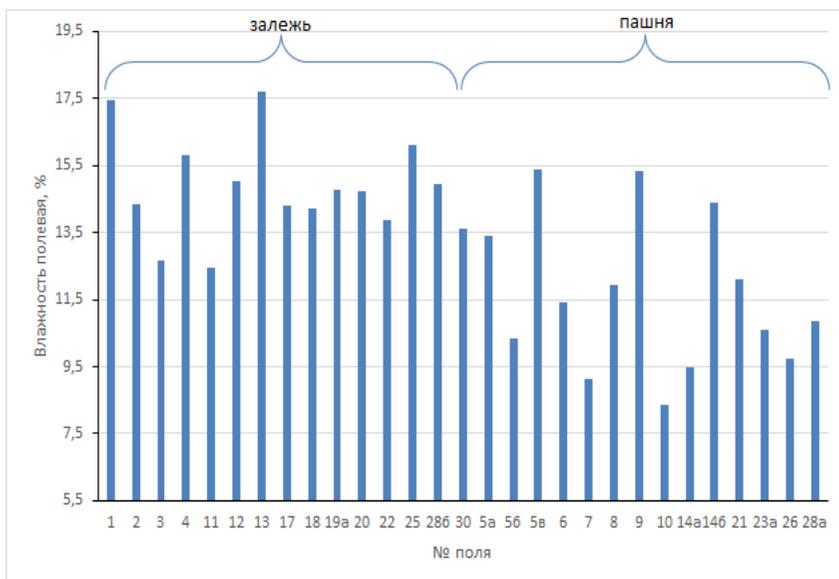


Рис. 3. Влажность почв полей Гребневского питомника.

Fig. 3. Soil moisture of Grebnevskiy nursery fields.

Изучение актуальной (рис. 4) и обменной (рис. 5) кислотности на различных полях показало, что эти показатели варьируют в достаточно широких пределах – от очень сильнокислой до слабощелочной. Чаще всего нейтральная реакция среды обнаруживалась на полях, находившихся в момент обследования в состоянии черного пара, отсюда ясно, что реализуемая в питомнике агротехника предусматривает интенсивное известкование изначально кислых дерново-подзолистых почв. Однако значительное пространственное варьирование показателей кислотности почв говорит о том, что рассеивание и заделка известковых удобрений в почву производилась недостаточно равномерно.

В соответствии со значениями обменной и актуальной кислотности происходит изменение такого важного интегрального показателя почвенного плодородия, как степень насыщенности основаниями (рис. 6). Данный показатель варьировал от 63 до 83 %, что вполне соответствует природе этого показателя и ожидаемым результатам воздействия известковых удобрений на параметры почвенно-поглощающего комплекса.

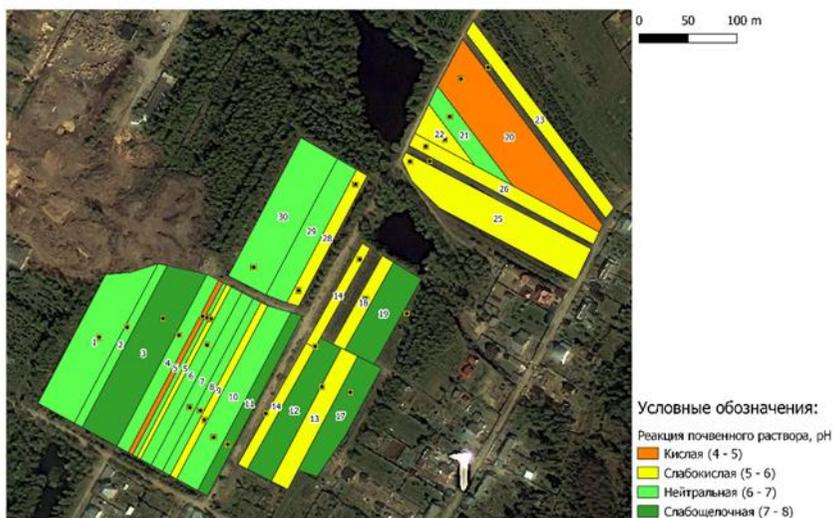


Рис. 4. Картограмма актуальной кислотности полей Гребневского питомника.

Fig. 4. Cartogram of actual soil acidity of Grebnevskiy nursery fields.



Рис. 5. Картограмма обменной кислотности полей Гребневского питомника.

Fig. 5. Cartogram of exchange soil acidity of Grebnevskiy nursery fields.

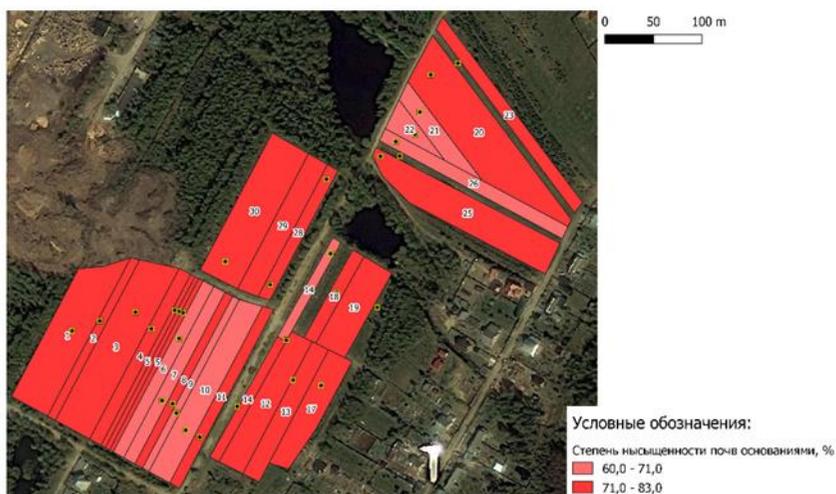


Рис. 6. Картограмма степени насыщенности основаниями полей Гребневского питомника.

Fig. 6. Cartogram of degree of base saturation of Grebnevskiy nursery soils.

Содержание основных макроэлементов в почве (рис. 7), таких как азот (рис. 8), фосфор (рис. 9) и калий (рис. 10) на залежи выше, чем на пашне. Вероятнее всего, это объясняется отсутствием на залежи выноса питательных элементов вместе с растениями во время выкопки семян и саженцев с полей питомника.

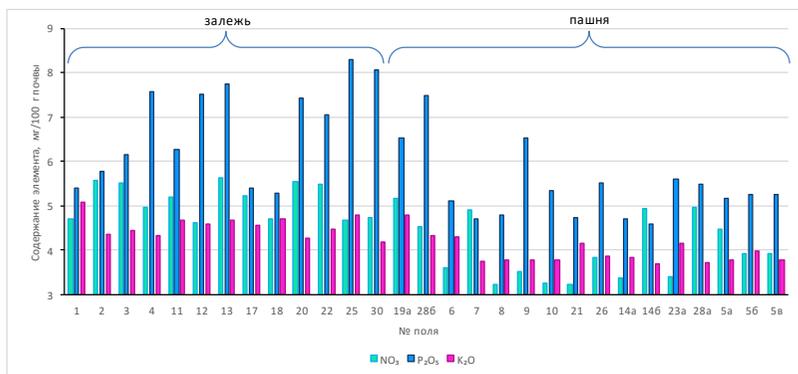


Рис. 7. Содержание основных питательных элементов полей Гребневского питомника.

Fig. 7. Cartogram of the main nutrients content in Grebnevskiy nursery soils.

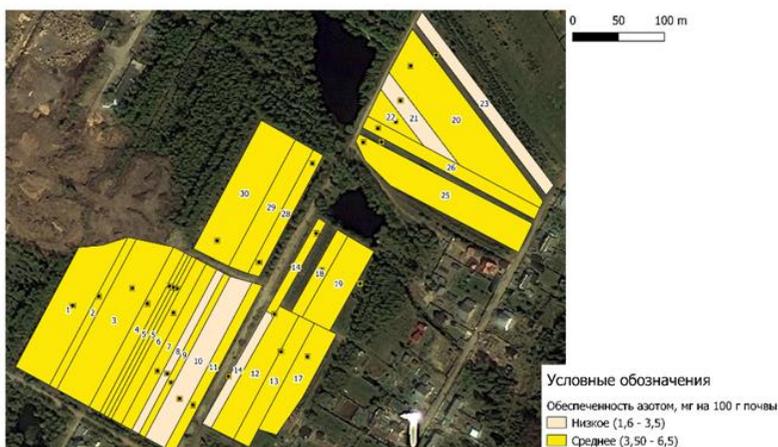


Рис. 8. Содержание азота в почве полей Гребневского питомника.

Fig. 8. The nitrogen content in the soils of Grebnevskiy nursery fields.



Рис. 9. Содержание фосфора в почве полей Гребневского питомника.
Fig. 9. The phosphorus content in the soils of Grebnevskiy nursery fields.

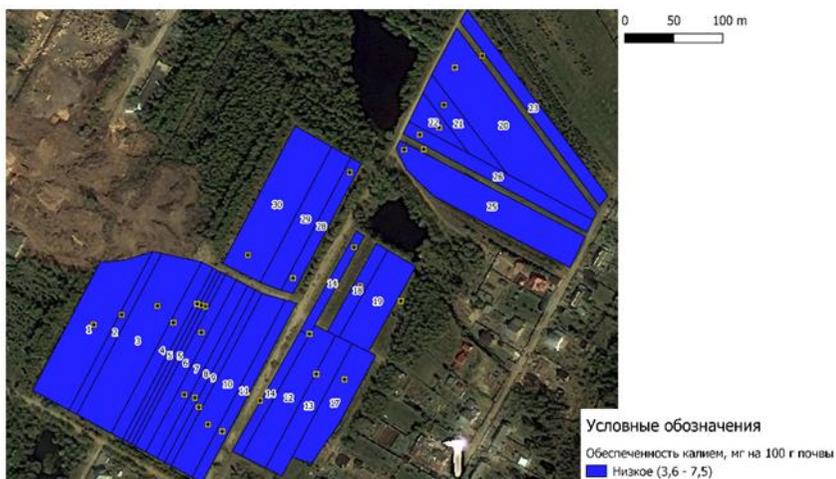


Рис. 10. Содержание калия в почве полей Гребневского питомника.
Fig. 10. The potassium content in the soils of Grebnevskiy nursery fields.

ВЫВОДЫ

В результате проведенных исследований был собран, обобщен и систематизирован обширный опытный материал, послуживший основой для создания геоинформационной системы Гребневского лесного питомника.

Выявлено, что преобладающей почвенной разностью территории питомника являются пахотные дерново-подзолистые среднесуглинистые почвы.

В результате определения степени засоренности полей питомника было выяснено, что наибольшее видовое разнообразие характерно для многолетних сорных растений, наиболее часто встречаются одуванчик лекарственный, тимopheевка луговая и трехреберник непахучий.

Полученные агрохимические данные могут быть использованы для разработки комплекса мероприятий, которые позволят существенно повысить нынешний уровень плодородия почв питомника.

На основе разработанной ГИС может осуществляться мониторинг состояния почв питомника и выполняться автоматизация учета и проведения всех хозяйственных мероприятий на территории питомника. Также она может использоваться в качестве информационной системы поддержки принятия решений и служить основой для геоинформационного блока систем точного земледелия.

Полученная ГИС позволяет в режиме реального времени генерировать большое количество тематических карт, отражающих как плодородие почв полей питомника, так и их хозяйственное использование.

Разработанная ГИС отличается удобством использования, полной русификацией, наличием обширной русскоязычной документации. При необходимости она может расширяться и дорабатываться под конкретные задачи производства и науки. Использование программных средств из класса свободного программного обеспечения позволит минимизировать расходы на внедрение данной системы в производство.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Карминов В.Н., Мартыненко О.В., Онтиков П.В., Баранenkova А.А., Минаков Н.М. Цифровое картографирование лесных почв // Почвы и земельные ресурсы: современное состояние, проблемы рационального использования, геоинформационное картографирование. Материалы международной научно-практической конференции, посвященной 85-летию кафедры почвоведения БГУ и 80-летию со дня рождения В.С. Аношко. 2018. С. 162–167.
2. Мазиров М.А., Корчагин А.А. Сорные растения и меры борьбы с ними (учебная полевая практика). Владимир: Изд-во Владим. гос. ун-та, 2009. 28 с.
3. Максимова А.Н., Мартыненко О.В., Карминов В.Н., Онтиков П.В., Минаков Н.М. Возможности ГИС-технологий для рационального использования лесных почв // Вестник Московского государственного университета леса – Лесной вестник. 2016. Т. 20. № 1. С. 112–117.
4. Шанцер И.А. Растения средней полосы Европейской России. Полевая атлас. М.: Т-во научных изданий КМК. 2007. 470 с.
5. Щепаченко Д.Г., Карминов В.Н., Мартыненко О.В., Щепаченко М.В. Опыт совместного анализа материалов полевой почвенной съемки и данных лесоустройства на примере Щелковского УОЛХ // Вестник Московского государственного университета леса – Лесной вестник. 2007. № 7. С. 47–49.
6. Югай Е.С., Мутыгуллин И.Р., Новиков А.В., Королькова И.О., Кузичев М.В., Саблин Г.Р., Кузнецов Б.А., Илюшкин И.С., Малышев Д.А., Мартусова Г.А., Афанасьева Т.К., Мартыненко А.С. Определение засоренности полей Гребневского питомника Щелковского учебно-опытного лесхоза // Сборник трудов Международной молодежной научной конференции “Генетическая и агрономическая оценка почв”. Международная молодежная научная конференция 3-и Вильямсовские чтения РГАУ – МСХА имени К.А. Тимирязева. 2018. С. 87–88.

REFERENCES

1. Karminov V.N., Martynenko O.V., Ontikov P.V., Baranenkova A.A., Minakov N.M., Tsifrovoye kartografirovaniye lesnykh pochv (Digital mapping of forest soils), *Pochvy i zemel'nye resursy: sovremennoe sostoyaniye, problemy ratsional'nogo ispol'zovaniya, geoinformatsionnoye kartografirovaniye* (Soils and land resources: current status, problems of rational use, geoinformation mapping), *Materialy mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii, posvyashchennoi 85-letiyu kafedry pochvovedeniya BGU i 80-letiyu so dnya rozhdeniya V.S. Anoshko* (Proc. Intern. Conf.

Devoted to the 85-th anniversary of BGU Soil Science Department and 80-th anniversary of V.S. Anoshko), 2018, pp. 162–167.

2. Mazirov M.A., Korchagin A.A., *Sornye rasteniya i mery bor'by s nimi (uchebnaya polevaya praktika)* (Weeds and measures to control them (educational field practice)), Vladimir: Izd-vo Vladim. gos. un-ta, 2009, 28 p.

3. Maksimova A.N., Martynenko O.V., Karminov V.N., Ontikov P.V., Minakov N.M., *Vozmozhnosti GIS-tekhnologii dlya ratsional'nogo ispol'zovaniya lesnykh pochv* (Opportunities of GIS technologies for rational use of forest soils), *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo universiteta lesa – Lesnoi vestnik*, 2016, Vol. 20, No. 1, pp. 112–117.

4. Shantser I.A., *Rasteniya srednei polosy Evropeiskoi Rossii. Polevoi atlas* (Plants middle zone of European Russia. Field Atlas), Moscow: T-vo nauchnykh izdaniy KMK, 2007, 470 p.

5. Shchepashchenko D.G., Karminov V.N., Martynenko O.V., Shchepashchenko M.V., *Opyt sovmestnogo analiza materialov polevoi pochvennoi s'emki i dannykh lesoustroistva na primere Shchelkovskogo UOLKh* (The experience of analysis of materials of field soil survey and forest inventory data, for example Shchelkovskiy teaching and experimental forestry), *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo universiteta lesa – Lesnoi vestnik*, 2007, No. 7, pp. 47–49.

6. Yugai E.S., Mutygullin I.R., Novikov A.V., Korol'kova I.O., Kuzichev M.V., Sablin G.R., Kuznetsov B.A., Ilyushkin I.S., Malyshev D.A., Martusova G.A., Afanas'eva T.K., Martynenko A.S., *Opreделение zasorennosti polei Grebnevskogo pitomnika Shchelkovskogo uchebno-opyt'nogo leskhoza* (The definition of the weed infestation of Grebnevskiy nursery field of Shchelkovskiy teaching and experimental forestry), *Sbornik trudov Mezhdunarodnoi molodezhnoi nauchnoi konferentsii "Geneticheskaya i agronomicheskaya otsenka pochv". Mezhdunarodnaya molodezhnaya nauchnaya konferentsiya 3-i Vil'yamsovskie chteniya RGAU-MSKhA im. K.A. Timiryazeva* (Proc. Intern. Conf. "Genetic and agronomic soil assessment", 3rd Williams Readings, Russian State Agrarian University), 2018, pp. 87–88.

УДК 631.471

DOI: 10.19047/0136-1694-2019-99-21-46

Ссылки для цитирования:

Векшина В.Н. Построение цифровых моделей почвенного покрова западной части Большеземельской тундры // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2019. Вып. 99. С. 21-46. DOI: 10.19047/0136-1694-2019-99-21-46

Cite this article as:

Vekshina V.N., The development of digital models of the soil cover in the western part of Bol'shezemel'skaya tundra, Dokuchaev Soil Bulletin, 2019, V. 99, pp. 21-46, DOI: 10.19047/0136-1694-2019-99-21-46

Построение цифровых моделей почвенного покрова западной части Большеземельской тундры

© 2019 г. В. Н. Векшина

*МГУ им. М.В. Ломоносова, Россия,
119234, Москва, Ленинские Горы, 1*

<https://orcid.org/0000-0002-5662-7975>, e-mail: LeraVekshina@mail.ru.

*Поступила в редакцию 10.06.2019, после доработки 20.11.2019,
принята к публикации 21.11.2019*

Резюме: Методы цифровой картографии перспективны для создания почвенных карт труднодоступных территорий. Целью работы был поиск оптимальных подходов к построению цифровых моделей почвенного покрова слабо изученной западной части Большеземельской тундры и лесотундры в разных масштабах. В качестве базовой информации о почвах использовались средне- (1 : 200 000) и мелкомасштабные (1 : 1 млн) почвенные карты; актуальная информация о состоянии территории бралась со снимков Landsat 8 (14.08.2013) и модели рельефа ASTER GDEM v.2. После извлечения информации и подбора предикторов проводился анализ моделей, построенных различными алгоритмами – Random Forest (RF), Multinomial Logistic Regression (MLR) и Linear Discriminant Analysis (LDA). Оценивался коэффициент согласованности между построенными моделями и изначальными картами (индекс каппа). Тестирование моделей показало, что лучше всего работает алгоритм Random Forest, который и был выбран для построения конечных карт. Средние значения каппа для сравниваемых моделей мелко- и среднемасштабных карт составили: RF – 0.39 и 0.36;

MLR – 0.31 и 0.31; LDA – 0.28 и 0.18 соответственно. После предварительной коррекции контурной и смысловой части среднемасштабной карты значения каппа выросли: RF – 0.39, MLR – 0.35, LDA – 0.30. Проверка новых цифровых карт по независимым полевым данным показала, что уровень совпадения данных не хуже, чем у исходных бумажных карт: для исходной мелкомасштабной карты – 24 %, а цифровой – 26 %; для исходной среднемасштабной карты – 54 %, а цифровой – 43 %. При предварительной коррекции исходной среднемасштабной карты уровень совпадения полевых данных и цифровой модели, построенной с помощью алгоритма RF, повысился до 61 %. Данный способ построения цифровой почвенной карты при аналогичных исходных данных представляется оптимальным.

Ключевые слова: цифровые почвенные карты (DSM), тундрово-таежный экотон, дистанционные данные, Landsat 8, ASTER GDEM, LWCI, NDVI, MNDWI, Random Forest, оценка точности карт.

The development of digital models of the soil cover in the western part of Bol'shezemel'skaya tundra

V. N. Vekshina

Lomonosov Moscow State University,

1 Leninskie Gori, Moscow 119234, Russian Federation,

<https://orcid.org/0000-0002-5662-7975>, e-mail: LeraVekshina@mail.ru.

Received 10.06.2019, Revised 20.11.2019, Accepted 21.11.2019

Abstract: The methods of digital mapping are promising for creating soil maps on difficultly accessible territories. This study was aimed at searching of optimal approaches for digital mapping of the soil cover in poorly studied western part of the Bol'shezemel'skaya tundra on different scales. Medium-scale (1 : 200 000) and small-scale (1 : 1 M) soil maps served as the source of initial information about soils of this region; actual information of the state of the territory was obtained from remote sensing data (Landsat 8 scenes, Aug. 14, 2013) and digital elevation model ASTER GDEM v.2. After extraction of information and the choice of predictors, the analysis of digital soil cover models obtained with the use of different algorithms – Random Forest (RF), Multinomial Logistic Regression (MLR) and Linear Discriminant Analysis (LDA) – was performed. The coefficient of agreement between the newly developed digital models and the initial paper-based soil maps (kappa) was calculated. This test demonstrated that the RF algorithm ensures the best results, so the final digital maps were obtained using it. Averaged kappa

values for the compared small- and medium-scale models were as follows: RF – 0.39 and 0.36; MLR – 0.31 and 0.31; and LDA – 0.28 and 0.18, respectively. After the preliminary correction of the initial medium-scale map, the kappa values somewhat increased (RF – 0.39, MLR – 0.35, LDA – 0.30). At the stage of evaluation of digital soil maps obtained with the use of RF algorithm, these maps and the initial soil maps were compared with independent point-size terrain data. The degree of agreement between these data and the new digital soil maps proved to be no less than that for the initial maps. For the initial and digital small-scale maps, it reached 24 and 26 %, respectively; for the initial and digital medium-scale maps, 54 and 43 %, respectively. After the preliminary correction of the initial medium-scale map, the degree of agreement between the digital model and terrain data improved considerably and reached 61 %. This method of digital soil mapping on the basis of analogous data seems to be optimal.

Keywords: digital soil maps, tundra-taiga ecotone, remote sensing data, Landsat 8, ASTER GDEM, LWCI, NDVI, MNDWI, Random Forest, map evaluation.

ВВЕДЕНИЕ

Современный этап развития почвенной картографии связан с использованием компьютерных технологий, позволяющих анализировать большие объемы информации, включая первичные точечные полевые данные (полевые описания ландшафтов и почв, результаты анализа образцов), пространственные модели (различные тематические карты, модели рельефа) и данные дистанционного зондирования (ДДЗ), наиболее точно, но косвенно отражающие факторы почвообразования и организацию почвенного покрова. Выделилось направление цифровой почвенной картографии (ЦПК) ([Савин, 2016](#); Цифровая почвенная картография, 2012; Козлов, 2009; [McBratney et al., 2003](#)). Ставится задача по созданию мировой цифровой почвенной карты (точнее, серии карт отдельных свойств почв) с разрешением порядка 100 м, разрабатываются различные алгоритмы решения этой задачи в зависимости от имеющихся данных ([Arrouays et al., 2014](#)).

В основе ЦПК лежит традиционный анализ связей между почвами (или отдельными их свойствами), факторами почвообразования и характеристиками поверхности, но проводимый на количественной основе с использованием методов геостатистики.

Имеющиеся тематические карты и ДДЗ применяются для анализа территории, выявления признаков, наиболее существенных в изучаемой природно-климатической обстановке, с целью подбора величин – предикторов почв (почвенных свойств), – адекватно отражающих взаимосвязи почв и факторов почвообразования, их математической обработки и группировки для автоматического построения почвенной карты.

Способы применения ДДЗ в традиционном и цифровом картографировании различны. В первом случае ДДЗ используются в качестве обычной подложки для визуального дешифрирования почв ([Савин, Симакова, 2012](#)). Во втором – они используются для автоматического извлечения информации, значимой при создании карт и определяемой природно-климатическими особенностями района исследования и техническими возможностями. Конечным продуктом являются либо карты отдельных свойств почв ([Dharumarajan et al., 2017](#); [Vågen et al., 2016](#); [Grimm et al., 2008](#)), либо непосредственно сама почвенная карта ([Докучаев, 2017](#); [Жо-голев, 2016](#); [Abdel-Kader, 2011](#); [Конюшкова, Козлов, 2010](#)).

ДДЗ как источник информации имеет свои особенности, которые следует учитывать при создании карт того или иного масштаба. Как отмечено И.Ю. Савиным ([Савин, 2016](#)), использование косвенных дешифровочных признаков при создании мелко- и среднемасштабных карт оказалось более надежным, чем использование прямых дешифровочных признаков при крупномасштабном картографировании. Работа с косвенными признаками – в первую очередь с растительностью и рельефом – важна при построении уточненных цифровых моделей почвенного покрова на основе имеющихся бумажных карт ([Сухачева, 2019](#); [Савин, Овечкин, 2014](#)).

Для отечественного почвоведения эта задача особенно актуальна, так как полевые данные часто отсутствуют в достаточном количестве, зато имеется богатый архив почвенных карт прошлых лет ([Савин, Овечкин, 2014](#)). Бумажные почвенные карты разных масштабов составлены на всю территорию страны и являются основным источником данных о почвенном покрове. Материалы современных точечных полевых исследований используются для уточнения и проверки имеющейся информации.

Общей методики создания цифровых почвенных карт на основе имеющейся картографической информации, моделей рельефа и ДДЗ пока не существует. Очевидно, что выбор предикторов почвообразования и способов их анализа зависит от многих факторов, включая физико-географические особенности и связи *почва – факторы* для конкретной территории, доступность материалов, наличие новых полевых данных и др. Количество таких исследований для равнинных тундрово-таежных территорий с “закрытой” растительностью поверхностью почвы невелико. Для Европейского северо-востока они единичны ([Каверин, 2012](#)). Вместе с тем потребность в уточненных цифровых моделях почвенного покрова, увязанных с ДДЗ, для этих территорий высока и будет возрастать в связи с необходимостью дистанционного мониторинга трансформации природного комплекса и почв под воздействием возрастающего антропогенного пресса (в первую очередь развития нефтегазодобычи) и климатических изменений.

Этим определяется актуальность исследования. Его задачей была отработка подходов к построению и проверке цифровых почвенных карт тундрово-таежного экотона на основе имеющихся средне- и мелкомасштабных бумажных почвенных карт, цифровой модели рельефа и ДДЗ. Условно в работе можно выделить три этапа: 1) анализ связей *почва – факторы* и подбор предикторов почвообразования; 2) совместный анализ предикторов и построение цифровой модели почвенного покрова по определенному алгоритму; и 3) содержательный анализ полученных результатов, уточнение закономерностей почвообразования и географии почв для рассматриваемого региона. В данной статье преимущественно рассматривается второй этап – построение цифровых почвенных карт.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Исследуемый район расположен в центральной части Ненецкого автономного округа, в Субарктическом поясе, в пределах Печорской синеклизы. Климат умеренно-холодный гумидный, умеренно-континентальный, более мягкий в западной части в связи с обогревающим воздействием р. Печоры. Среднегодовые температуры воздуха $-3\text{ }^{\circ}\text{C} \dots -4\text{ }^{\circ}\text{C}$; количество осадков – около 600 мм

([Научно-прикладной справочник по климату СССР, 1989](#)). Восточная часть расположена в зоне массивно-островной, а западная – островной мерзлоты ([Осадчая, Тумель, 2012](#)). Почвообразующими породами являются четвертичные отложения различного генезиса с преобладанием аллювиальных песков в западной части и ледниково-морских суглинков в восточной части (<http://www.vsegei.ru>). Междуречья заняты кустарниковыми моховыми и мохово-лишайниковыми тундрами в сочетании с плоскобугристыми болотами. Березово-еловые и сосновые лесные массивы с ерником и мохово-лишайниковым покровом занимают дренированные позиции на террасах рек. Злаково-осоковые луга, ивняки и моховые болота преобладают в поймах. Значительны массивы незакрепленных песков ([Лавриненко, 2013](#)). В почвенном покрове преобладают Al-Fe-гумусовые почвы (в западной части), глееземы, криометаморфические почвы, торфяные мерзлотные и немерзлотные почвы, аллювиальные гумусовые, гумусово-глеевые и торфяно-глеевые почвы и псаммоземы.

Изучение почвенного покрова проводилось на широтно-вытянутом участке местности (N 67°21'52", E 53°00'41" (юго-запад); N 67°48'36", E 55°12'29" (северо-восток)), рассматриваемом в мелком масштабе. В западной части исследуемой территории был выделен полигон (N 67°48'34", E 53°00'41" (юго-запад); N 67°21'54", E 53°59'54" (северо-восток)), границы которого определялись имеющейся среднемасштабной почвенной картой на эту территорию. На рисунке 1 показан космический снимок с границами исследуемой территории и полигона. Фиолетовым цветом выделена граница всей исследуемой территории, розовым цветом заштрихован полигон для изучения территории в разных масштабах.

Источники информации. Для создания цифровых почвенных карт мелкого (на весь участок) и среднего (на его западную часть) масштабов в качестве основного источника почвенной информации использованы листы ГПК масштаба 1 : 1 млн, листы Q-39 (1977) и Q-40 (1982), и почвенная карта Н.А. Крейды масштаба 1 : 200 000 (лист Q-39-V, VI) (1958), также были использованы сцены Landsat 8 за 14.08.2013, а также цифровая модель рельефа ASTER GDEM v. 2 (<http://viewfinderpanoramas.org/dem1d>). Для по-

нимания почвенно-ландшафтных связей на территории исследования была использована информация с топографических, ландшафтных, геологических и геокриологических карт и литературных источников.



Рис. 1. Район исследований.
Fig. 1. Study area.

Полевые данные: описания 67 разрезов, полученные в 2014–2016 гг. и характеризующие наиболее распространенные в восточной и западной части территории типы почв, использовались при проверке базовых и цифровых почвенных карт.

На первом этапе все векторные (векторизованные базовые почвенные карты, точечные полевые данные) и растровые данные (каналы Landsat, цифровая модель рельефа ASTER GDEM v. 2) были сведены в единую ГИС (в программе QGIS). С помощью растровых данных рассчитывались ковариаты, подобранные на основании изученных почвенно-ландшафтных связей для территории исследования.

Для статистического анализа связей предиктор – почва, а также для подбора модели создания карты значения выбранных ковариат и названия почв с почвенных карт были взяты по регулярной сетке (три точки/км²), что обеспечило попадание точек во все выделенные почвенные контуры. Из дальнейших расчетов были исключены точки, попавшие на предварительно отдешифрированные водные объекты и массивы развееваемых

песков. Всего в статистическую обработку для среднемасштабной карты попало 5715 точек (для 2091 км²), а для мелкомасштабной – 13014 точек (для 4638 км²). По результатам статистического анализа построена корреляционная матрица для подбора минимального количества ковариат с максимальной суммарной эффективностью, оценена способность отобранных предикторов к разделению общей совокупности почв (по критерию Миллса) и их парных комбинаций (по *t*-критерию).

В итоге для построения *среднемасштабной* почвенной карты были отобраны следующие индексы: абс. высота, LWCI, NDVI, температура (*t*) поверхности; для *мелкомасштабной карты* к этим предикторам был добавлен индекс MNDWI, помогающий отделить почвы на суглинках в восточной части полигона. Более подробно процедура подбора и анализа предикторов охарактеризована ранее (Векшина, 2019).

Этап построения карт включал в себя подбор алгоритма построения карты с помощью индекса каппа ([Cohen 1960](#), [1968](#)), создание цифровых почвенных карт на основе выбранной модели и оценку полученных карт. Работы велись в программе R-Studio.

Суть проверки заключалась в следующем: всю выборку точек (100 %) программа случайным образом делит на выборки в соотношении 70 % и 30 %, при этом по первой производится построение модели (карты), а по второй эта карта проверяется, т. е. анализируется количество правильного определения точек второй выборки к исходным классам по карте, построенной по первой выборке. Если все эти точки определены верно, то значение согласованности равно 1, если неверно – 0.

Сравнивались алгоритмы: *Random Forest* (**RF**, случайный лес), *Multinomial logistic regression* (**MLR**, полиномиальная логистическая регрессия), *Linear discriminant analysis* (**LDA**, линейный дискриминантный анализ). По литературным данным ([Jeune, 2018](#); [Meier, 2018](#); [Stum et al., 2010](#)), алгоритм RF широко используется при создании цифровых почвенных карт и часто оказывается предпочтительным. Алгоритм MLR также используется при создании цифровых почвенных карт ([Kempen et al., 2009](#); [Abdel-Kader., 2011](#); [Piccini et al., 2018](#); [Abbaszadeh Afshar et al., 2018](#)). Алгоритм LDA применяют для классификации

объектов, однако для построения карт он обычно не используется из-за важного ограничения – все предикторы должны быть количественными и подчиняться многомерному нормальному распределению.

Для каждого из вышеназванных алгоритмов в 10-кратных проворностях, т. е. 10 раз создавалась разная выборка точек для построения модели и ее проверки, отдельно для мелкомасштабной и среднемасштабной карты рассчитывался индекс каппа. Далее рассчитывалось среднее значение каппы для каждого алгоритма и карты. В основу этих моделей закладывались ранее выбранные ковариаты, описанные выше.

Этап независимой проверки полученных цифровых и оцифрованных исходных карт заключался в их сравнении с общей ландшафтной ситуацией, отражаемой на снимках, и полевыми данными, полученными в результате экспедиций, которые проходили на этой территории в августе с 2014 г. по 2016 г. Верификация мелкомасштабных карт велась по 67 разрезам, верификация среднемасштабных карт – по 44 разрезам.

В первом приближении все описанные в поле почвы отнесены к четырем группам: П – альфегумусовые (подзолы и подбуры), Т – торфяные, А – аллювиальные, Г – глеевые (и криометаморфические). С ними же были соотнесены наименования преобладающих почв в контурах, выделенных на базовых почвенных картах ([ГПК](#) и карте [Н.А. Крейды](#)). На карте Н.А. Крейды, помимо вышеназванных групп, была выделена группа т.-д. – текстурно-дифференцированные (подзолистые) почвы. Полевые данные по ним отсутствуют, т. к. область их широкого распространения находится значительно южнее районов полевых исследований в 2014, 2015 и 2016 гг.

На рисунке 2 изображена оцифрованная и объединенная по группам почв почвенная карта Н.А. Крейды и фрагмент ГПК на одну и ту же территорию. В легенде даны все группы, присутствующие на обеих картах, поэтому в ней нет подзолистых почв, которые отмечены серым цветом на среднемасштабной карте.

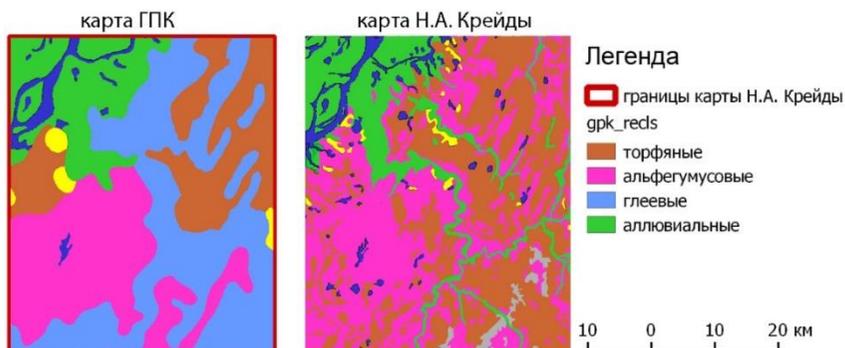


Рис. 2. Группы почв, выделенные по отцифрованной ГПК и отцифрованной карте Н.А. Крейды границах полигона.

Fig. 2. Groups of soils shown on the digitized State Soil Map and on the digitized map by N.A. Kreida within the boundaries of the polygon.

На водные объекты и массивы развееваемых и слабозакрепленных песков с псамоземами была отдельно создана маска – эти объекты маскировались при моделировании, а затем включались в итоговые цифровые карты.

Коррекция закладываемой модели. Результаты визуальной проверки изначальных и полученных в результате моделирования почвенных контуров по аэроснимкам Bing, доступным через программу QGIS, и их соотнесения с полевыми данными показали необходимость предварительной ручной корректировки закладываемой картографической модели – почвенной карты Н.А. Крейды. Такая коррекция была проведена (см. ниже).

После коррекции исходной карты Н.А. Крейды вновь проводился подбор алгоритма создания цифровой карты, ее построение и независимая проверка по полевым данным.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Как для мелкомасштабной, так и для среднемасштабной карты лучшие результаты “самопроверки” (по индексу каппа) были получены при использовании алгоритма RF (табл. 1). Похожие результаты для этого алгоритма отмечены и другими авторами при создании почвенных карт на другие территории ([Jeune et al., 2018](#); [Pahlavan-Rad et al., 2016](#)).

Таблица 1. Критерий каппа для разных алгоритмов построения мелкомасштабной карты

Table 1. Кappa index of agreement for different algorithms of small-scale digital soil mapping

Алгоритм	№ повторности										Среднее
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
RF	0.39	0.38	0.40	0.39	0.38	0.39	0.39	0.40	0.39	0.38	0.39
LDA	0.27	0.27	0.28	0.27	0.27	0.27	0.28	0.28	0.28	0.28	0.28
MLR	0.32	0.31	0.31	0.31	0.30	0.31	0.31	0.31	0.32	0.31	0.31

Среднее значение каппа для *мелкомасштабной карты* по 10 повторностям для метода RF оказалось равным 0.39 (табл. 1), что соответствует удовлетворительному уровню совпадения (0.21–0.40), согласно Landis ([Landis, Koch, 1977](#)), но ближе к верхней границе градации.

Итоговая мелкомасштабная цифровая почвенная карта, построенная по алгоритму RF, представлена на рисунке 3.

Для *среднемасштабной карты* среднее значение каппа по 10 повторностям при использовании алгоритма RF оказалось равным 0.36 (табл. 2), что также соответствует удовлетворительному уровню совпадения (0.21–0.40) согласно ([Landis, Koch, 1977](#)).

Таблица 2. Критерий каппа для разных алгоритмов построения среднемасштабной карты

Table 2. The Kappa coefficient of agreement for different algorithms of medium-scale digital soil mapping

Алгоритм	№ повторности										Среднее
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
RF	0.38	0.37	0.35	0.38	0.36	0.37	0.35	0.36	0.35	0.38	0.36
LDA	0.20	0.19	0.19	0.18	0.17	0.17	0.17	0.17	0.17	0.21	0.18
MLR	0.31	0.30	0.31	0.29	0.31	0.29	0.31	0.33	0.32	0.31	0.31

Алгоритм RF использовался и для построения среднемасштабной цифровой почвенной карты на западную часть полигона (рис. 4).



Легенда

- 1 Тундровые иллювиально-гумусовые оподзоленные и тундровые иллювиально-гумусовые оподзоленные сухоторфянистые
- 2 Тундровые поверхностно-глеевые дифференцированные, тундровые поверхностно-глеевые дифференцированные сухоторфянистые и тундровые поверхностно-глеевые пятен мерзлотные
- 3 Тундровые остаточно-торфяные мерзлотные и болотные верховые мерзлотные
- 4 Болотно-тундровые торфянисто-глеевые иллювиально-гумусовые и болотно-тундровые иллювиально-гумусовые сухоторфянисто-глеевые мерзлотные с болотно-тундровыми торфяно-глеевыми иллювиально-гумусовыми и болотно-тундровыми иллювиально-гумусовыми сухоторфяно-глеевыми мерзлотными
- 5 Аллювиальные болотные и аллювиальные дерновые глеевые
- 6 Болотно-тундровые торфянисто-глеевые и болотно-тундровые сухоторфянисто-глеевые мерзлотные с болотно-тундровыми торфяно-глеевыми и болотно-тундровыми сухоторфяно-глеевыми мерзлотными
- 7 Болотно-тундровые оподзоленные торфянисто-глеевые и болотно-тундровые оподзоленные сухоторфянисто-глеевые мерзлотные с болотно-тундровыми оподзоленными торфяно-глеевыми и болотно-тундровыми оподзоленными сухоторфяно-глеевыми мерзлотными
- 8 Болотные верховые мерзлотные и тундровые остаточно-торфяные мерзлотные
- 9 Подзолы иллювиально-гумусовые
- 10 Подзолы иллювиально-гумусовые и подзолы иллювиально-гумусовые сухоторфянистые

Рис. 3. Мелкомасштабные почвенные карты: слева – исходная (оцифрованная Государственная почвенная карта), справа – цифровая.

Fig. 3. Small-scale soil maps: initial digitized State Soil Map (on the left) and the new developed digital soil map (on the right).

Матрицы неточностей исходной и цифровой *мелкомасштабной* карты с полевыми данными представлены ниже (слева и справа, соответственно). Для этой карты рассмотрены 4 основных группы почв: П – альфегумусовые (подзолы и подбуры), Т – торфяные, А – аллювиальные, Г – глеевые/криометаморфизованные (на суглинках).

Точность исходной карты, проверяемой по полевым данным, оказалась крайне низкой, что связано с масштабом карты и с тем, что в состав ее контуров входит сразу несколько (до трех) почвенных комплексов, реже почв. При проверке точности карты учитывалась только первая (преобладающая) почва (или комплекс почв). Несоизмеримость масштаба карты (1 : 1 млн) и точечных полевых данных, характеризующих площади порядка 1–5 м², не позволяет судить на ее основе о “несовпадении” исходной карты и полевых данных.

		Полевые данные			
		П	Т	А	Г
данные с карты	П	2			
	Т	12	2		6
	А			2	
	Г	22	10	1	10

Общая точность: $16 : 67 = 24 \%$

		Полевые данные			
		П	Т	А	Г
данные с карты	П	8			
	Т	7	2		6
	А	5	4	2	4
	Г	16	6	1	6

Общая точность: $18 : 67 = 26 \%$

Все это справедливо и для новой цифровой карты, построенной с помощью ДДЗ, разрешение которой меньше размеров площадок полевых описаний, что в условиях неоднородности и комплексности почвенного покрова и недостаточной точности привязки полевых данных (по данным однократных определений координат приемником GPS) делает оценку точности карты по полевым данным весьма условной. Количество точек для проверки явно недостаточное, чтобы оценить точность вновь созданной карты (67 разрезов на площади 4638 км²). Проверку на точность мелкомасштабной карты с комплексным почвенным покровом стоит

рассматривать не столько как сравнение исходной и цифровой карты, сколько как материалы для разработки более обоснованного подхода к проверке цифровых карт и дальнейшего обсуждения этой темы.

Тем не менее стоит отметить, что точности исходной оцифрованной мелкомасштабной карты и цифровой мелкомасштабной карты оказались близки. Условно можно говорить о том, что новая цифровая карта оказалась “не хуже” исходного оригинала.

Общие точности исходной (слева) и цифровой (справа) *среднемасштабной карты* при проверке по полевым данным оказались выше, чем для мелкомасштабной карты.

Полевые данные					
данные с карты		П	Т	А	Г
	П	17	2		1
	Т	9	5	1	2
	А	2		2	1
	Т-д				

Общая точность: $24 : 44 = 54 \%$

Полевые данные					
данные с карты		П	Т	А	Г
	П	14	0	1	1
	Т	7	3		
	А	2		2	1
	Т-д	7	4		2

Общая точность: $19 : 44 = 43 \%$

В карте Н.А. Крейды кроме вышеназванных групп почв присутствуют еще группа текстурно-дифференцированных (подзолистых) почв (Т.-д.).

Более высокое соответствие среднемасштабных карт полевым данным связано с выделением на карте менее крупных контуров с более однородным почвенным покровом (в контурах, как правило, показана только одна почва); сама территория этой (западной) части тестового полигона более однородна и целиком входит в состав одного почвенного района ([Забоева и др., 1984](#)). Проверка среднемасштабных карт по полевым данным представляется более корректной. Следует отметить, что точность (степень совпадения с полевыми данными) у исходной карты оказалась выше, чем у новой цифровой карты: первой соответствовало 24

описания (из 44), причем еще два описания попали на водные объекты по карте; совпадение с новой цифровой картой – у 19 описаний из 44. Ряд описаний, причем разных групп почв, “попали” в контуры с т.-д. почвами.

Полученные результаты свидетельствуют о том, что описанный подход к созданию цифровых почвенных карт среднего и мелкого масштаба вполне оправдан. Однако в данном случае говорить о достоверной проверке карт по полевым данным или о более точном отображении реальной ситуации на цифровых картах преждевременно. Их визуальный анализ показывает неплохое совпадение с общим рисунком снимков, однако есть “проблемные” участки, где такого совпадения не наблюдалось. Для них возможна ручная корректировка, или на уже готовой цифровой карте, или на исходной карте. Последний путь и опробован в нашей работе.

Коррекция исходной карты и построение новой цифровой карты были проведены для *среднемасштабной карты*. Коррекция заключалась в небольшой ручной правке границ некоторых контуров и в уточнении смыслового содержания легенды карты.

Так, показанные на ней небольшие контуры пойменных перегнойно-болотных почв попали на существенно разные объекты по снимкам: собственно поймы, лесные массивы (террас), развеваемые пески, водные объекты. Учитывая малые площади таких почв, было решено отказаться от самостоятельного отображения их контуров, присоединив их к соседним почвам, занимающим большие площади.

Также была произведена корректировка болотных массивов с торфяными почвами. Они были разделены на две группы: болота с преобладанием обводненных мочажин и болота с преобладанием бугров. Для первых характерны торфяные эутрофные почвы, для вторых – мерзлотные торфяные олиготрофные почвы. Они хорошо разделяются по снимкам, так как растительный покров этих почв имеет отличающиеся спектральные характеристики. Для обводненных мочажин характерны осоково-пушицево-сфагновые сообщества; для бугров – багульниковые морошкovo-кустарничково-лишайниково-моховые сообщества. Выделение же олиготрофных и эутрофных почв напрямую зависит от состава

торфа, который тесно связан с растительным покровом. Ряд выделенных на картах контуров (или частей контуров) болот по снимкам явно попадал на другие объекты. В этом случае проводилась ручная корректировка их границ, а выделенные в откорректированных местах торфяные почвы переименовывались с учетом близости расположения соседних контуров почв с другими почвами.

Для построения новой карты были взяты те же ковариаты, что и ранее. Итогом проведения такой коррекции стало то, что при построении модели точность разных алгоритмов возросла (табл. 3).

Таблица 3. Критерий каппа для разных алгоритмов построения среднемасштабной карты после ручной коррекции исходной карты
Table 3. The Kappa coefficient of agreement for different algorithms of medium-scale digital mapping after manual correction of the initial map

Алгоритм	№ повторности										Среднее
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
RF	0.40	0.38	0.39	0.40	0.40	0.38	0.38	0.39	0.41	0.39	0.39
LDA	0.31	0.28	0.32	0.31	0.29	0.30	0.29	0.31	0.30	0.30	0.30
MLR	0.36	0.34	0.36	0.37	0.37	0.35	0.35	0.35	0.35	0.36	0.35

Так же, как и при сравнении каппа для построения картографической модели по не откорректированным средне и мелко-масштабным почвенным картам, наилучший результат был получен для алгоритма RF, который и был использован при построении нового варианта среднемасштабной цифровой почвенной карты (рис. 5).

Как видно из приведенной ниже матрицы неточностей, оценка точности этой карты по полевым данным существенно возросла – с 43 до 61 %.

Для мелкомасштабных карт, отражающих сложный почвенный покров с преобладающей и сопутствующими почвами (часто показываемыми внесмасштабными знаками), при известном примерном соотношении между ними, возможен иной метод коррекции – с включением этапа дезагрегации карты, например, с помощью алгоритма DSMART ([Nathan et al., 2014](#)).

Полевые данные					
данные с карты		П	Т	А	Г
	П	21		1	2
	Т	1	4		1
	А	2		2	1
	Т-Д	6	1		

Общая точность: $27 : 44 = 61\%$

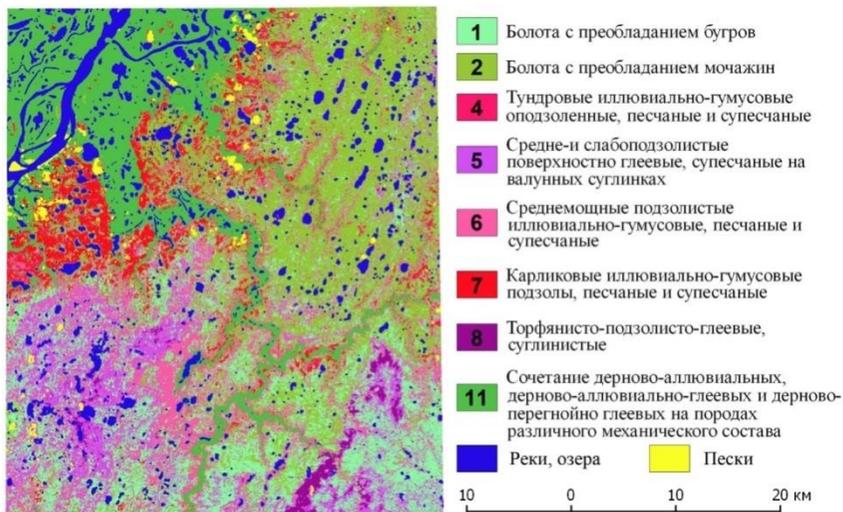


Рис. 5. Итоговая обновленная среднемасштабная карта (по скорректированной начальной карте).

Fig. 5. Medium-scale digital soil map obtained after manual correction of the initial map.

В случае Государственной почвенной карты необходимо экспертное заключение о “весе” той или иной почвы в контурах. Для разделения самих почвенных комплексов необходимы снимки, разрешение которых было бы сопоставимо по размеру с эле-

ментарными почвенными ареалами для исследуемой территории. При отсутствии эксперта метод, используемый в настоящей работе, представляется наиболее рациональным: он не требует большого объема данных, экспертного знания территории (“экспертом” выступает изначальная карта), а все используемые материалы – открытого доступа. Метод применим в разных природных зонах, однако для каждой новой территории необходим свой набор предикторов и исходных данных, наиболее значимых для исследуемого участка.

Предварительная коррекция контурной и смысловой части исходных карт позволяет существенно повысить точность построения новой цифровой модели почвенного покрова.

ВЫВОДЫ

В работе рассмотрены этапы построения и проверки создаваемых цифровых почвенных карт среднего и мелкого масштаба. Также рассмотрено влияние закладываемой модели на результат картографирования на примере среднемасштабной карты.

1) На этапе построения карты, среди опробованных методов моделирования: Random Forest (RF), Multinomial logistic regression (MLR), Linear discriminant analysis (LDA), – наибольшую точность предсказания показал метод случайного леса (Random Forest). Среднее значение индекса каппа для цифровой мелкомасштабной и предварительно откорректированной среднемасштабной карты составило 0.39, что соответствует удовлетворительному уровню совпадения (0.21–0.40), согласно Landis ([Landis, Koch, 1977](#)), но ближе к верхней границе градации.

2) Для ориентировочной проверки построенных картографических моделей были использованы группы почв, близкие по своему содержанию к отделам Классификации почв России 2004 г. Повышение определяемого таксономического уровня почв в целом негативно сказывается на достоверности проверяемой модели, однако, с методической точки зрения, проверка полученных карт с приведением их и полевых данных к единому языку оправдана.

3) Проверка по независимым полевым данным показала, что общая точность исходных карт и новых цифровых карт сходна: для мелкомасштабной карты – 24 и 26 %; для среднемасштабной

карты – 54 и 43 % соответственно. Предварительная коррекция исходной среднемасштабной карты позволила увеличить точность цифровой модели до 61 %. Такая коррекция возможна в ручном и автоматическом режимах для объектов, хорошо диагностируемых на снимке. В нашем случае это были водные объекты и массивы развеваемых песков. Создаваемая маска таких объектов в дальнейших процедурах статистического анализа выбранных ковариат не участвует и напрямую входит в создаваемую цифровую карту.

Следует отметить, что проверка средне- и особенно мелко-масштабных карт для территорий со сложным комплексным почвенным покровом по немногочисленным точечным полевым данным не может считаться полностью корректной. Скорее, ее следует рассматривать как предварительную оценку карт.

БЛАГОДАРНОСТЬ

Исследование выполнено при поддержке гранта РНФ “Крупномасштабное цифровое картографирование почв на основе дистанционного зондирования” (проект 15-16-30007). Автор благодарит сотрудников Почвенного института имени В.В. Докучаева С.Ф. Хохлова и Д.Е. Конюшкова за содействие в проведении исследований и написании статьи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Векшина В.Н.* Поиск и верификация предикторов почвообразования в лесотундровой зоне по дистанционным данным // Сборник кратких тезисов III Молодежной конференции “Почвоведение: Горизонты Будущего 2019”: сб. тр. науч. конф. М.: Почвенный институт имени В.В. Докучаева, 2019. [в печати]
2. ВСЕГЕИ (Всероссийский научно-исследовательский геологический институт им. А.П. Карпинского). URL: <http://www.vsegei.ru>.
3. Государственная почвенная карта СССР. Лист Q-39 (Нарьян-Мар). Гл. ред. Герасимов И.П., Егоров В.В., Иванова Е.Н., Розов Н.Н. ГУГК, фабрика № 4. 1977. 1 л.
4. Государственная почвенная карта СССР. М: 1 : 1 млн. Лист Q-40 (Печора) / Гл. ред. Герасимов И.П., Егоров В.В., Иванова Е.Н., Розов Н.Н., Фридланд В.М. ГУГК, фабрика № 10. 1982. 1 л.
5. *Докучаев П.М.* Построение цифровой почвенной карты и картограммы углерода с использованием методов цифрового почвенного

картографирования (на примере Вятско-Камской провинции дерново-подзолистых почв южной тайги): автореф. дис. ... канд. биол. наук: 03.02.13. М., 2017. 25 с.

6. *Жоголев А.В.* Актуализация региональных почвенных карт на основе спутниковых и геоинформационных технологий (на примере Московской области): автореф. дис. ... канд. с.-х. наук: 03.02.13. М., 2016. 22 с.

7. *Забоева И.В., Игнатенко И.В., Казаков В.Г., Попов В.А., Рубцов М.Д., Руднева Е.Н.* Государственная почвенная карта СССР Объяснительная записка к листу “Нарьян-Мар” Q-39. М.: Почвенный институт имени В.В. Докучаева. 1984. 62 с.

8. *Каверин Д.А., Шахтарова О.В., Пастухов А.В., Мажитова Г.Г., Лантева Е.М.* Составление крупномасштабных почвенных карт ключевых участков в тундре и лесотундре северо-востока Европейской России // География и природные ресурсы. 2012. № 3. С. 140–146.

9. *Конюшкова М.В., Козлов Д.Н.* Автоматизированный анализ распространения тёмноцветных черноземовидных почв в северном Прикаспии по данным космической съемки (на примере Джаныбекского стационара) // Аридные экосистемы. 2010. Т. 16. № 5. С. 46–56.

10. *Лавриненко И. А.* Геоботаническое районирование Большеземельской тундры и прилегающих территорий. Геоботаническое картографирование. СПб. Из-во: РАН Ботанический институт им. В.Л. Комарова. 2013. С. 74–92.

11. Научно-прикладной справочник по климату СССР. Сер. 3. Многолетние данные. Вып. 1. Архангельская и Вологодская области, Коми АССР. Книга 1. Л.: Гидрометеоиздат, 1989. 483 с.

12. *Осадчая Г.Г., Тумель Н.В.* Локальные ландшафты как индикаторы геокриологической зональности (на примере Европейского северо-востока) // Криосфера Земли. 2012. Т. XVI. № 3. С. 62–71.

13. Почвенная карта масштаба 1 : 200 000. Лист Q-39-V, VI (Нарьян-Мар) / Крейда Н.А. М., 1958. 1 л.

14. *Савин И.Ю.* Использование спутниковых данных для составления почвенных карт: современные тенденции и проблемы // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2016. Т. 13. № 6. С. 29–39.

15. *Савин И.Ю., Овечкин С.В.* Об обновлении Среднемасштабных почвенных карт // Почвоведение. 2014. № 10. С. 1184–1192.

16. *Савин И.Ю., Симакова М.С.* Спутниковые технологии для инвентаризации и мониторинга почв в России // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2012. Т. 9. № 5. С. 104–115.

17. *Сухачева Е.Ю., Апарин Б.Ф., Андреева Т.А., Казаков Э.Э., Лазарева М.А.* Принципы и методы создания цифровой среднemasштабной почвенной карты Ленинградской области // Вестник СПбГУ. Науки о Земле. 2019. Т. 64. № 1. С. 100–113.
18. *Abbaszadeh Afshar F., Ayoubi S., Jafari A.* The extrapolation of soil great groups using multinomial logistic regression at regional scale in arid regions of Iran // *Geoderma*. 2018. Vol. 315. P. 36–48.
19. *Abdel-Kader F.* Digital soil mapping at pilot sites in the northwest coast of Egypt: A multinomial logistic regression approach // *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Sciences*. 2011. Vol. 14. P. 29–40. DOI: [10.1016/j.ejrs.2011.04.001](https://doi.org/10.1016/j.ejrs.2011.04.001).
20. *Arrouays D., McKenzie N., Hempel J., de Forges A.R., McBratney A.* (Eds.). *GlobalSoilMap: Basis of the Global Spatial Information System*. CRC Press. Balkema, 2014. 494 p.
21. ASTER GDEM v. 2. <http://viewfinderpanoramas.org/dem1d.html>.
22. *Cohen J.* A coefficient of agreement for nominal scales // *Educ. Psychol. Measurement*. 1960. Vol. 20. P. 37–46.
23. *Cohen J.* Weighted kappa: Nominal scale agreement with provision for scaled disagreement or partial credit // *Psychol. Bull.* 1968. Vol. 70. P. 213–220.
24. *Dharumarajan S., Hegde R., Singh S.K.* Spatial prediction of major soil properties using random forest techniques – a case study in semi-arid tropics of South India // *Geoderma Reg.*, 2017. Vol. 10. P. 154–162.
25. *Grimm R., Behrens T., Märker M., Elsenbeer H.* Soil organic carbon concentrations and stocks on Barro Colorado Island—digital soil mapping using random forests analysis // *Geoderma*. 2008. Vol. 146. P. 102–113.
26. *Jeune W., Francelino M.R., Eliana de Souza, Elpídio Inácio Fernandes Filho, Rocha G.C.* Multinomial Logistic Regression and Random Forest Classifiers in Digital Mapping of Soil Classes in Western Haiti // *Rev. Bras. Ciênc. Solo*. 2018. Vol. 42. P. 1–20.
27. *Kempen B., Brus D.J., Heuvelink G.B.M., Stoorvogel J.J.* Updating the 1 : 50 000 Dutch soil map using legacy soil data: a multinomial logistic regression approach // *Geoderma*. 2009. Vol. 151. P. 311–326.
28. *Landis J.R., Koch G.G.* The measurement of observer agreement for categorical data // *Biometrics*. 1977. Vol. 33, No. 1. P. 159–174. DOI: [10.2307/2529310](https://doi.org/10.2307/2529310).
29. *Meier M., de Souza E., Francelino, M.R.* Digital Soil Mapping Using Machine Learning Algorithms in a Tropical Mountainous Area // *Rev. Bras. Ciênc. Solo*. 2018. Vol. 42. P. 1–22.
30. *McBratney A.B., Mendonça Santos, M.L., Minasny, B.* On Digital Soil Mapping // *Geoderma*. 2003. Vol. 117. P. 3–52.

31. *Nathan P., Odgers N.P., Wei Sun McBratney A.B., Minasny B., Clifford D.* Disaggregating and harmonising soil map units through resampled classification trees // *Geoderma*. 2014. Vol. 214–215. P. 91–100. DOI: [10.1016/j.geoderma.2013.09.024](https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2013.09.024).
32. *Pahlavan-Rad M.R., Khormali F., Toomanian N., Brungard C. W., Kiani F., Komaki C.B., Bogaert P.* Legacy soil maps as a covariate in digital soil mapping: A case study from Northern Iran // *Geoderma*. 2016. Vol. 279. P. 141–148.
33. *Piccini C., Marchetti A., Napoli R., Riviaccio R.* Multinomial logistic regression with soil diagnostic features and land surface parameters for soil mapping of Latium (Central Italy) // *Geoderma*. 2018. Vol. 352. P. 385–394. DOI: [10.1016/j.geoderma.2018.09.037](https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.09.037).
34. *Stum A.K., Boettinger M.A., White R.D., Ramsey R.D.* Random Forests Applied as a Soil Spatial Predictive Model in Arid Utah // *Digital Soil Mapping*. Springer. Dordrecht, The Netherlands, 2010. P. 179–190.
35. *Vågen T.G., L.A. Winowiecki L.A., Tondoh J.E., Desta L.T., Gumbricht T.* Mapping of soil properties and land degradation risk in Africa using MODIS reflectance // *Geoderma*. 2016. Vol. 263. P. 216–225.

REFERENCES

1. Vekshina V.N., Poisk i verifikatsiya prediktorov pochvoobrazovaniya v lesotundrovoy zone po distantsionnyim dannym (Search for and verification of soil predictors in the forest-tundra zone on the basis of remote sensing data), Collection of short abstracts of the *III Youth Conference Pochvovedenie: Gorizontyi Buduschego 2019* (Proc. Youth Conf. Soil Science: Horizons of the Future 2019), Moscow: V.V. Dokuchaev Soil Science Institute, 2019 [in print].
2. VSEGEI, Vserossiiskiy nauchno-issledovatel'skiy geologicheskiiy institut im. A.P Karpinskogo (All-Russian State Research Institute named after Karpinsky), URL: <http://www.vsegei>.
3. Gerasimov I.P., Egorov V.V., Ivanova E.N., Rozov N.N. (Eds.), *USSR State Soil Map*, scale 1 : 1 M, Sheet Q-39, Nar'yan-Mar, GUGK, factory No. 4, 1977.
4. Gerasimov I.P., Egorov V.V., Ivanova E.N., Rozov N.N. (Eds.), *USSR State Soil Map*, scale 1 : 1 M, Sheet Q-40, Pechora, GUGK, factory No. 10, 1982.
5. Dokuchayev P.M., *Postroyeniye tsifrovoy pochvennoy karty i kartogrammy ugleroda s ispolzovaniyem metodov tsifrovogo pochvennogo kartografirovaniya (na primere Vyatsko-Kamskoy provintsii dernovo-podzolistykh pochv yuzhnoy taygi): Diss. ... kand. biol. nauk* (Construction of

a digital soil map and carbon map using digital soil mapping methods (by the example of the Vyatka-Kama province of sod-podzolic soils of the southern taiga), Cand. boil. sci. thesis), Moscow: MSU, 2017, 206 p.

6. Zhogolev A.V., *Aktualizatsiya regionalnykh pochvennykh kart na osnove sputnikovykh i geoinformatsionnykh tekhnologiy (na primere Moskovskoy oblasti): Diss. ... kand agric. nauk* (Updating regional soil maps based on satellite and geographic information technologies (by the example of Moscow region), Cand. agric. sci. thesis), Moscow: V.V. Dokuchaev Soil Science Institute, 2016, 203 p.

7. Zaboeva I.V., Ignatenko I.V., Kazakov V.G., Popov V.A., Rubtsov M.D., Rudneva E.N., *USSR State Soil Map, Ob'yasnitel'naya zapiska k listu "Nar'yan-Mar" Q -39* (explanatory note to the sheet "Nar'yan-Mar" Q -39), Moscow: V.V. Dokuchaev Soil Science Institute, 1984, 62 p.

8. Kaverin D.A., Shakhtarova O.V., Pastukhov A.V., Mazhitova G.G., Lapteva E.M., *Sostavleniye krupnomasshtabnykh pochvennykh kart klyuchevykh uchastkov v tundre i lesotundre severo-vostoka Evropeyskoy Rossii* (The large-scale soil maps mapping for key areas in the tundra and forest-tundra of the north-east of European Russia), *Geography and Natural Resources*, 2012, No. 3, pp.140–146.

9. Konyushkova M.V., Kozlov D.N., *Avtomatizirovanny analiz rasprostraneniya temnotsvetnykh chernozemovidnykh pochv v severnom Prikaspii po dannym kosmicheskoy syemki (na primere Dzhanybekskogo stacionara)* (Automated analysis of the distribution of dark-colored chernozem-like soils in the northern Caspian region according to satellite imagery (by the example of the Dzhanybek station)), *Arid ecosystems*, 2010, Vol. 16, No. 5, pp. 46–56.

10. Lavrinenko I.A., *Geobotanicheskoe rajonirovanie Bol'shezemel'skoy tundry i privileyushchih territoriy. Geobotanicheskoe kartografirovanie* (Geobotanical mapping), St. Petersburg: Iz-vo RAS Botanical Institute named after V.L. Komarov, 2013, pp. 74–92.

11. *Nauchno-prikladnoy spravochnik po klimatu SSSR* (Scientific reference book on climatology of the USSR), Ser. 3, Iss. 1, Arkhangelsk and Volgograd region, Komi ASSR, 1989, Book 1, Leningrad: Gidrometeoizdat, 485 p.

12. Osadchaya G.G., Tumel'N.V., *Lokal'nye landshafty kak indikatorы geokriologicheskoy zonal'nosti (na primere Evropeyskogo severo-vostoka)* (Local landscapes as indicators of permafrost zonality (by the example of the European Northeast)), *Earth Cryosphere*, 2012, Vol. XVI, No. 3, pp. 62–71.

13. Kreida N.A., *Soil map, scale 1 : 200,000, Sheet Q-39-V, VI Nar'yan-Mar*, Moscow, 1958.

14. Savin I.Yu., *Ispolzovaniye sputnikovykh dannyykh dlya sostavleniya pochvennykh kart: sovremennyye tendentsii i problemy* (Using satellite data

for soil mapping: current trends and challenges), *Modern problems of remote sensing of the Earth from space*, 2016, Vol. 13, No. 6, pp. 29–39.

15. Savin I.Yu., Ovechkin S.V., Ob obnovlenii Srednemashtabnykh pochvennykh kart (About Upgrading Medium scale Soil Maps), *Pochvovedeniye*, 2014, No. 10, pp. 1184–1192.

16. Savin I.Yu., Simakova M.S., Sputnikovyye tekhnologii dlya inventarizatsii i monitoringa pochv v Rossii (Satellite technologies for soil inventory and monitoring in Russia), *Modern problems of remote sensing of the Earth from space*, 2012, Vol. 9, No. 5, pp. 104–115.

17. Sukhacheva E.Yu., Aparin B.F., Andreyeva T.A., Kazakov E.E., Lazareva M.A., Printsipy i metody sozdaniya tsifrovoy srednemashtabnoy pochvennoy karty Leningradskoy oblasti (Principles and methods for creating a digital medium-scale soil map of the Leningrad Region), *Bulletin of St. Petersburg State University, Earth sciences*, 2019, Vol. 64, No. 1, pp. 100–113.

18. Abbaszadeh Afshar F., Ayoubi S., Jafari A., The extrapolation of soil great groups using multinomial logistic regression at regional scale in arid regions of Iran, *Geoderma*, 2018, Vol. 315, pp. 36–48.

19. Abdel-Kader F., Digital soil mapping at pilot sites in the northwest coast of Egypt: A multinomial logistic regression approach, *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Sciences*, 2011, Vol. 14, pp. 29–40, DOI: [10.1016/j.ejrs.2011.04.001](https://doi.org/10.1016/j.ejrs.2011.04.001).

20. Arrouays D., McKenzie N., Hempel J., de Forges A.R., McBratney A. (Eds.), *GlobalSoilMap: Basis of the Global Spatial Information System*, CRC Press, Balkema, 2014, 494 p.

21. ASTERGDEMv. 2. URL: <http://viewfinderpanoramas.org/dem1d.html>.

22. Cohen J., A coefficient of agreement for nominal scales, *Educ. Psychol. Measurement*, 1960, Vol. 20, pp. 37–46.

23. Cohen J., Weighted kappa: Nominal scale agreement with provision for scaled disagreement or partial credit, *Psychol. Bull.*, 1968, Vol. 70, pp. 213–220.

24. Dharumarajan S., Hegde R., Singh S.K., Spatial prediction of major soil properties using random forest techniques – a case study in semi-arid tropics of South India, *Geoderma Reg.*, 2017, Vol. 10, pp. 154–162.

25. Grimm R., Behrens T., Märker M., Elsenbeer H., Soil organic carbon concentrations and stocks on Barro Colorado Island—digital soil mapping using random forests analysis, *Geoderma*, 2008, Vol. 146, pp. 102–113.

26. Jeune W., Francelino M.R., Eliana de Souza, Elpidio Inácio Fernandes Filho, Rocha G.C., Multinomial logistic regression and random forest classifiers in digital mapping of soil classes in western Haiti, *Rev. Bras. Ciênc. Solo*, 2018, Vol. 42, pp. 1–20.

27. Kempen B., Brus D.J., Heuvelink G.B.M., Stoorvogel J.J., Updating the 1:50,000 Dutch soil map using legacy soil data: a multinomial logistic regression approach, *Geoderma*, 2009, Vol. 151, pp. 311–326.
28. Landis J.R., Koch G.G., The measurement of observer agreement for categorical data, *Biometrics*, 1977, Vol. 33, No. 1, pp. 159–174, DOI: [10.2307/2529310](https://doi.org/10.2307/2529310).
29. Meier M., de Souza E., Francelino M.R., Digital Soil Mapping Using Machine Learning Algorithms in a Tropical Mountainous Area, *Rev. Bras. Ciênc. Solo*, 2018, Vol. 42, pp. 1–22.
30. McBratney A.B., Mendonça Santos M.L., Minasny B., On Digital Soil Mapping, *Geoderma*, 2003, Vol. 117, pp. 3–52.
31. Nathan P., Odgers N.P., Wei Sun, McBratney A.B., Minasny B., Clifford D., Disaggregating and harmonising soil map units through resampled classification trees, *Geoderma*, 2014, Vol. 214–215, pp. 91–100, DOI: [10.1016/j.geoderma.2013.09.024](https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2013.09.024).
32. Pahlavan-Rad M.R., Khormali F., Toomanian N., Brungard C. W., Kiani F., Komaki C.B., Bogaert P., Legacy soil maps as a covariate in digital soil mapping: A case study from Northern Iran, *Geoderma*, 2016, Vol. 279, pp. 141–148.
33. Piccini C., Marchetti A., Napoli R., Riviaccio R., Multinomial logistic regression with soil diagnostic features and land surface parameters for soil mapping of Latium (Central Italy), *Geoderma*, 2018, Vol. 352, pp. 385–394, DOI: [10.1016/j.geoderma.2018.09.037](https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.09.037).
34. Stum A.K., Boettinger M.A., White R.D., Ramsey R.D., Random Forests Applied as a Soil Spatial Predictive Model in Arid Utah, *Digital Soil Mapping*, Springer, Dordrecht, The Netherlands, 2010, pp 179–190.
35. Vågen T.G., Winowiecki L.A., Tondoh J.E., Desta L.T., Gumbricht T., Mapping of soil properties and land degradation risk in Africa using MODIS reflectance, *Geoderma*, 2016, Vol. 263, pp. 216–225.

УДК 631.4

DOI: 10.19047/0136-1694-2019-99-47-61

Ссылки для цитирования:

Кравченко Е.И. Факторы засоления почв участков “Червленое” и “Дубоовражный” Светлоярской оросительной системы // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2019. Вып. 99. С. 47-61. DOI: 10.19047/0136-1694-2019-99-47-61

Cite this article as:

Kravchenko E.I., Agents of soil salinization in “Chervlenoe” and “Duboovrazhniy” plots of the Svetloyarsk irrigation system, Dokuchaev Soil Bulletin, 2019, V. 99, pp. 47-61, DOI: 10.19047/0136-1694-2019-99-47-61

Факторы засоления почв участков “Червленое” и “Дубоовражный” Светлоярской оросительной системы

© 2019 г. Е. И. Кравченко

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

<https://orcid.org/0000-0003-4609-5650>, e-mail: krav4enko_elena@mail.ru.

*Поступила в редакцию 01.06.2019, после доработки 26.08.2019,
принята к публикации 21.11.2019*

Резюме: Изучены факторы, определяющие засоленность почв ключевых участков “Червленое” и “Дубоовражный” Светлоярской оросительной системы (Волгоградская область). Проводился многофакторный дисперсионный анализ зависимости суммы токсичных солей по результатам водной вытяжки (1 : 5) от факторов: рельефа, растительности, пород, способа орошения. Было выявлено, что фактором, определяющим степень засоления почв по сумме токсичных солей, в обоих случаях являются породы. Их вклад в общую дисперсию составил более 80 % для обоих исследуемых участков. На участке “Дубоовражный” значимым фактором также оказался рельеф. Антропогенный фактор – способ орошения – оказался незначимым. Были построены кумулятивные частоты встречаемости степеней засоления почвы по слоям 0–30 см, 30–100 см, 100–150 см, 150–200 см. Верхний слой почвы 0–30 см практически незасолен на обоих участках. На почвах участка “Червленое” встречаются сильные и очень сильные степени засоления, в целом почвы этого участка имеют более высокие значения

суммы токсичных солей, чем почвы участка “Дубоовражный”.

Ключевые слова: степень засоления, сумма токсичных солей, кумулятивные частоты встречаемости степени засоления.

Agents of soil salinization in “Chervlenoe” and “Duboovrazhniy” plots of the Svetloyarsk irrigation system

E. I. Kravchenko

*V.V. Dokuchaev Soil Science Institute,
7 Bld. 2 Pyzhevskiy per., Moscow 2119017, Russian Federation,
<https://orcid.org/0000-0003-4609-5650>, e-mail: krav4enko_elen@mail.ru.*

Received 01.06.2019, Revised 26.08.2019, Accepted 21.11.2019

Abstract: The agents that determine the soil salinity of the key plots “Chervlenoe” and “Duboovrazhniy” of the Svetloyarsk irrigation system (Volgograd region) are studied. We carried out a multifactor analysis of the toxic salts amount variance depending on the following agents: relief, vegetation, parent material and irrigation method, the water extract (1 : 5) being used. It was found that the factors determining the degree of soil salinity in terms of the amount of toxic salts in both cases is parent material. Its contribution into the total variance was more than 80 % for both studied plots. On the plot “Duboovrazhniy” relief also turned out to be a significant factor. Anthropogenic factor – the method of irrigation – was insignificant. The graphs of cumulative frequencies of the occurrence of salinity levels were constructed for soil layers of 0–30 cm, 30–100 cm, 100–150 cm, 150–200 cm. The top soil layer of 0–30 cm is almost non-saline in both areas. On the “Chervlenoe” plot there are strong and very strong degrees of soil salinization; in general, this site is characterized by higher toxic salts amount compared to the “Duboovrazhniy” plot.

Keywords: degree of salinity, amount of toxic salts, cumulative salinity rates.

ВВЕДЕНИЕ

Засоление почв является негативным процессом, широко распространенным в южных регионах России, и приводит к потере урожая ([Засоленные..., 2006](#)). Сценарий, по которому протекает процесс засоления, определяется природными и антропогенными факторами ([Ковда, 1980](#)). К ним относятся:

- климат (количество осадков, испаряемость, давление паров влаги в воздухе, их динамика);
- геологические, геоморфологические, геохимические, гидрологические и гидрохимические факторы (естественный дренаж, глубина и флуктуации уровня грунтовых вод, их химический состав и общая минерализация, направление и скорость горизонтального потока, исходная засоленность почвообразующих пород, расчлененность территории);
- свойства почв (строение профиля, механический состав, структура, водопроницаемость, содержание легкорастворимых солей, состав обменного комплекса, рН и т. д.);
- агротехнические (землепользование, выращиваемые культуры, методы обработки почв и т. д.);
- характер орошения (количество оросительной воды, частота и способ ее подачи, содержание солей и их химизм в ирригационных водах, организация искусственного дренажа и т. д.);

Изучение факторов засоления на конкретных примерах позволяет найти пути решения проблемы засоления почв и дать рекомендации по применению тех или иных методов мелиорации засоленных почв.

Цель исследования – выявление вклада различных факторов засоления почв, как природных, так и антропогенных, на примере двух участков Светлоярской оросительной системы: “Червленое” и “Дубоовражный”.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Объекты исследования – участок “Дубоовражный” и участок “Червленое” Светлоярской оросительной системы – расположены на юге Волгоградской области, на границе с Калмыкией. Схематичное расположение участков исследования изображено на физической карте России (рис. 1).

Оба участка локализованы в границах сухостепной зоны. Климат континентальный, засушливый, $K_{увл} = 0.3$. Естественные почвы на обоих участках были представлены светло-каштановыми солонцовыми комплексами ([Дягтерева и др., 1970](#)).

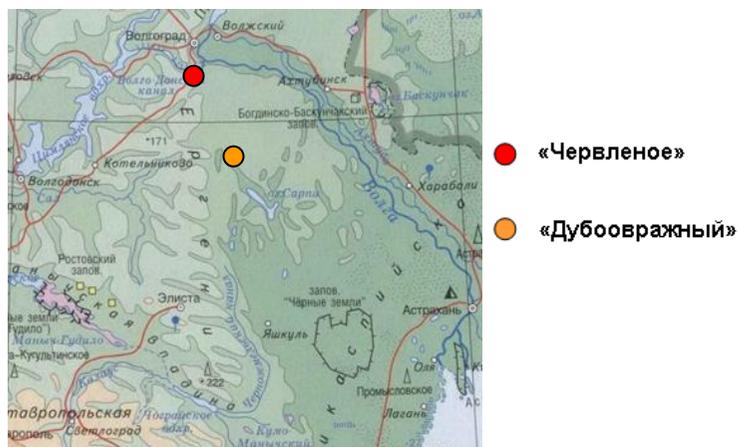


Рис. 1. Схематичное расположение участков “Червленое” и “Дубоовражный” на физической карте России.

Fig. 1. Schematic location of the “Chervlenoe” and “Duboovrazhnyi” plots on the physical map of Russia.

Участок “Червленое” занимает северные отроги возвышенности Ергени. Почвообразующие породы – лёссовидные суглинки, содержащие водорастворимые соли ([Засоленные..., 2006](#)). Грунтовые воды сульфатно-хлоридного магниево-натриевого состава ([Горохова, 1992](#); [Панкова и др., 2004](#); [Новикова и др., 2009](#)) залегают на глубине 9–11 м, по данным за 2017 г. Орошаемые почвы – светло-каштановые орошаемые ([Классификация..., 1977](#)), агрозоны светлые дисперсно-карбонатные или сегрегационно-карбонатные, в некоторых случаях карбонатно-аккумулятивные ([Полевой..., 2008](#)). Орошение на этом участке частично отсутствует, некоторые поля орошаются дождеванием ([Кравченко и др., 2018](#)). Содержание солей постепенно увеличивается с глубиной, сумма токсичных солей в верхних горизонтах составляет 0–0.4 %, а на глубине 2 м достигает 4 % в солонцах и 1.5 % – в светло-каштановых почвах ([Засоленные..., 2006](#)).

Впервые засоление почв на этом участке было зафиксировано в 1990-е годы. Отмечалось, что на участке присутствует сильное и очень сильное поверхностное засоление, которое было заметно на аэрофотоснимках в виде светлых пятен и полос с “ба-

хромой” по краям, в то время на участке применялось орошение поверхностным способом ([Горохова, 1992](#)). В период 1990–2000 гг. участок не орошался. В работах ([Панкова и др., 2004](#); [Новикова и др., 2009](#)) было отмечено, что в результате прекращения орошения под действием атмосферных осадков произошло рассоление поверхностных горизонтов почв и увеличение содержания солей на глубине 1–2 м. Орошение дождеванием было возобновлено с 2000-х годов. Современное состояние почв участка “Червленое” было изучено в августе 2017 г. В статье ([Кравченко и др., 2018](#)) зафиксировано, что в пределах первого метра орошаемые почвы имеют слабую и среднюю степень засоления, максимум солей располагается во втором метре, распределение содержания солей по глубине срединно-аккумулятивное.

Участок “Дубоовражный” расположен в Сарпинской ложбине Прикаспийской низменности ([Доскач, 1979](#)). Почвообразующие породы на этом участке – хвалынские суглинистые отложения, подстилаемые хвалынскими шоколадными глинами, локально хвалынские глины перекрыты песчаными линзами мощностью до 1 м. Грунтовые воды залегают на глубине 7–8 м. Орошаемые почвы – светло-каштановые орошаемые ([Классификация..., 1977](#)), агрозоны светлые дисперсно-карбонатные, в некоторых случаях карбонатно-аккумулятивные ([Полевой..., 2008](#)). Все поля этого участка орошаются капельным способом.

Ранее участок “Дубоовражный”, так же, как и “Червленое”, входил в состав Светлоярской оросительной системы, известно, что на нем осуществлялось орошение посредством дождевальных установок. Состояние засоления орошаемых почв этого участка до настоящего момента не было изучено. По состоянию на 2018 г. этот участок принадлежит частному фермерскому хозяйству.

Из литературы ([Засоленные..., 2006](#)) известно, что почвы, близко подстилаемые шоколадными глинами, имеют неравномерный тип распределения солей: верхняя часть профиля обычно имеет слабую степень засоления (плотный остаток 0.2–0.4 %), ниже 40–50 см количество солей резко возрастает (плотный остаток 1.5–1.7 %), а на глубине 70–80 см величина плотного остатка достигает 2.5–2.7 %. Сумма токсичных солей с поверхности до 30 см близка к 0, а с глубины 70–200 см составляет 1–1.2 %

[\(Засоленные..., 2006\)](#).

Для обследования были выбраны именно эти участки, поскольку, во-первых, они подвергались орошению в течение длительного времени (1960–1990 гг.) и частично орошались позднее (после 2000-х годов), что позволяет наблюдать динамическое изменение характеристик засоленности почв в условиях длительного орошения. Во-вторых, участки располагаются в сходных климатических условиях, но сильно отличаются геологическим строением и геоморфологией, что представляет интерес с научной точки зрения.

В поле были взяты образцы с участков “Червленое” и “Дубоовражный”. Всего было получено 122 образца, отобранных буром до глубины 2 м послойно с шагом 10–30 см из 11 скважин на участке “Червленое”, и 109 образцов из 10 скважин участка “Дубоовражный”.

В программе Statistica-6 выполнен 4-факторный дисперсионный анализ ([Searle et al., 1992](#); [Swallow et al., 1984](#)) суммы токсичных солей по водной вытяжке (1 : 5) для участка “Червленое” и для общего массива данных по двум участкам. Для анализа были взяты качественные градации факторов: элемент мезорельефа (выровненная поверхность, пологий выпуклый склон, пологий вогнутый склон, ложбина); растительность/культура (арбузы, лук, капуста, морковь, хлопок, полынь, козлятник и т. д.); зафиксированный в поле характер гранулометрического состава почвообразующих пород (среднесуглинистые и легкосуглинистые, песчаные, хвалынские шоколадные глины); способ орошения (капельный полив, дождевание, отсутствует). Фактор “способ орошения” не используется для участка “Дубоовражный”, так как этот участок целиком орошается капельным способом, для этого участка выполнен 3-факторный дисперсионный анализ.

Построение эмпирических кумулятивных статистических распределений средневзвешенного содержания суммы токсичных солей и круговых диаграмм сделано в пакете программ Excel-2003.

Выделение различных степеней засоления по сумме токсичных солей в зависимости от химизма засоления проводилось по классификации, приведенной в монографии ([Научные..., 2013](#)).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Рассмотрим соотношение (%) образцов по степени засоления, определенной по сумме токсичных солей ($S_{\text{токс.}}$, %) с учетом химизма горизонтов (рис. 2). Заметно, что на обоих участках преобладают незасоленные варианты. На участке “Червленое” 36 % составляют средnezасоленные образцы, 15 % – слабозасоленные и всего 2 % – сильнозасоленные образцы, варианты с очень сильным засолением отсутствуют. На участке “Дубоовражный” примерно поровну, 16–19 % составляют соответственно слабо-, средне- и сильнозасоленные образцы, и 1 % – очень сильно засолен.

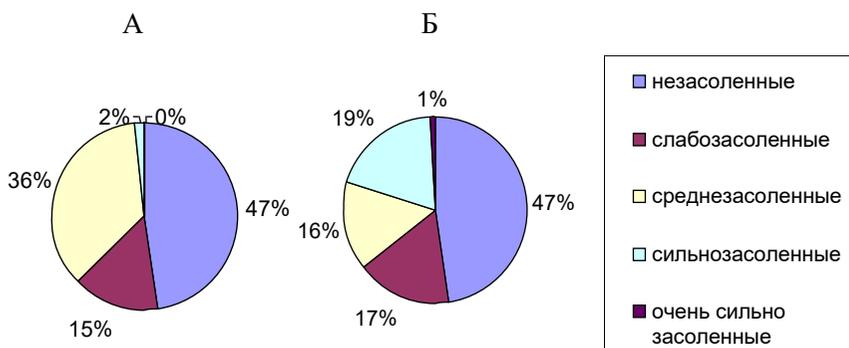


Рис. 2. Соотношение образцов (%) по степени засоления для А) участка “Червленое” ($N = 122$), Б) участка “Дубоовражный” ($N = 109$), N – количество исследуемых образцов.

Fig. 2. The ratio of samples (%) according to the degree of salinity for А) the “Chervlenoe” plot ($N = 122$), Б) “Duboovrazhniy” plot ($N = 109$), N is the number of samples studied.

Ниже приведены результаты дисперсионного многофакторного анализа для участков “Дубоовражный” (табл. 1), “Червленое” (табл. 2) и общего массива данных (табл. 3) для двух участков.

Красным цветом выделены значимые эффекты ($p < 0.05$), MS – средний квадрат отклонений для изучаемого фактора, F – значение критерия Фишера, p – соответствующий ему уровень значимости.

Вклад каждого фактора рассчитывался по формуле:

$$k = (MS/\Sigma MS)*100 \%$$

Таблица 1. Влияние факторов для участка “Дубоовражный”
Table 1. The influence of factors for “Duboovrazhniy” plot

	Степень свободы df	S _{токс.} , % MS	Ошиб- ка df	Ошиб- ка MS	F	p
{1}Элемент рельефа	3	0.116	98	0.033	3.469	0.019
{2}Растительность/ культура	3	0.078	98	0.033	2.325	0.079
{3}Породы	4	0.957	98	0.033	28.61	0.000

На участке “Дубоовражный” вклад пород в общую дисперсию составил 83.1 % (хвалынским шоколадным глинам соответствуют значения 0.4–0.6 % суммы токсичных солей, по другим параметрам они не превышают 0.2 %), элементов рельефа – 10 %, вида выращиваемой культуры – 6.9 %.

Аналогично были проведены анализы для участка “Червленое” и всего массива данных по двум участкам с целью выявить влияние различных способов орошения. Для участка “Червленое” (табл. 2) значим только фактор породы, его вклад достигает 84.2 %. Для общего массива из двух участков (табл. 3) вклад способа орошения незначим, пород – 73 %, растительности/культур – 14 %, рельефа – 13 %.

Таблица 2. Влияние факторов для участка “Червленое”
Table 2. The influence of factors for “Chervlenoe” plot

	Степень свободы df	S _{токс.} , % MS	Ошиб- ка df	Ошиб- ка MS	S _{токс.} , % F	S _{токс.} , % p
{1}Элемент рельефа	2	0.157	113	0.097	1.622	0.202
{2}Растительность/ культура	5	0.216	113	0.097	2.226	0.056
{3}Породы	1	1.995	113	0.097	20.55	0.000
{4}Способ орошения	0	0.000				

Таблица 3. Влияние факторов для обоих участков “Червленое” и “Дубоовражный”

Table 3. The influence of factors for the both plots “Chervlenoe” and “Duboovrazhniy”

	Степень свободы df	$S_{\text{токс.}}$ % MS	Ошиб-ка df	Ошиб-ка MS	$S_{\text{токс.}}$ % F	$S_{\text{токс.}}$ % p
{1}Элемент рельефа	4	0.204	211	0.067	3.019	0.019
{2}Растительность/ культура	10	0.218	211	0.067	3.231	0.001
{3}Породы	5	1.165	211	0.067	17.25	0.000
{4}Способ орошения	0	0.000				

Для выявления распределения засоления по глубине был проведен анализ кумулятивных кривых средневзвешенной для слоя суммы токсичных солей ($S_{\text{токс. срвзв.}}$ %) в почве (рис. 3а, 3б) в слоях 0–30 см, 30–100 см, 100–150 см, 150–200 см, (градации глубин взяты из классификации почв по глубине залегания первого от поверхности засоленного горизонта ([Научные... 2013](#)): слой 0–30 см соответствует солончаковым вариантам, 30–100 см – солончаковатым, 100–150 см – глубокосолончаковатым, 150–200 – глубоководзасоленным), который показал различную картину на участке “Дубоовражный” и участке “Червленое”.

Глубина залегания солей не является фактором засоления почв, а, скорее, результатом действия факторов, обуславливающих засоление. Тем не менее, на участке “Дубоовражный” в пределах почвенного профиля на разной глубине вскрываются различные породы (суглинки и шоколадные глины), которые, в свою очередь, могут оказывать влияние на содержание солей на этой глубине. Кроме того, пахотный слой 0–30 см находится в зоне антропогенного воздействия, которое также может влиять на содержание солей в почве.

В слое 0–30 см на обоих участках встречаются незасоленные горизонты с незначительным участием слабозасоленных ($S_{\text{токс.}}$ не превышает 0.1 %). График для слоя 30–100 см более пологий на участке “Червленое”, что свидетельствует о более высокой частоте встречаемости солончаковатых вариантов. Толща 100–200 см однородна по сумме токсичных солей для участка “Червленое”, но

на участке “Дубоовражный” чаще встречается сильное засоление в слое 150–200 см, что может объясняться подстилением суглинистой толщи хвалынскими шоколадными глинами на этой глубине.

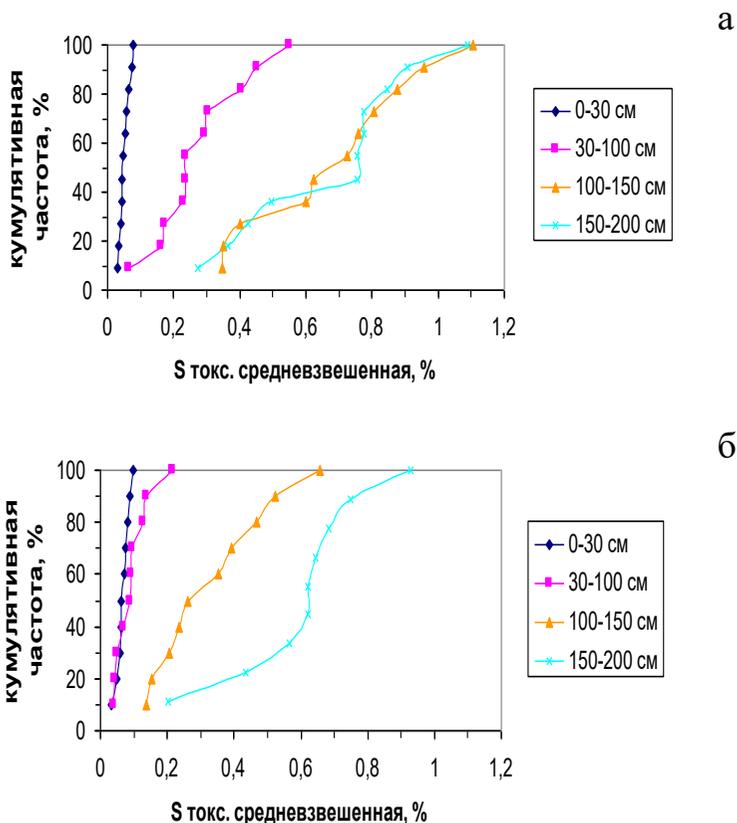


Рис. 3. Кумулятивная частота встречаемости различных степеней засоления для диапазонов глубин 0–30 см, 30–100 см, 100–150 см, 150–200 см на участках а) “Червленое”; б) “Дубоовражный”.

Fig. 3. The cumulative frequency of occurrence of different degrees of salinization for the depth ranges of 0–30 cm, 30–100 cm, 100–150 cm, 150–200 cm on plots а) “Chervlenoe”; б) “Duboovrazhniy”.

В настоящее время существует множество способов обработки данных по засоленным почвам, особенно широко распространены графические способы представления данных ([Sharp-Heward et al., 2014](#)), в том числе построение графиков изменения показателей по глубине ([He et al., 2014](#)), площадных карт распределения показателей засоления ([Teartisup et al., 2007](#)), двумерных профилей ([Новикова и др., 2009](#); [Кравченко и др., 2018](#)), моделирование ([Wang et al., 2007](#)). Реже встречаются временные схемы и диаграммы ([Inam et al., 2015](#)), 2-факторный анализ ([Wang et al., 2015](#)). Многофакторный анализ, использованный в данной статье, позволяет выявлять какие из заданных качественных факторов определяют степень засоления почв, выраженную в данном случае суммой токсичных солей. Кроме того, данный анализ дает более широкое представление об исследуемом объекте, и полезную информацию для дальнейших исследований.

ВЫВОДЫ

На обоих ключевых участках “Червленое” и “Дубоовражный” наибольший вклад в дисперсию суммы токсичных солей вносят почвообразующие породы. На участке “Дубоовражный” значимыми оказались также факторы рельеф и тип выращиваемой культуры. Фактор различных способов орошения незначим, то есть способ орошения этих участков не повлиял на состояние засоленности горизонтов.

Около 50 % всех исследуемых образцов на обоих участках незасолены. На участке “Червленое” 36 % составляют средnezасоленные горизонты, около 20 % имеют слабое засоление. На участке “Дубоовражный” на слабую, среднюю и сильную степень засоления приходится соответственно по 17, 16 и 19 % образцов. Верхний слой 0–30 см на обоих участках незасолен, либо слабозасолен, на участке “Червленое” преобладают солончакватые варианты, на участке “Дубоовражный” подстилающие шоколадные хвалынские глины обуславливают более сильное засоление в слое 150–200 см.

БЛАГОДАРНОСТЬ

Выражается благодарность сотрудникам Почвенного института имени В.В. Докучаева – Хитрову Н.Б., Гороховой И.Н. – за организацию экспедиционных исследований и помощь в интерпретации результатов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Горохова И.Н.* Оценка засоления орошаемых почв Нижнего Поволжья с использованием аэрофотоснимков. Автореф. дис. ... канд. техн. н. М., 1992. 25 с.
2. *Дегтярева Е.Т., Жулидова А.Н.* Почвы Волгоградской области. Волгоград: Нижне-Волжское книжное изд-во, 1970. 319 с.
3. *Доскач А.Г.* Природное районирование Прикаспийской пустыни. М.: Наука, 1979. 141 с.
4. Засоленные почвы России / Отв. редакторы Л.Л. Шишов, Е.И. Панкова. М.: ИКЦ “Академкнига”, 2006. 853 с.
5. Классификация и диагностика почв СССР. М.: Колос, 1977. 247 с.
6. *Ковда В.А.* Моделирование процессов засоления и осолонцевания почв. М.: Наука, 1980. 264 с.
7. *Кравченко Е.И., Хитров Н.Б., Горохова И.Н.* Двумерное распределение засоления орошаемых почв рядом с оросительным каналом на участке “Червленое” Светлоярской оросительной системы // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2018. Вып. 94. С. 19–37. DOI: [10.19047/0136-1694-2018-94-19-3](https://doi.org/10.19047/0136-1694-2018-94-19-3).
8. *Новикова А.Ф., Гэтин Ло, Коношкова М.В.* Динамика процессов засоления – рассолнения почв участка “Червленое” Светлоярской оросительной системы в ирригационный и постирригационный периоды // Бюллетень Почвенного института имени В. В. Докучаева. 2009. Вып. 63. С. 16–24. DOI: [10.19047/0136-1694-2009-63-16-24](https://doi.org/10.19047/0136-1694-2009-63-16-24).
9. 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.: Почвенный институт имени В.В. Докучаева Россельхозакадемии, 2013. 756 с.
10. *Панкова Е.И., Новикова А.Ф.* Мелиоративное состояние и вторичное засоление почв орошаемых земель Волгоградской области // Почвоведение. 2004. № 6. С. 731–744.

11. Полевой определитель почв России. М.: *Почвенный институт имени В.В. Докучаева*, 2008. 182 с.
12. *He B., Cai Y., Ran W., Jiang H.* Spatial and seasonal variations of soil salinity following vegetation restoration in coastal saline land in eastern China // *Catena*. 2014. Vol. 118. P. 147–153. DOI: [10.1016/j.catena.2014.02.007](https://doi.org/10.1016/j.catena.2014.02.007).
13. *Inam A., Adamowski J., Halbe J., Prasher S.* Using causal loop diagrams for the initialization of stakeholder engagement in soil salinity management in agricultural watersheds in developing countries: a case study in the Rechna Doab watershed, Pakistan // *Journal of environmental management*. 2015. Vol. 152. P. 251–267. DOI: [10.1016/j.jenvman.2015.01.052](https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2015.01.052).
14. *Searle S.R., Casella G., McCulloch C.E.* Variance Components. John Wiley and Sons. New York. 1992. 501 p. DOI: [10.1002/9780470316856](https://doi.org/10.1002/9780470316856).
15. *Sharp-Heward S., Almond P., Robinson B.* Soil disturbance and salinization on a vineyard affected by landscape recontouring in Marlborough, New Zealand // *Catena*. 2014. Vol. 122. P. 170–179. DOI: [10.1016/j.catena.2014.06.022](https://doi.org/10.1016/j.catena.2014.06.022).
16. *Swallow W.H., Monahan Monte Carlo J.F.* Comparison of ANOVA, MIVQUE, REML, and ML Estimators of Variance Components // *Technometrics*. 1984. Vol. 26. No. 1. P. 47–57. DOI: [10.2307/1268415](https://doi.org/10.2307/1268415).
17. *Teartisup P., Kerdsueb P., Wattaya P.* Field scale mapping of soil salinity on spatial interpolation techniques, case study: Khorat Basin, Nakhon Ratchasima Province, Thailand. Proc. 6th Intern. Conf. on Environmental Informatics. ISEIS. 2007.
18. *Wang H., Y. Ping Hsieh, Mark A. Harwell, Huang W.* Modeling soil salinity distribution along topographic gradients in tidal salt marshes in Atlantic and Gulf coastal regions // *Ecological Modelling*. 2007. Vol. 201. Issues 3–4. P. 429–439.
19. *Wang X., Yang J., Liu G., Yao R., Yu S.* Impact of irrigation volume and water salinity on winter wheat productivity and soil salinity distribution. *Agricultural Water Management*. 2015. Vol. 149. P. 44–54. DOI: [10.1016/j.agwat.2014.10.027](https://doi.org/10.1016/j.agwat.2014.10.027).

REFERENCES

1. Gorokhova I.N., *Otsenka zasoleniya oroshaemykh pochv Nizhnego Povolzh'ya s ispol'zovaniem aerofotosnimkov. Avtoref. dis. ... kand. techn. n.* (Assessment of salinization of irrigated soils of the Lower Volga region using aerial photographs, Extended abstract of cand. tech. sci. thesis), Moscow, 1992, 25 p.

2. Degtyareva E.T., Zhulidova A.N., *Pochvy Volgogradskoi oblasti* (Soils of the Volgograd region), Volgograd: Nizhne-Volzhskoe knizhnoe izd-vo, 1970, 319 p.
3. Doskach A.G., *Prirodnoe raionirovanie Prikaspiiskoi pustyni* (Natural zoning of the Caspian desert), Moscow: Nauka, 1979, 141 p.
4. Shishov L.L., Pankova E.I. (Eds), *Zasolennye pochvy Rossii* (Saline soils of Russia), Moscow: IKTs “Akademkniga”, 2006, 853 p.
5. *Klassifikatsiya i diagnostika pochv SSSR* (Classification and soil diagnostics of the USSR), Moscow: Kolos, 1977, 247 p.
6. Kovda V.A., *Modelirovanie protsessov zasoleniya i osolontsevaniya pochv* (Modeling of salinization and soil salinization processes), Moscow: Nauka, 1980, 264 p.
7. Kravchenko E.I., Khitrov N.B., Gorokhova I.N., Two-dimensional distribution of salinity in irrigated soils near the irrigation channel at the plot “Chervlenoe” of the Svetloyar irrigation system, *Dokuchaev Soil Bulletin*, 2018, Vol. 94, pp. 19–37, DOI: [10.19047/0136-1694-2018-94-19-37](https://doi.org/10.19047/0136-1694-2018-94-19-37).
8. Novikova A.F., Gepin Lo, Konyushkova M.V., Dynamics of salinization – desalinization of soils in the “Chervlenoe” plot of the Svetloyarsk irrigation system in the irrigation and post-irrigation periods, *Dokuchaev Soil Bulletin*, 2009, Vol. 63, pp. 16–24, DOI: [10.19047/0136-1694-2009-63-16-24](https://doi.org/10.19047/0136-1694-2009-63-16-24).
9. *Nauchnye osnovy predotvrashcheniya degradatsii pochv (zemel') sel'skokhozyaistvennykh ugodii Rossii i formirovaniya sistem vosпроизводства ikh plodorodiya v adaptivno-landshaftnom zemledelii: T.I. Teoreticheskie i metodicheskie osnovy predotvrashcheniya degradatsii pochv (zemel') sel'skokhozyaistvennykh ugodii* (The scientific basis for preventing the degradation of soils (lands) of agricultural lands in Russia and the formation of systems for the reproduction of their fertility in adaptive landscape agriculture: Vol. 1. Theoretical and methodological foundations for preventing the degradation of soils (lands) of agricultural land. Collective monograph), Moscow: V.V. Dokuchaev Soil Science Institute, 2013, 756 p.
10. Pankova E.I., Novikova A.F., Meliorativnoe sostoyanie i vtorichnoe zasolenie pochv oroshaemykh zemel' Volgogradskoi oblasti (Reclamation status and secondary salinization of soils of irrigated lands of the Volgograd region), *Pochvovedenie*, 2004, No. 6, pp. 731–744.
11. *Polevoi opredelitel' pochv Rossii* (Field reference-book of Russian soils), Moscow: V.V. Dokuchaev Soil Science Institute, 2008, 182 p.
12. He B., Cai Y., Ran W., Jiang H., Spatial and seasonal variations of soil salinity following vegetation restoration in coastal saline land in eastern China, *Catena*, 2014, Vol. 118, pp. 147–153, DOI: [10.1016/j.catena.2014.02.007](https://doi.org/10.1016/j.catena.2014.02.007).

13. Inam A., Adamowski J., Halbe J., Prasher S., Using causal loop diagrams for the initialization of stakeholder engagement in soil salinity management in agricultural watersheds in developing countries: a case study in the Rechna Doab watershed, Pakistan, *Journal of environmental management*, 2015, Vol. 152, pp. 251–267, DOI: [10.1016/j.jenvman.2015.01.052](https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2015.01.052).
14. [Searle](#) S.R., [Casella](#) G., [McCulloch](#) C.E., Variance Components, John Wiley and Sons, New York, 1992, 501 p., DOI: [10.1002/9780470316856](https://doi.org/10.1002/9780470316856).
15. Sharp-Heward S., Almond P., Robinson B., Soil disturbance and salinisation on a vineyard affected by landscape recontouring in Marlborough, New Zealand, *Catena*, 2014, Vol. 122, pp. 170–179, DOI: [10.1016/j.catena.2014.06.022](https://doi.org/10.1016/j.catena.2014.06.022).
16. Swallow W.H., Monahan Monte Carlo J.F., Comparison of ANOVA, MIVQUE, REML, and ML Estimators of Variance Components, *Technometrics*, 1984, Vol. 26, No. 1, pp. 47–57, DOI: [10.2307/1268415](https://doi.org/10.2307/1268415).
17. Teartisup P., Kerdsueb P., Wattaya P., Field scale mapping of soil salinity on spatial interpolation techniques, case study: Khorat Basin, Nakhon Ratchasima Province, Thailand, *Proc. 6th Intern. Conf. on Environmental Informatics*, ISEIS, 2007.
18. Wang H., Y. Ping Hsieh, Mark A. Harwell, Huang W., Modeling soil salinity distribution along topographic gradients in tidal salt marshes in Atlantic and Gulf coastal regions, *Ecological Modelling*, 2007. Vol. 201, Issues 3–4, pp. 429–439.
19. Wang X., Yang J., Liu G., Yao R., Yu S., Impact of irrigation volume and water salinity on winter wheat productivity and soil salinity distribution, *Agricultural Water Management*, 2015, Vol. 149, pp. 44–54, DOI: [10.1016/j.agwat.2014.10.027](https://doi.org/10.1016/j.agwat.2014.10.027).

УДК 631.445.9

DOI: 10.19047/0136-1694-2019-99-62-75

Ссылки для цитирования:

Ткаченко А.Н., Козачук М.Н., Ткаченко О.В. Морфологические свойства подводных почв речных дельт // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2019. Вып. 99. С. 62-75. DOI: 10.19047/0136-1694-2019-99-62-75

Cite this article as:

Tkachenko A.N., Kozachuk M.N., Tkachenko O.V., Morphological properties of underwater soils of river deltas, Dokuchaev Soil Bulletin, 2019, V. 99, pp. 62-75, DOI: 10.19047/0136-1694-2019-99-62-75

Морфологические свойства подводных почв речных дельт

© 2019 г. А. Н. Ткаченко*, М. Н. Козачук, О. В. Ткаченко

*МГУ им. М.В. Ломоносова, Географический факультет,
Россия, 119234, Москва, Ленинские Горы, 1*

**e-mail: TkachenkoMSU@yandex.ru*

*Поступила в редакцию 30.05.2019, после доработки 02.07.2019,
принята к публикации 21.11.2019*

Резюме: Представлены результаты исследования морфологических свойств подводных почв в дельтах Волги, Дона и Кубани. Работа основана на полевых описаниях кернов подводных почв, встречающихся в дельтах. Выделены генетические горизонты, изучены их основные свойства (рН, Eh, электропроводность, гранулометрический состав, содержание органического углерода) и описаны основные типы почв, формирующиеся в различных условиях осадконакопления и под разными типами водной растительности. Название горизонтов и типов почв проведено с учетом предложенной ранее классификацией подводных почв (акваземов) дельты Волги. Изучено многообразие подводных почв трех дельт, проведено сравнение свойств одинаковых типов почв, формирующихся в различных дельтах. Описаны особенности формирования подводных почв; обсуждается отличие факторов подводного и наземного почвообразования. Показано, что количество встречающихся типов почв зависит от разнообразия формирующихся типов аквальных ландшафтов и контрастности условий миграции и аккумуляции вещества. Обсуждаются необходимые условия для формирования подводных почв и возможность отнесения донных

отложений к почвенным образованиям. Полученные результаты свидетельствуют о необходимости изучения донных осадков с почвоподобным профилем с позиции почвоведения и включения акваземов в современную классификацию почв России.

Ключевые слова: почвоподобный профиль, акваземы, донные отложения, дельты рек.

Morphological properties of underwater soils of river deltas

A. N. Tkachenko^{*}, M. N. Kozachuk, O. V. Tkachenko

*Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography
1 Leninskie Gori, Moscow 119234, Russian Federation,*

^{}e-mail: TkachenkoMSU@yandex.ru*

Received 30.05.2019, Revised 02.07.2019, Accepted 21.11.2019

Abstract: The results of the study of the morphological properties of underwater soils in the deltas of the Volga, Don and Kuban rivers are shown. This paper is based on field descriptions of profiles of underwater soils found in deltas. Genetic horizons have been identified, their basic properties (pH, Eh, electrical conductivity, grain size composition, organic carbon content) have been studied and the main types of soils, which are formed under different types of sedimentation and under different types of aquatic vegetation, have been described. Names of horizons and types of soils are given due to the classification of underwater soils (aquazems) of the Volga delta, that had been proposed previously. The diversity of underwater soils of three deltas has been studied, and the properties of the same soil types formed in different deltas have been compared. The features of underwater soils formation are described; the difference between the factors of underwater and terrestrial soil formation is discussed. It is shown that the number of occurring soil types depends on the diversity of the emerging types of aquatic landscapes and the contrast of the conditions of migration and accumulation of matter. Necessary conditions for the forming of underwater soils and the possibility of relating bottom sediments to soil formations are discussed. Our results are indicative of the need of studying bottom sediments with soil-like profile from the standpoint of soil science and the inclusion of aquazems into the modern Russian soil classification.

Keywords: underwater soils, aquazems, bottom sediment, river deltas.

ВВЕДЕНИЕ

Вопрос об отнесении подводных осадков водоемов к почвам рассматривается, начиная с работ В. Кубиены ([Kubiena, 1953](#)) и Р. Брюера ([Brewer, 1964](#)). В более поздних работах донные осадки с почвоподобным профилем исследователи все чаще относят к почвенным образованиям ([Stolt et al., 2011](#); [Ивлев, Нестерова, 2004](#); [Buurman, 1975](#) и др.). Предложены разные термины для обозначения подводных почв (субаквальные почвы ([Глазовская, 1972](#)), аквапочвы ([Ивлев, 2005](#)) и т. д.), разработана геохимическая классификации подводных илов ([Батоян, 1983](#)) и классификация подводных почв шельфовой зоны океана ([Полохин, 2010](#)). Включены подводные почвы в современные национальные (американскую (Soil Taxonomy), немецкую (1975 г.) и международную (WRB)) почвенные классификации. Предложено внесение отдела акваземов в современную классификацию почв России ([Tkachenko et al., 2016](#); [Касимов и др., 2016](#)). Вместе с тем отсутствие унифицированного подхода в изучении подводных почв и продолжающиеся споры относительно границы между донными осадками и подводными почвами ставят вопрос о детальном изучении их морфологических и физико-химических свойств, а также разработке более полной классификации подводных почв.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Работа основана на материалах полевых исследований по изучению подводных почв речных дельт. В ходе экспедиций в августе – сентябре 2018 г. изучены формирующиеся в дельтах Волги, Дона и Кубани почвы на участках с различными условиями осадконакопления и миграции вещества (протоки, ерики, гирла, култуки, лиманы, открытые участки взморья) и под разными типами водной растительности. Проведение исследований одновременно в трех дельтах в условиях летне-осенней межени, изучение основных встречающихся типов аквальных ландшафтов позволили получить данные о формирующихся типах почв и сравнить встречающиеся почвы между собой. Полученные результаты дополнили проведенные ранее исследования подводных почв дельты Волги ([Касимов и др., 2016](#)).

Особенность изучения подводных почв связана с их положением под слоем воды и техническими трудностями извлечения и описания почвенных образцов. В наших исследованиях использовался бур голландской компании Eijkelkamp (рис. 1), который позволяет получить керн донных осадков ненарушенного строения мощностью 50 см. В ходе полевых работ проведено описание встречающихся в дельтах типов подводных почв, выделены генетические горизонты, измерены показатели pH, Eh, электропроводности для водной толщи и самих горизонтов. В лабораторных условиях определен гранулометрический состав (методом лазерной гранулометрии) и содержание органического углерода (по методу Тюрина) в почвах.



Рис. 1. Извлечение профиля подводных почв с помощью бура Eijkelkamp для отбора проб донных грунтов ненарушенного строения.

Fig. 1. Extraction of the profile of underwater soil using Eijkelkamp drill designed for sampling bottom sediment with undisturbed structure.

Названия почвенных горизонтов, типов и подтипов почв дано в соответствии с предложенной ранее классификацией подводных почв дельты Волги ([Tkachenko et al., 2016](#); [Касимов и др., 2016](#)), основанной на подходах [Классификации и диагностики](#)

почв России (2004). В качестве названия подводных почв используется термин “акваземы”, горизонты подводных почв названы с использованием приставки “аква” и буквенного обозначения AQ, отражающей общие для всех горизонтов свойства, связанные с подводным положением почв – отрицательные значения окислительно-восстановительного потенциала, преобладание сизых тонов в окраске, высокое содержание илистой фракции за счет поступления тонкодисперсного вещества с речным стоком. Диагностическим горизонтом таких почв служит акваглеевый горизонт (AQG) – однородный, заиленный, сизого цвета, который в нижней части профиля постепенно переходит в менее оглеенный горизонт материнской породы (AQC). Верхняя часть профиля, в зависимости от наличия водной растительности и гидродинамических условий потока, представлена органогенными (аквагумусовыми (AQA), акваторфяными (AQT) горизонтами со слабым накоплением гумуса (AQ)) или глеево-окисленными (AQOX, AQox) горизонтами. Комбинации горизонтов дают основания для выделения типов акваземов. Ослабление процессов гумусонакопления и окисления, различие в гранулометрическом составе и содержании гумуса определяют выделение более низких уровней акваземов. Для обозначения дополнительных процессов, наличия включений и новообразований используются индексы в названии горизонта (s – наличие включений ракушек; h – затеки гумуса, большое количество неразложившейся органики; H₂S – развитие сульфидогенеза и т. д). Мощность подводных почв ограничена в нашем случае длиной керна при бурении (50 см). Очевидно, что под зарослями водной растительности мощность акваземов может быть значительно больше. Следует отметить, что в формировании профиля подводных почв, особенно их верхних горизонтов, большое значение имеет привнос материала с речным стоком. В некоторых случаях верхние горизонты представляют собой слабо преобразованный аллювиальный нанос. Кроме того, на участках с высокими скоростями течения развиты процессы смыва верхних горизонтов почв, а на некоторых участках рек (стрежень, перекаты и т. д.) из-за высоких скоростей течения подводные почвы не успевают сформироваться, в таких случаях следует говорить не о почвах, а о донных отложениях или речных наносах.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В результате исследований в дельтах Волги, Дона и Кубани выделены три основных типа акваземов, которые встречаются в каждой дельте и, вероятно, представлены в других водных объектах. Основным типом акваземов, чаще других встречающимся в дельтах, являются акваземы типичные (рис. 2). Они развиты повсеместно по берегам протоков и ериков, а также в устьях протоков при условии невысоких скоростей течения, небольших глубин и развития водной растительности. Верхние горизонты акваземов типичных представлены сизовато-темно-серыми глеевыми алевритовыми или глинисто-алевритовыми илами с большим количеством растительных остатков (AQA или AQ). Вниз по профилю они сменяются глеевыми глинистыми или глинисто-алевритовыми илами с темными гумусовыми пятнами по ходам корней и редкими растительными остатками (AQG). Мощность органогенных горизонтов может достигать 20–30 см. Содержание гумуса имеет аккумулятивный тип распределения по профилю, в верхних горизонтах может достигать 1–2 %. Значения окислительно-восстановительного потенциала верхних горизонтов отрицательные (-100 – -140 мВ) и, как правило, уменьшаются с глубиной.

При условии активного перемешивания водной толщи и отсутствия закрепленных видов водной растительности формируются акваземы окисленные (рис. 3). Верхние горизонты представлены глеево-окисленными горизонтами, которые отличаются от органогенных горизонтов акваземов типичных светлой (преимущественно желтоватой или буроватой) окраской, более легким гранулометрическим (песчано-алевритовым или алевритовым) составом и высокими значениями окислительно-восстановительного потенциала (-61 – -30 мВ). Окисленные горизонты подводных почв отличаются от аллювиальных наносов рек более высоким содержанием органического вещества и более тяжелым гранулометрическим составом. В некоторых случаях морфологически горизонт слабо отличается от нижележащих горизонтов и его выделение основано на значениях окислительно-восстановительного потенциала. Ниже расположены акваглеевый горизонт и горизонт материнской породы. В зависимости от скорости течения, рельефа

дна и степени развития растительности профиль может быть более или менее прогумусирован, а гранулометрический состав верхних горизонтов – более или менее опесчанен. Содержание гумуса в верхнем горизонте редко достигает 1 %, уменьшаясь вниз по профилю.

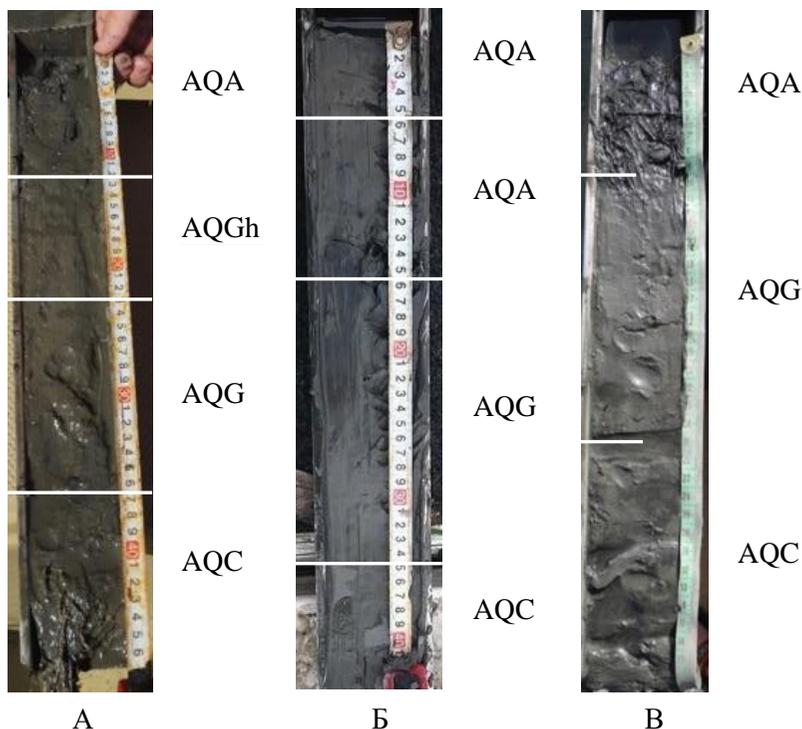


Рис. 2. Профиль аквазема типичного в дельте Волги (А), дельте Дона (Б) и дельте Кубани (В).
Fig. 2. Profile of typical aquazem in the Volga delta (A), the Don delta (Б) and the Kuban delta (В).

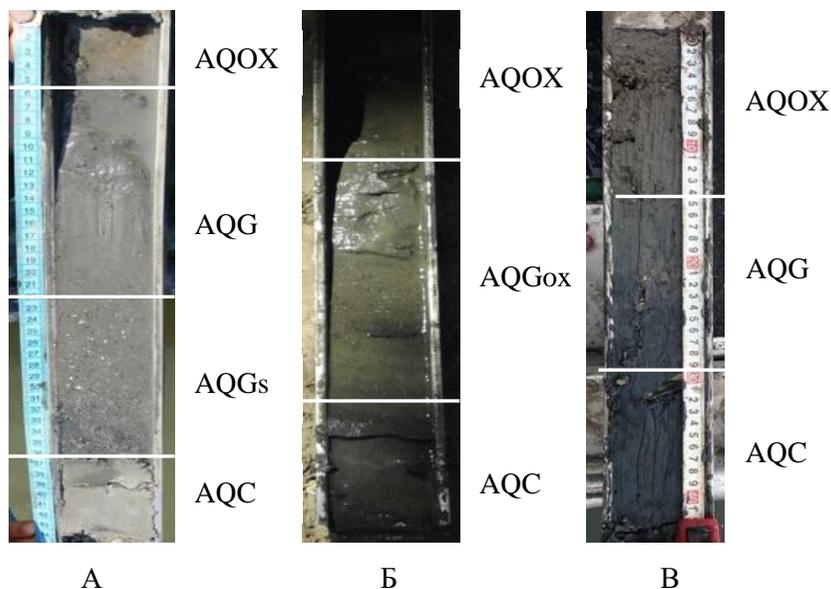


Рис. 3. Профиль аквазема окисленного в дельте Волги (А), дельте Дона (Б) и дельте Кубани (В).

Fig. 3. Profile of oxidated aquazem in the Volga delta (A), the Don delta (B) and the Kuban delta (B).

При ослаблении силы потока и развитии водной растительности создаются благоприятные условия для накопления органического вещества и формируются мощные, богатые гумусом акваземы органогенные (рис. 4), которые, в зависимости от типа водной растительности и степени разложения органических остатков, могут быть представлены подтипами акваземов гумусовых или торфяных. Наиболее благоприятные условия для накопления органики создаются при наличии укореняющихся макрофитов с мягкими листьями, такими, например, как лотос орехоносный (*Nelumbo nucifera*). Под лотосными полями развиты мощные глинистые темно-серые почвы с содержанием гумуса до 3–5 %.

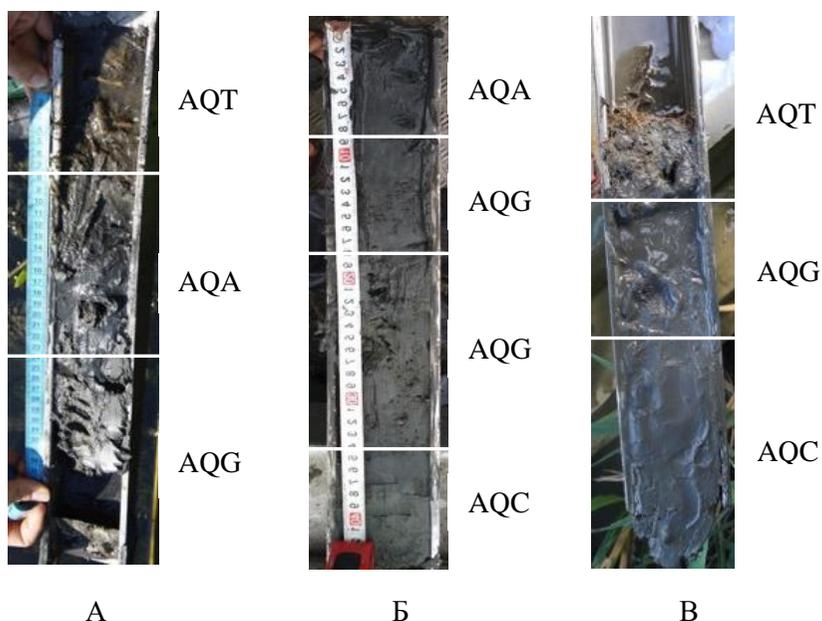


Рис. 4. Профиль акваземов органогенных в дельте Волги (А), дельте Дона (Б) и дельте Кубани (В).

Fig. 4. Profile of organogenic aquazem in the Volga delta (A), the Don delta (B) and the Kuban delta (B).

Среди дельт наиболее высоким содержанием гумуса отличаются подводные почвы дельты Волги. Большие площади отлого устьевого взморья с небольшими глубинами, невысокой скоростью течения и значительными площадями лотосных полей способствуют формированию в этой зоне дельты мощных акваземов гумусовых (содержание гумуса в верхних горизонтах до 5 %). Высоким содержанием гумуса (до 3.5 %) характеризуются и почвы лиманов под лотосными полями в дельте Кубани. В дельте Дона высокими содержаниями гумуса отличаются почвы под зарослями тростника – в верхних горизонтах присутствует значительное количество неразложившейся органики (стебли, листья, корни тростника), а содержание гумуса достигает 4 %. В редких случаях, при условии поступления высокоминерализированных морских

вод и застоя воды, в нижней части профиля идут процессы сульфатогенеза, и может наблюдаться запах сероводорода.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Подводные почвы, как и почвы суши, формируются под действием факторов почвообразования, которые в связи с подводным положением несколько видоизменяются. Основное влияние оказывают процессы переноса и аккумуляции вещества с речным стоком, нивелирующие остальные потенциальные различия условий осадконакопления. Водный фактор приводит к значительно меньшему разнообразию подводных почв, в сравнении с педоразнообразием почв суши. Вторым важным фактором является обилие и состав водной растительности. Наличие зарослей макрофитов способствует поступлению органических веществ с опадом, а также усиливает процессы осаждения обогащенных органикой тонкодисперсных взвешенных частиц, переносимых водным потоком. Фактор рельефа проявляется в усилении процессов осадконакопления в ямах, затонах и ухвостьях островов. Климатический фактор, очевидно, не оказывает значительного воздействия на формирование подводных почв.

Разнообразие встречающихся типов и подтипов почв, а также различия выявленных типов акваземов в разных дельтах связаны с особенностями формирования дельтовых ландшафтов.

Большие площади устьевой области Волги, мелководность устьевого взморья и сложная история развития территории приводят к наибольшему многообразию встречающихся типов подводных почв. Помимо описанных выше, в дельте Волги можно выделить еще как минимум два типа акваземов: акваземы слоистые и акваземы литогенные (Касимов и др., 2016). Разнообразие встречающихся аквальных ландшафтов, контрастные условия миграции вещества в дельте, култочной зоне и на открытом устьевом взморье приводят к формированию большого количества типов и подтипов акваземов, отличающихся по гранулометрическому составу и степени проявления почвенных процессов.

Более однородные условия дельты Кубани приводят к отсутствию разнообразия встречающихся подводных почв. Большие

глубины и высокие скорости течения не способствуют взмучиванию донных отложений и активному проявлению процессов окисления верхних горизонтов, поэтому акваземы окисленные встречаются здесь гораздо реже, а основным типом подводных почв являются акваземы типичные, отличающиеся наиболее восстановительными условиями среди всех изученных дельт. Значения ОВП верхних горизонтов акваземов типичных составляют -120 – -140 мВ, уменьшаясь до -140 – -160 мВ в нижней части профиля. Другой отличительной особенностью подводных почв дельты Кубани является их повышенная в сравнении с другими дельтами щелочность, связанная с высокой минерализацией вод реки Кубань. Средние значения рН верхних горизонтов составляют 7.9–8.0; в нижних горизонтах могут достигать 8.6–8.8 (в дельте Дона и дельте Волги средние значения рН верхних горизонтов подводных почв составляют 6.4–6.9 и 7.1–7.4 соответственно).

Особенности гидрологического режима дельты Дона (в первую очередь наличие сгонно-нагонных явлений) обуславливают значительное развитие акваземов окисленных в дельте и специфику их свойств. Большинство изученных почв дельты Дона в период наших исследований имели в верхней части профиля маломощный светлый окисленный горизонт, отличающийся высокими значениями окислительно-восстановительного потенциала (-60 – -90 мВ). Ниже таких горизонтов зачастую располагается профиль аквазема типичного, а содержание гумуса в средней части профиля было выше, чем в верхнем горизонте. Отсутствие буферной зоны (култучная зона в дельте Волги, полоса лиманов в дельте Кубани) приводит к развитию сгонно-нагонных явлений и периодическому смыву-намыву верхних горизонтов подводных почв, что проявляется в формировании перекрытых профилей подводных почв по аналогии с погребенными почвами суши.

Несмотря на особенности подводных почв, формирующихся в каждой из изученных дельт, строение профиля и морфологические свойства горизонтов позволяют однозначно относить исследованные подводные почвы к тому или иному типу акваземов. Это подтверждает возможность отнесения донных осадков с почвоподобным профилем к почвенным телам, необходимость их исследова-

дования с позиций почвоведения и более детальной разработки классификации подводных почв.

БЛАГОДАРНОСТЬ

Полевые исследования проведены при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта №18-05-80094, камеральная обработка материалов – при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-35-00354.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Батоян В.В.* Особенности геохимического профиля подводных почв в водоемах с нейтральной реакцией // Вестн. МГУ. Сер. геогр. 1983. № 3. С. 79–86.
2. *Глазовская М.А.* Почвы мира. М.: Изд-во МГУ, 1972. Ч. 1. 231 с.
3. *Ивлев А.М., Нестерова О.В.* К вопросу об изучении аквапочв // Вестник ДВО РАН. 2004. № 4. С. 47–51.
4. *Ивлев А.М.* Избранное. Вопросы теории и методологии почвоведения. Владивосток, 2005. 147 с.
5. *Касимов Н.С., Касатенкова М.С., Ткаченко А.Н., Лычагин М.Ю., Крооненберг С.Б.* Геохимия лагунно-маршевых и дельтовых ландшафтов Прикаспия. М.: Лига-Вент, 2016. 244 с.
6. Классификация и диагностика почв России / Л.Л. Шишов, В.Д. Тонконогов, И.И. Лебедева, М.И. Герасимова. Смоленск: Ойкумена, 2004. 341 с.
7. *Полохин О.В.* К вопросу о классификации подводных почв // Современные почвенные классификации и проблемы их региональной адаптации. Материалы всероссийской научной конференции. Владивосток. 2010. С. 58–60.
8. *Brewer R.* Fabric and Mineral Analysis of Soils. Wiley and Sons. New York. 1964. 470 pp.
9. *Buurman P.* Submarine soil formation changing fossil terrestrial soils // Soil Science. 1975. Vol. 119. P. 24–27.
10. *Kubiiena, W.-L.* The soils of Europe. Thomas Murby & Co. London. 1953. 314 p.
11. *Stolt M., Bradley M., Icchetti G., Shumchenia E., Guarinello M., King G., Boothroyd J., Oakley B., Thornber C., and August P.* Mapping shallow coastal ecosystems: a case study of a Rhode Island lagoon // Journal of Coastal Research. 2011. Vol. 27. No. 6A. P. 1–15.

12. Tkachenko A.N., Gerasimova M.I., Lychagin M.Yu., Kasimov N.S., Kroonenberg S.B. Bottom sediments in deltaic shallow-water areas – are they soils? // *Geography Environment Sustainability*. 2016. Vol. 1. P. 39–52.

REFERENCES

1. Batoyan V.V., Osobennosti geokhimitseskogo profilya podvodnykh pochv v vodoemakh s neutral'noi reaktsiei (Features of the geochemical profile of underwater soils in water bodies with a neutral reaction), *Vestn. MGU, Ser. geogr.*, 1983, No. 3, pp. 79–86.
2. Glazovskaya M.A., *Pochvy mira* (Soils of the world), Moscow: Izd-vo MSU, 1972, Ch. 1, 231 p.
3. Ivlev A.M., Nesterova O.V., K voprosu ob izuchenii akvapochv (On the issue of studying aqua soils), *Vestnik DVO RAN*, 2004, No. 4, pp. 47–51.
4. Ivlev A.M., *Izbrannoe. Voprosy teorii i metodologii pochvovedeniya* (Selected writings. Questions of the theory and methodology of soil science), Vladivostok, 2005, 147 p.
5. Kasimov N.S., Kasatenkova M.S., Tkachenko A.N., Lychagin M.Yu., Kroonenberg S.B., *Geokhimiya lagunno-marshevykh i del'tovykh landshaftov Prikaspiya* (Geochemistry of lagoon-march and delta landscapes of the coastal area of the Caspian Sea), Moscow: Liga-Vent, 2016, 244 p.
6. Shishov L.L., Tonkonogov V.D., Lebedeva I.I., Gerasimova M.I., *Klassifikatsiya i diagnostika pochv Rossii* (Classification and diagnostics of Russian soils), Smolensk: Oykumena, 2004, 341 p.
7. Polokhin O.V., K voprosu o klassifikatsii podvodnykh pochv (On the issue of the classification of underwater soils), *Sovremennye pochvennye klassifikatsii i problemy ikh regional'noi adaptatsii, Materialy vs Rossiiskoi nauchnoi konferentsii* (Proc. All-Russian Sci. Conf. “Modern soil classifications and problems of their regional adaptation”), Vladivostok, 2010, pp. 58–60.
8. Brewer R., *Fabric and Mineral Analysis of Soils*, Wiley and Sons, New York, 1964, 470 p.
9. Buurman P., Submarine soil formation changing fossil terrestrial soils, *Soil Science*, 1975, Vol. 119, pp. 24–27.
10. Kubiena, W.-L., *The soils of Europe*, Thomas Murby & Co, London, 1953, 314 p.
11. Stolt M., Bradley M., Icchetti G., Shumchenia E., Guarinello M., King G., Boothroyd J., Oakley B., Thornber C., August P., Mapping shallow coastal ecosystems: a case study of a Rhode Island lagoon, *Journal of Coastal Research*, 2011, Vol. 27, No. 6A, pp. 1–15.

Бюллетень Почвенного института им. В.В. Докучаева. 2019. Вып. 99.
Dokuchaev Soil Bulletin, 2019, 99

12. Tkachenko A.N., Gerasimova M.I., Lychagin M.Yu., Kasimov N.S., Kroonenberg S.B, “Bottom sediments in deltaic shallow-water areas – are they soils?”, *Geography Environment Sustainability*, 2016, Vol. 1, pp. 39–52.

УДК 631.4

DOI: 10.19047/0136-1694-2019-99-76-91

Ссылки для цитирования:

Шишкин К.В., Белик А.А., Кокорева А.А., Ежелев З.С. Оценка адекватности модели стока и температуры в Больших лизиметрах почвенного стационара МГУ // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2019. Вып. 99. С. 76-91. DOI: 10.19047/0136-1694-2019-99-76-91

Cite this article as:

Shishkin K.V., Belik A.A., Kokoreva A.A., Ezhelev Z.S., Adequateness assessment of percolate and temperature model using MSU Large lysimeters, Dokuchaev Soil Bulletin, 2019, V. 99, pp. 76-91, DOI: 10.19047/0136-1694-2019-99-76-91

Оценка адекватности модели стока и температуры в Больших лизиметрах почвенного стационара МГУ

© 2019 г. А. А. Белик^{1,2*}, К. В. Шишкин^{1**},
А. А. Кокорева^{1***}, З. С. Ежелев^{1****}

¹МГУ им. М.В. Ломоносова, Россия,
119234, Москва, Ленинские Горы, 1

^{**}<https://orcid.org/0000-0001-9289-0802>,

e-mail: konstantin.shishkin.99@mail.ru,

^{***}e-mail: kokoreva.a@gmail.com,

^{****}<https://orcid.org/0000-0003-4577-4694>, e-mail: ejelevsil@gmail.com.

²ВНИИ Фитопатологии, Россия

143050, Московская область, Одинцовский район,
р. п. Большие Вяземы, ул. Институт, владение 5,

^{*}e-mail: belikalexandra@gmail.com.

Поступила в редакцию 31.05.2019, после доработки 30.10.2019,
принята к публикации 21.11.2019

Резюме: Проводилась апробация модели PEARL 4 на основании данных стока и температуры в Больших лизиметрах почвенного стационара МГУ. Лизиметрические установки используются в экспериментальном почвоведении главным образом для изучения составляющих водного баланса почвы и исследований выноса различных веществ из отдельных почвенных горизонтов или всего почвенного профиля. Модель PEARL 4, водный блок которой построен на основе классической модели SWAP,

использует механизм описания преимущественных потоков в почве. Режимные наблюдения в модельных почвах Больших лизиметров МГУ позволили получить обширные данные по динамике температуры, влажности почвы, а также данные по стоку с нижней границы модельной почвы, что является уникальным материалом для адаптации, проверки и настройки любых моделей энерго/массопереноса в почве. Показано, что для достоверного соответствия стока с нижней границы и прогнозных профилей влажности и температуры с реальными значениями параметризованная математическая модель требует настройки путем подбора параметров аппроксимации основной гидрофизической характеристики (ОГХ). Установлено, что в зимний период времени ошибка прогноза всех показателей увеличивается. Таким образом, использование подобных моделей миграции веществ в почве для долгосрочного прогноза, например, для оценки риска загрязнения грунтовых вод агрохимикатами при ежегодном применении в 10-летний период, затруднительно ввиду ежегодного накопления общей ошибки прогноза к периоду весеннего снеготаяния.

Ключевые слова: модельные почвы, граничные условия, оценка риска.

Adequateness assesment of percolate and temperature model using MSU Large lysimeters

A. A. Belik^{1,2*}, K. V. Shishkin^{1**},
A. A. Kokoreva^{1***}, Z. S. Ezhelev^{4****}

¹Lomonosov Moscow State University,
1 Leninskie Gori, Moscow 119234, Russian Federation,

**<https://orcid.org/0000-0001-9289-0802>,

e-mail: konstantin.shishkin.99@mail.ru,

*** e-mail: kokoreva.a@gmail.com

**** <https://orcid.org/0000-0003-4577-4694>, e-mail: ejelevsoil@gmail.com.

²All-Russian Research Institute of Phytopathology,

5 Institute Str., Bol'shiye Vyazemy 143050

Moscow region, Russian Federation,

* e-mail: belikalexandra@gmail.com.

Received 31.05.2019, Revised 30.10.2019, Accepted 21.11.2019

Abstract: The assesment of PEARL model adequateness was carried out on the basis of temperature and percolate data obtained by means of MSU Large Lysimeters. Lysimeters are used in experimental soil science mostly for investigating water balance and substance or ions transport from observed

horizons or full soil profile. PEARL 4 model, the water prediction block of which is built on the basis of classical SWAP model, uses preferential water flow describing mechanism. Systematical observation of experimental soils in MSU Large lysimeters allowed obtaining extensive data on temperature and soil moisture dynamics, as well as percolate from bottom border. These measurements are unique and can become the basis for adaptation, verification and setting of mass and energy transfer models. It was shown, that mathematical parametric model requires adjustment for reaching reliable values of percolate from bottom border, moisture and temperature profiles. It can be achieved by selection of water retention curve (WTC) approximation parameters. It was noticed that the error for all predicted parameters increases in winter period. Thereby, the use of such matter transfer models in soil are problematic for long-term prognosis. For example, due to the annual error accumulation before the spring season such models cannot be applied for estimation of the risk of ground water pollution with agrochemicals.

Keywords: modeled soils, boundary conditionals, risk assessment.

ВВЕДЕНИЕ

Использование математических моделей в практике оценки риска применения различных агрохимикатов является необходимым условием для их экологической оценки. Моделирование процессов переноса воды и веществ имеет экономическое преимущество перед другими методами исследования, позволяя учитывать весь возможный ряд климатических и почвенных условий. Однако на данный момент, сценарии, используемые для оценки риска, не являются полностью протестированными на реальных данных. При этом заложенный в сценарии заведомо больший риск вымывания веществ из почвы в реальности может быть все-таки превышен ввиду некоторых особенностей расчета внутри модели. Поэтому проверка работы моделей для конкретных почвенно-климатических условий представляется необходимым для каждой вводимой в практику модели оценки риска.

Традиционно выделяют три типа моделей: стохастические, аналитические и детерминистические. Наиболее точные, применяемые в почвоведении, – детерминистические. По типу описания порового пространства почв детерминистические модели делятся на две группы: первые – хроматографические модели, вторые – преимущественно потоковые. Последние разделяют поровое про-

странство почвы на два домена – макропоры и микропоры. В макропорах происходит быстрый перенос воды без взаимодействия растворов с поверхностью почвы (preferential flow), что приводит к перемещению значительных количеств воды и растворенных в ней веществ от поверхности к нижним слоям почвы ([Shein et al., 2017](#)). Более простые хроматографические модели предполагают постепенное передвижение вещества с последовательным взаимодействием растворов с почвенной матрицей. В последние годы хроматографические модели вводят модули расчета преимущественных потоков в почве, что в сочетании с более простым устройством делает их использование в различных долгосрочных расчетах перспективнее сложных преимущественно потоковых моделей ([Шейн и др., 2009](#)).

Модельные почвы Больших лизиметров МГУ являются уникальными объектами, позволяющими получать непрерывные данные о состоянии почвы на ее верхней и нижней границах. Необходимо понимать, что между нативной почвой и модельной лизиметрической существует ряд отличий в строении, условиях развития, во влиянии боковых стен и дна лизиметра на общий процесс перераспределения влаги, а значит и на температурный режим почвы. Однако эти допущения: 1 – свободный дренаж, что способствует свободному оттоку влаги с нижней границы профиля; 2 – нарушенное естественное залегание горизонтов почвы и, как следствие, изменение физических и химических свойств почвы; 3 – увеличение техногенной и антропогенной нагрузки в условиях города, – только увеличивают вероятность большего оттока влаги вниз по профилю, что является предпочтительным для оценки миграции агрохимикатов в почве. Кроме того, прежде чем вводить в прогноз вещество, необходимо оценить работу почвенного блока модели.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Большие лизиметры почвенного стационара МГУ были заложены в 1961 г. Они представляют собой открытые бетонные емкости, заполненные модельной почвой. Основой модельной почвы была дерново-подзолистая почва из Подольского р-на Московской области. Исходная почва была засыпана послойно с

уплотнением каждого уложенного слоя. Модельные почвы имитируют как естественный профиль почвы, так и различные системы обработки почвы. Был изучен вариант почвы с типичным строением почвенного профиля: дерново-подзолистая среднесуглинистая почва со следующими горизонтами: $A_{\text{пах}}$ (0–20 см), A_2 (20–35 см), B_1 (35–60 см), B_2 (60–80 см), B_3 (80–100 см). В годы исследования рассматриваемый вариант представлял собой чистый пар, обработанный весной гербицидами для поддержания открытой почвенной поверхности. Основные свойства модельной дерново-подзолистой почвы лизиметров представлены в таблице 1. Ввиду необходимости сохранения строения модельной почвы свойства были взяты из предыдущих исследований этих почв ([Шеин и др., 2009](#)).

Таблица 1. Характеристики изучаемых почв
Table 1. Characteristics of the studied soils

Горизонт, глубина, см	Песок, 0.05–2 мм	Пыль, 0.002–0.05 мм	Глина, < 0.002мм	Плотность почвы, кг/м ³	рН	С _{орг} , %	К _ф , м/сут
	%						
$A_{\text{пах}}$, 0–20	5.3	89.7	5.0	1280	5.81	2.18	0.70
A_2 , 20–40	4.1	88.8	7.1	1450	5.73	0.77	0.54
B_1 , 40–60	5.9	89.8	4.3	1490	5.73	0.65	0.36
B_2 , 60–80	7.6	86.2	6.2	1500	4.50	0.60	0.18
B_3 , 80–100	18.4	75.5	6.1	1560	4.50	0.81	0.08

Площадь каждого лизиметра составляет 8 м², общая глубина вместе с дренажом – 175 см. Дно емкости каждого лизиметра имеет уклон в сторону воронки, выходящей в подземную часть. В качестве дренажа использован крупнозернистый песок и гравий. Подземная часть лизиметрического комплекса состоит из галерей,

где расположены установки для сбора фильтрационных вод (стока). За время функционирования лизиметрической станции система учета стока была несколько раз модернизирована. Последний этап развития системы мониторинга стока лизиметрических вод, проведенный в рамках данной работы, включил установку площадок для “качелей” под трубками стока осадков с лизиметров и подключение качелей к многопарному кабелю, а также разработку, сборку и установку в галереях блока электронных счетчиков. Это позволило реализовать систему считывания показаний с помощью видеотрансляции через камеру, подключенную к сети интернет. Для настройки моделей миграции веществ достаточно иметь ежесуточные показания стока с нижней границы лизиметров, которые на данном этапе работы собираются вручную. Снятие показаний стока с лизиметров велось раз в два дня с 13.06.2016 г. по 16.08.2017 г.

Для измерения температуры почвы использовались программируемые датчики термохроны iButton. Для исследования были использованы датчики серии DS1921 H-F50 (рабочий диапазон температур от -40°C до $+80^{\circ}\text{C}$ и точность измерения 0.5°C). Термохрон позволяет получать температурные данные с определенным шагом по времени и записывать их в собственной памяти. Датчик устойчив к воздействию внешней среды, но может выйти из строя в условиях повышенного увлажнения. В данной работе датчики фиксировали температуру почвы с шагом 3 ч. на глубинах 5 см, 15 см и 30 см с 12.06.2015 г. по 14.12.2015 г.

Для моделирования температурного режима и стока лизиметров была взята модель PEARL 4, используемая в целях получения прогнозных концентраций пестицидов в процедуре оценки их экологического риска. Это физически обоснованная одномерная, хроматографическая динамическая многоуровневая модель, которая может быть использована для описания различных процессов в почве, в частности, для описания водного или температурного режима. Данная версия модели включает описание домена макропор, и может использоваться в почвах с преимущественными путями миграции. Модель PEARL описана в литературе ([Shein et al., 2017](#)). Водный блок модели построен на основе более ранней и широко распространенной модели SWAP ([Van Dam et al.,](#)

[1997](#)) (SWAP: “почва – вода – атмосфера – растения”) и использует классические законы баланса и переноса.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Параметризация модели PEARL. Изучение функционирования и эволюции модельных почв лизиметров почвенного стационара ведется на протяжении всего времени их существования. Часть входных параметров модели, таких как: гранулометрический состав, содержание органического вещества, плотность, pH, коэффициент фильтрации (табл. 1), – были ранее определены для каждого горизонта почвы ([Шейн и др., 2009](#)). Для получения экспериментального обеспечения моделей в виде основной гидрофизической характеристики (ОГХ) почвенный профиль также делился на слои (0–10, 10–20, 20–40, 40–60, 60–80 и 80–100 см). ОГХ задавалась в виде параметров аппроксимации уравнением Ван Генухтена с использованием пакета RETC ([Van Genuchten et al., 1991](#)). Параметр θ_s близок по смыслу к общей порозности и практически совпадает с ней численно, за исключением объема защемленного в порах воздуха. Параметр n отражает распределение пор по размерам и имеет типичные для суглинистых почв значения. Параметр α – величина обратная давлению входа воздуха (барботирования), отражает диапазон гравитационной влаги.

Таблица 2. Параметры аппроксимации ОГХ уравнением Ван Генухтена
Таблица 2. Basic hydrophysical characteristics approximation parameters by the Van Genuchten equation

Слой, см	$Qr, \text{ м}^3 / \text{ м}^3$	$Qs, \text{ м}^3 / \text{ м}^3$	n	$\alpha, \text{ см}^{-1}$
0–20	0.0004	0.4792	1.25	0.0301
20–40	0.0001	0.4256	1.11	0.0285
40–60	0.0003	0.4199	1.22	0.0184
60–80	0.0009	0.4287	1.27	0.0198
80–100 см	0.0001	0.4312	1.26	0.0174

Поскольку конечной целью была оценка адекватности модели, то, согласно методологии, для тестирования модели пошаговым способом необходима параметризация модели, оценка ее эксплуатационных качеств. В качестве первого шага “слепого теста” ([Сметник, 2000](#)) была исследована часть модели для водного потока (SWAP). Балансовая проверка с ошибкой в 0.01 % показала удовлетворительное схождение баланса, что указывает на физическую адекватность моделей. Следующий этап – это параметризация модели. В качестве физического обеспечения использовались приведенные ранее физические свойства почвы, заданные послойно для всего профиля. Условия на нижней границе почвы – свободный дренаж – было выбрано ввиду большей ошибки баланса в случае выбора лизиметрической границы. Верхнее граничное условие представляет собой все (среднесуточные) экспериментальные метеорологические показатели влагообмена на поверхности модельной почвы: осадки, поливы (отсутствовали), эвапотранспирация (получена расчетным методом) и другие метеопоказатели: минимальная, максимальная температура, давление, радиация. Все эти показатели получены от метеостанции МГУ, расположенной в 150 метрах от территории почвенного стационара.

Моделирование стока из почвы. Моделирование объема лизиметрического стока было проведено для периода июнь 2016 г. – май 2017 г. Из графика объема стока видно, что модель PEARL (SWAP) хорошо описывает точки экстремумов, форму кривой стока. Однако, как и большая часть моделей, данная модель завышает объем стока в зимний период, сглаживает кривую (рис. 1). При этом общее количество стока (453 мм) за весь период моделирования все же меньше реального стока (508 мм) за тот же период. Таким образом, несмотря на модификацию модели последнего поколения PEARL 4 и введение описания механизма преимущественной миграции влаги, модель сохранила проблемы описания потока воды от предыдущих версий. Это может привести к занижению показателей миграции веществ в дальнейшем, что важно при моделировании загрязнения грунтовых вод.

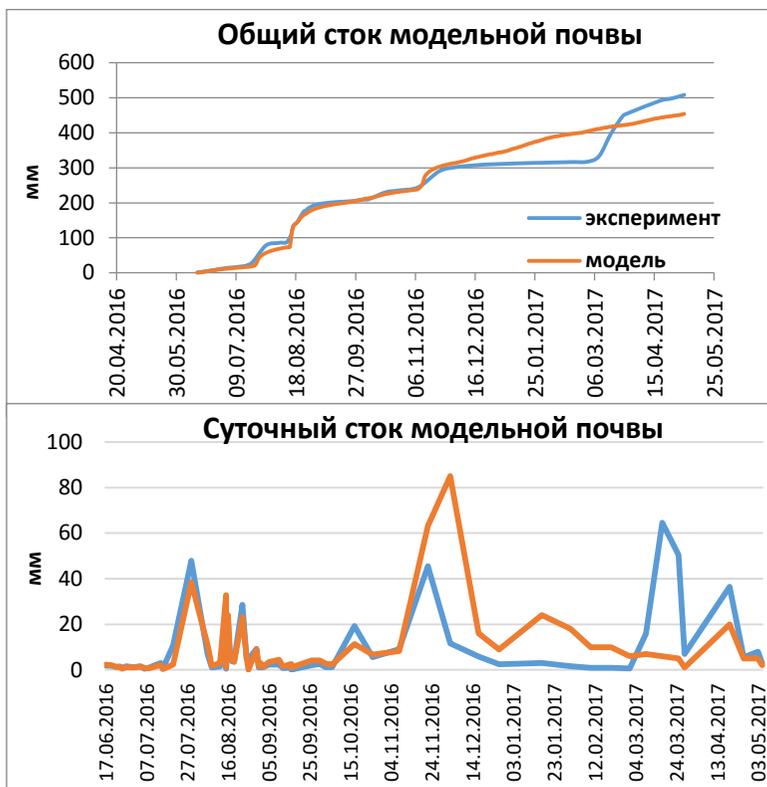


Рис. 1. Сравнение полученных экспериментальных данных с рассчитанными с помощью модели значениями объема лизиметрического стока.

Fig. 1. Comparison of received experimental data with calculated values of percolate.

Такое занижение стока моделью PEARL может быть связано не только с устройством самой модели, но и с вводимыми в модель параметрами ван Генухтена. А также с устройством дренажной системы лизиметра, что невозможно отразить в данной модели.

Для оценки адекватности модели были выбраны следующие статистические критерии: 1) оценка распределения погрешностей

в виде гистограммы с критерием Уилко – Шапиро; 2) характеристика разброса погрешностей в виде Box & Whisker plots.

На рисунке 2 приведены эти критерии. Полученное распределение погрешностей отлично от нормального значения критерия Уилко – Шапиро 0.62, что говорит о том, что использовать параметрические критерии нельзя. Хотя по графикам расположения медиан, квартилей и разброса погрешностей моделирования этого сказать нельзя.

Средняя ошибка, тем не менее, близка к 0, и только предсказания стока в зимний период статистически могут ухудшать прогноз. При оценке прогноза кумулятивного стока нормированная среднеквадратичная ошибка SRMSE для периода от начала наблюдения до наступления зимнего периода была равна 0.41. Однако для зимнего периода, как было сказано выше, модель не учитывает отсутствие стока с нижней границы профиля и SRMSE возросла до 2.85.

Моделирование температуры почвы. После вычисления значений с помощью модели PEARL 4 они сравнивались со значениями, полученными эмпирически с 12.06.2015 г. по 14.12.2015 г. (рис. 3). На рисунке 3 представлена динамика изменения температуры для глубин 5, 15 и 30 см. Температура в почве в верхних слоях изменялась синусоидально вслед за температурой воздуха и редко поднималась даже в летние месяцы выше 25 °С, в среднем оставаясь на уровне 18–20 °С в летний период.

Видно, что колебания температуры на поверхности модельной почвы существенно выше, чем для более глубоких слоев. При этом установившийся снежный покров в зимний период снижает эти колебания. Большие скачки температуры воздуха в начале вегетационного сезона вызвали большой разброс значений и для почвы.

Для оценки адекватности модели были выбраны те же критерии, что и для стока (рис. 4 и рис. 5). Полученное распределение отлично от нормального. Средняя ошибка близка к 0, и, как и при визуальной оценке, точность прогноза температурного режима снижена за счет отдельных значительных колебаний на поверхности.

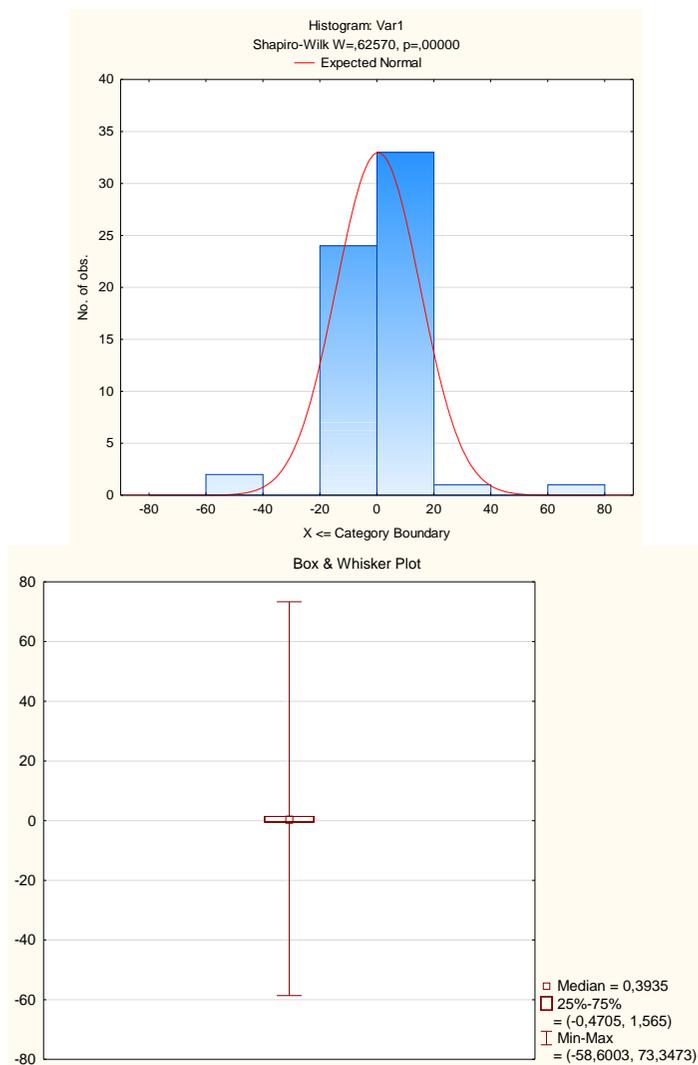


Рис. 2. Оценка распределения погрешностей прогнозирования стока в виде гистограммы с критерием Уилко-Шапиро и характеристика разброса погрешностей в виде Box & Whisker plots.

Fig. 2. Histogram of errors distribution for percolate prediction using Wilco-Shapiro criterion and characteristics of errors distribution using Box & Whisker plots.

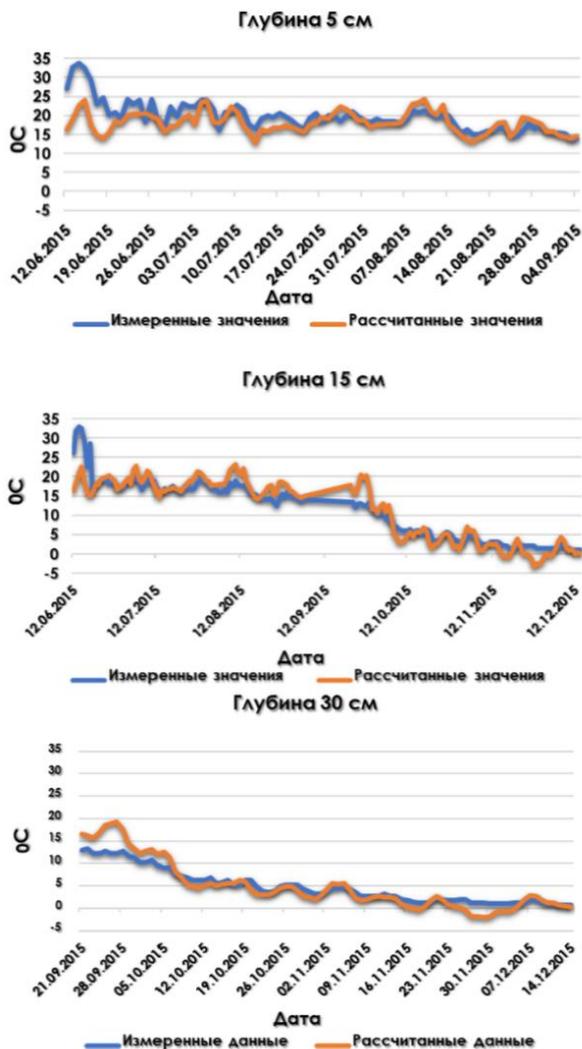


Рис. 3. Сравнение полученных экспериментальных данных с рассчитанными с помощью модели значениями температуры.

Fig. 3. Comparison of received experimental data with calculated values of temperature.

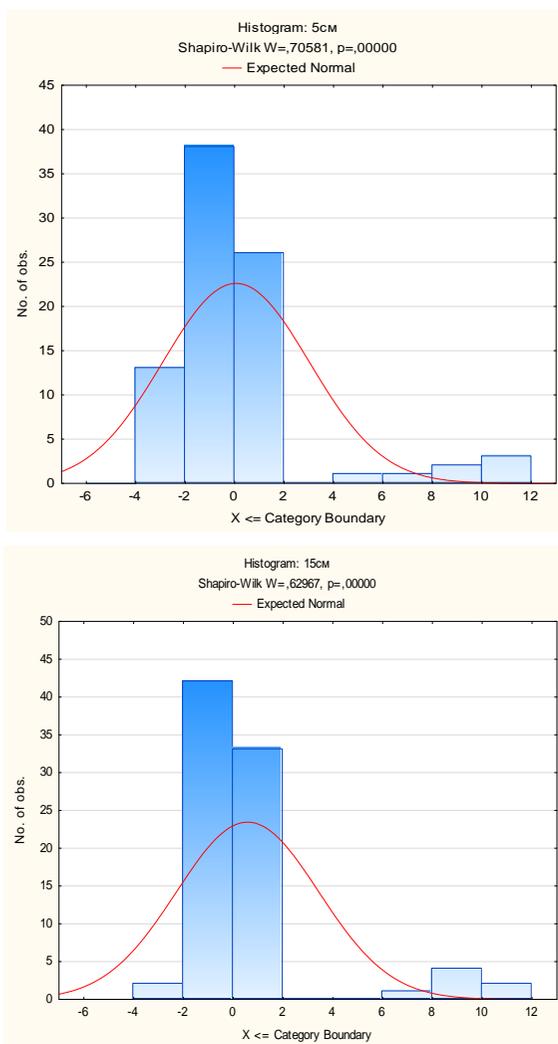


Рис. 4. Оценка распределения погрешностей при прогнозировании температуры в виде гистограммы с критерием Уилко-Шапиро.

Fig. 4. Histogram of errors distribution for temperature prediction using Wilko-Shapiro criterion.

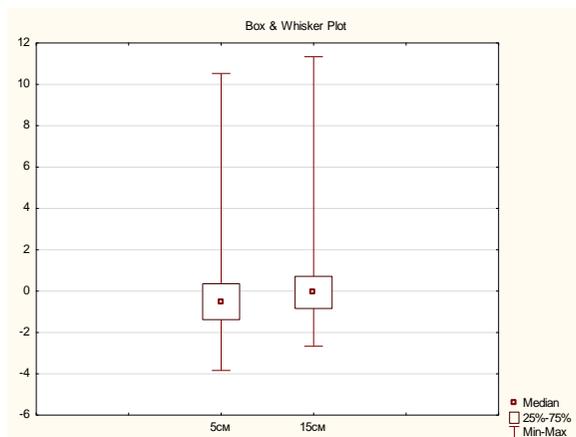


Рис. 5. Характеристика разброса погрешностей при прогнозировании температуры в виде Box&Whisker plots.

Fig. 5. Characteristics of errors distribution in temperature prediction using Box & Whisker plots.

Визуальное сравнение результатов экспериментальных и прогнозных данных (точки экстремумов, амплитуда колебаний) по температуре говорит о том, что модель достаточно хорошо справляется с поставленной задачей, за исключением некоторых дней, когда колебания температуры на поверхности были более резкими.

SRMSE для 5 см равен 0.78, для 15 см – 0.02 и для 30 см – 0.17.

В целом прогноз температуры верхнего горизонта почвы достаточно точен для того, чтобы возможно было провести последующее моделирование разложения агрохимикатов в почве.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведена апробация модели PEARL 4 для прогноза водного и температурного режима дерново-подзолистой почвы. Сравнение экспериментальных и расчетных значений объема лизиметрического стока дало основание рекомендовать использование модели PERL только в весенне-летне-осенний период, когда даже в периоды интенсивных осадков за счет учета в модели механизмов

миграции воды по макропорам модель с достаточной степенью точности справляется с прогнозом. В зимний период прогноз по модели хуже, что будет вносить ошибку в дальнейший расчет миграции воды и веществ в почве. Это важно ввиду использования модели при долгосрочных (10 и более лет) расчетах оценки риска применения агрохимикатов.

БЛАГОДАРНОСТЬ

Работа выполнена по теме Госзадания № 0598-2014-0011 в ФГБНУ ВНИИФ и при поддержке гранта РФФИ 18-34-00801 мол_a.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Шейн Е.В., Кокорева А.А., Горбатов В.С., Умарова А.Б.* Оценка чувствительности, настройка и сравнение математических моделей миграции пестицидов в почве по данным лизиметрического эксперимента // Почвоведение. 2009. № 7. С. 826–834.
2. *Сметник А.А.* Прогнозирование миграции пестицидов в почвах: Автореферат дис. ... докт. биол. наук: 03.00.27; 06.01.11. М., 2000. 56 с.
3. *Shein E.V., Belik A.A., Kokoreva A.A., Kolupaev V.N., Pletenev P.A.* Prediction of Pesticide Migration in Soils: the Role of Experimental Soil Control // Moscow University Soil Science Bulletin. 2017. Vol. 72. No. 4. P. 185–190.
4. *Shein E.V., Belik A.A., Kokoreva A.A., Kolupaeva V.N.* Quantitative Estimate of the Heterogeneity of Solute Fluxes Using the Dispersivity Length Parameter for Mathematical Models of Pesticide Migration in Soils // Eurasian Soil Science. 2018. Vol. 51. No. 7. P. 797–802.
5. *Van Dam J.C., Hyugen J., Wesseling J.G., Feddes R.A., Kabat P., van Walsum P.E.V., Groenendijk P. and van Diepen C.A.* Theory of SWAP version 2.0. Simulation of water flow, solute transport and plant growth in the soil water atmosphere plant environment. Wageningen University, The Netherlands, 1997. 167 p.
6. *Van Genuchten M.T., Leij and Yates S.R.* The RETC code for quantifying the hydraulic functions of unsaturated soils. US Salinity Lab. Riverside, CA, 1991.

REFERENCES

1. Shein E.V., Kokoreva A.A., Gorbatov V.S., Umarova A.B., Otsenka chuvstvitel'nosti, nastroyka i sravnenie matematicheskikh modelei migratsii pestitsidov v pochve po dannym lizimetricheskogo eksperimenta (Sensitivity Assessment, Adjustment, and Comparison of Mathematical Models Describing the Migration of Pesticides in Soil Using Lysimetric Data), *Pochvovedenie*, 2009, No. 7, pp. 826–834
2. Smetnik A.A., *Prognozirovanie migratsii pestitsidov v pochvakh: Diss. ... doc. biol. nauk* (Prediction of pesticides transferring in soils, Dr. biol. sci. thesis), Moscow, 2000, 56 p.
3. Shein E.V., Belik A.A., Kokoreva A.A., Kolupaev V.N., Pletenev P.A., Prediction of Pesticide Migration in Soils: the Role of Experimental Soil Control, *Moscow University Soil Science Bulletin*, 2017, Vol. 72, No. 4, pp. 185–190.
4. Shein E.V., Belik A.A., Kokoreva A.A., Kolupaeva V.N., Quantitative Estimate of the Heterogeneity of Solute Fluxes Using the Dispersivity Length Parameter for Mathematical Models of Pesticide Migration in Soils, *Eurasian Soil Science*, 2018, Vol. 51, No. 7, pp. 797–802.
5. Van Dam J.C., Hyygen J., Wesseling J.G., Feddes R.A., Kabat P., van Walsum P.E.V., Groenendijk P., van Diepen C.A., *Theory of SWAP version 2.0. Simulation of water flow, solute transport and plant growth in the soil water atmosphere plant environment*, Wageningen University, The Netherlands, 1997, 167 p.
6. Van Genuchten M.T., Leij and Yates SR., *The RETC code for quantifying the hydraulic functions of unsaturated soils*, US Salinity Lab, Riverside, CA, 1991.

УДК 631.4

DOI: 10.19047/0136-1694-2019-99-92-116

Ссылки для цитирования:

Фролов О.А., Якушев А.В., Милановский Е.Ю. Гетерогенность свойств копролитов дождевых червей *Aporrectodea caliginosa* и *Lumbricus rubellus* в модельном опыте на черноземе // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2019. Вып. 99. С. 92-116. DOI: 10.19047/0136-1694-2019-99-92-116

Cite this article as:

Frolov O.A., Yakushev A.V., Milanovskiy E.Yu. The heterogeneity of the properties of the coprolites *Aporrectodea caliginosa* and *Lumbricus rubellus* in model experiment with chernozem soil, Dokuchaev Soil Bulletin, 2019, V. 99, pp. 92-116, DOI: 10.19047/0136-1694-2019-99-92-116

Гетерогенность свойств копролитов дождевых червей *Aporrectodea caliginosa* и *Lumbricus rubellus* в модельном опыте на черноземе

© 2019 г. О. А. Фролов^{1*}, А. В. Якушев^{2**},
Е. Ю. Милановский^{1,2***}

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

*<https://orcid.org/0000-0001-6950-2269>, e-mail: 6.40.7.4@mail.ru,

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

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

** e-mail: a_yakushev84@mail.ru.

Поступила в редакцию 31.05.2019, после доработки 28.10.2019,
принята к публикации 21.11.2019

Резюме: Проведена оценка изменений физических и микробиологических свойств копролитов дождевых червей *Aporrectodea caliginosa* и *Lumbricus rubellus* в лабораторных опытах с использованием пахотного горизонта миграционно-мицелярного чернозема. В копролитах определяли физические параметры: гранулометрический состав, удельную поверхность, рассчитанную по эффективному диаметру частиц; микробиологические параметры: общую численность культивируемых бактерий и ферментативную кинетику липаз по модели Михаэлиса – Ментен с расчетом максимальной скорости реакции (V_m) и

константы Михаэлиса (K_m). Модельный эксперимент включал два этапа: первый этап – дождевые черви двух видов содержались вместе, во втором – раздельно. Контролем была исходная почва и почва с опадом. Анализировали и сравнивали с контролем копролиты и почву, в которой жили дождевые черви. Два вида дождевых червей дают неаддитивный эффект на физические и микробиологические свойства. В зависимости от видового состава характер изменения отличается. Для двух видов, содержащихся совместно, отмечено снижение в копролитах удельной поверхности, увеличение доли фракции тонкого песка за счет снижения долей ила, мелкой и средней пыли. Отдельно для *A. caliginosa* установлено, что увеличивается удельная поверхность копролитов по сравнению с контролем, увеличивается доля частиц во фракциях: ила, мелкой, средней, крупной пыли за счет существенного уменьшения фракции тонкого песка. Для копролитов *L. rubellus* показано снижение удельной поверхности, увеличение долей фракций среднего, тонкого песка и крупной пыли за счет снижения доли фракций ила, мелкой и средней пыли. Численность культивируемых гетеротрофных бактерий выше в копролитах, по сравнению с контролем. Наибольшее увеличение наблюдается при совместном содержании двух видов. Липазная активность (V_m) почвы повышается по сравнению с контролем для двух видов и при содержании одного *A. caliginosa*. Под действием *L. rubellus* активность снижается. Копролиты отличаются по всем исследованным свойствами от контроля (почвы и почвы с опадом), а также от почвы, где обитали дождевые черви.

Ключевые слова: элементарные почвенные частицы, гранулометрический состав, удельная поверхность частиц, липазная активность.

The heterogeneity of the properties of the coprolites *Aporrectodea caliginosa* and *Lumbricus rubellus* in model experiment with chernozem soil

O. A. Frolov^{1*}, A. V. Yakushev^{2***}, E. Yu. Milanovskiy^{1,2***}

¹V.V. Dokuchaev Soil Science Institute,
7 Bld. 2 Pyzhevskiy per., Moscow 2119017, Russian Federation,
*<https://orcid.org/0000-0001-6950-2269>, e-mail: 6.40.7.4@mail.ru,
***e-mail: milanovskiy@gmail.com.

²Lomonosov Moscow State University,
1 Leninskie Gori, Moscow 119234, Russian Federation,
**e-mail: a_yakushev84@mail.ru.

Received 31.05.2019, Revised 28.10.2019, Accepted 21.11.2019

Abstract: The changes in the physical and microbiological properties of the coprolites of earthworms *Aporrectodea caliginosa* and *Lumbricus rubellus* were evaluated in laboratory experiments using the arable horizon of migratory-mycelial chernozem. In coprolites the following physical parameters were determined: particle size distribution, specific surface area, calculated by the effective particle diameter; microbiological parameters: the total number of cultured bacteria and the enzymatic kinetics of lipases according to the Michaelis–Menten model with the calculation of the maximum reaction rate (V_m) and Michaelis constant (K_m). The model experiment included two stages: the first stage – earthworms of two species were kept together, in the second – separately. The control was the source soil and the soil with litter. Coprolites and the soil in which earthworms lived were analyzed and compared with the control. Two types of earthworms give a non-additive effect on physical and microbiological properties. Depending on the species composition, the nature of the change is different. For the two species contained together a decrease in the specific surface area in coprolites was noted, as well as an increase in the fraction of the fine sand due to the reduction of the fractions of silt, fine and medium dust. For *A. caliginosa* kept separately it was found, that the specific surface of coprolites increases compared to the control, the silt and fine, medium, coarse dust, fractions rise due to a significant reduction of the fine sand fraction. For *L. rubellus* coprolites a decrease in the specific surface area, an increase in the fractions of medium, fine sand and coarse dust, due to the reduction of silt, fine and medium dust fractions, are shown. The number of cultured heterotrophic bacteria is higher in coprolites compared to the control. The greatest increase is observed in the variant where two species are kept together. The lipase activity (V_m) of the soil also increases when two species are kept together compared with the control and with *A. caliginosa* kept separately. Under the influence of *L. rubellus* the lipase activity decreases. Coprolites differ in all the investigated properties from the control (soil and soil with litter), as well as from the soil where earthworms lived.

Keywords: elementary soil particles, particle size distribution, specific surface area, lipase activity.

ВВЕДЕНИЕ

Плодородие почв напрямую связано с жизнедеятельностью почвенной биоты ([Звягинцев и др., 2005](#)). Работ, посвященных изучению взаимосвязей в почве и модификаций почвенной биотой свойств почвы, достаточно много. Тем не менее методы и подхо-

ды сильно варьируют. Например, почвенная биота рассматривается как центральный объект исследования ([Чернов и др., 2017](#)) или как действующий агент, влияющий на почву и формирующий ее свойства ([Кутовая др., 2018](#); [Vi et al., 2018](#)). Можно рассматривать почвенную биоту как биоиндикатор изменений свойств почв ([Frouz et al., 2013](#); [Ma et al., 2013](#)) или как ключевое звено в глобальных циклах вещества и энергии в экосистеме ([Blouin et al., 2013](#); [Edwards, 2004](#); [Römbke et al., 2005](#)). Дождевые черви являются одними из самых изучаемых представителей почвенной фауны ([Huang, Xia, 2018](#); [Peigné et al., 2018](#); [Sanchez-Hernandez et al., 2018](#); [Sanchez-Hernandez, 2018](#); [Фролов, Якушев, 2018](#)). Изучается их физиология ([Laverack, 1963](#); [Satchell, 1983](#)), экология ([Тихонов и др., 2011](#); [Кутовая, 2012](#); [Юрков и др., 2008](#); [Храмченкова и др., 2012](#)), использование в сельскохозяйственной отрасли ([Бызов, Якушев, 2008](#)). Однако в исследованиях обычно рассматриваются не собственно копролиты, а почва, где обитают черви. Более точное понимание вклада дождевых червей в формирование почвы возможно при разделении таких объектов как почва, где обитают черви, и непосредственно копролиты. Однако учитывая сложность и изменчивость копролитов во времени, их “старение” ([Bal, 1970](#)), подобное разделение осложнено и часто не проводится.

Целью работы является изучение модификации свойств элементарных почвенных частиц (ЭПЧ) при пассаже через кишечник дождевых червей *Aporrectodea caliginosa* и *Lumbricus rubellus* в модельном опыте. Для этого дана оценка гетерогенности внутри микрокосмов и между объектами; определены степени различий в свойствах копролитов и почвы, в которой обитают черви; выявлено, является ли значащим фактором видовая принадлежность дождевых червей для оценки свойств копролитов; сделано заключение о возможности достоверно отличить свойства копролитов от фоновой почвы.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Для модельного опыта был выбран миграционно-мицелярный чернозем Курской области (51°37'17.1" N; 36°15'42.0" E). Данный тип почвы является одним из наиболее распространенных объектов исследования за счет высокой агроно-

мической ценности. Образцы почвы после отбора хранились в воздушно-сухом состоянии. Перед закладкой опыта влажность почвы доводилась до полевой влагоемкости, почва перемешивалась и равномерно распределялась по микрокосмам, представляющим собой цилиндрические сосуды объемом 600 мл.

Кроме того, для исследования был выбран эндогеинный червь *Apporectodea caliginosa* (собственно почвенный червь, обитающий в минеральной толще почвы (60–100 см) и питающийся опадом средней степени разложённости) и эпигейный червь *Lumbricus rubellus* (почвенно-подстилочный вид, обитающий на поверхности почвы и питающийся слаборазложившимся опадом). Отбор дождевых червей проводили согласно ISO 23611-1, видовую принадлежность червей устанавливали по определителю [Всеволодовой – Перель \(1997\)](#). Среди червей преобладали ювенильные особи. После эксперимента количество червей не изменилось.

Лабораторный эксперимент состоит из двух этапов. На первом этапе дождевых червей двух видов *A. caliginosa* и *L. rubellus* содержали совместно в сосудах с добавлением опада в виде свежих листьев клена остролистного (*Acer platanoides*). В качестве контроля в модельном опыте использовали сосуды с исходной почвой, а также с почвой и опадом. Таким образом, на первом этапе были проанализированы образцы: 1П – почва; 1ПО – почва с опадом; 1П-AL – почва из сосуда, где содержались черви *A. caliginosa* и *L. rubellus*; 1К-AL – копролиты червей *A. caliginosa* и *L. rubellus*. Вес почвы в сосудах – 496 г. Общий вес червей – 12 г в равных долях.

Второй этап аналогичен первому, но виды червей содержались раздельно. На втором этапе проанализированы следующие образцы: 2П – почва; 2ПО – почва с опадом; 2П-А – почва из сосуда, где содержались черви *A. caliginosa*; 2П-Л – почва из сосуда, где содержались черви *L. rubellus*; 2К-А – копролиты червей *A. caliginosa*; 2К-Л – копролиты червей *L. rubellus*. Вес почвы в сосудах с *A. caliginosa* – 470 г, с *L. rubellus* – 370 г. Вес червей *A. caliginosa* – 16 г, *L. rubellus* – 18 г.

Экспериментальные сосуды содержали при температуре 17–22 °С и весовой влажности почвы 35–40 % на протяжении четырех месяцев.

Для фракции частиц копролитов и почвы меньше 250 мкм определяли гранулометрический состав методом лазерной дифракции на дифрактометре Mastersize 3000 (предварительное просеивание через сито с размером ячеек 250 мкм и диспергация в течение 3 мин. ультразвуком, при энергии ультразвуковой диспергации 450 Дж/мл). Гранулометрический анализ проводили без удаления органических частиц при 5-кратной аналитической повторяемости по размерным фракциям: ил (< 1 мкм), мелкая пыль (1–5 мкм), средняя пыль (5–10 мкм), крупная пыль (10–50 мкм), тонкий песок (50–250 мкм). Для каждой фракции рассчитывали среднее арифметическое (% объема) и доверительные интервалы при $p = 0.95$. Образцы, взятые для второго и первого этапа эксперимента, изначально имели небольшие отличия в гранулометрическом составе при оценке выбранным методом. Сравнение проводилось не по абсолютным значениям, а по соотношению долей фракций.

Удельную поверхность почвенных частиц рассчитывали по средневзвешенному диаметру частиц (установленному методом дифракции) из допущения, что частицы имеют форму сфер.

Общую численность культивируемых гетеротрофных аэробных и факультативно-анаэробных бактерий определяли чашечным методом Коха на среде “Rich” – разбавленной глюкозо-пептонной дрожжевой среде (ГПД). Пробоподготовка: почвенная суспензия (1 : 10), десорбция клеток на вортексе “Multi Reax” фирмы Heidolph 20 мин. при 2000 об./мин. Анализ численности культивируемых бактерий проводился в 3-кратной повторяемости; результаты представлены как медиана и квартили, так как при малой выборке непараметрический анализ является более корректным, хотя и менее точным. Ферментативная кинетика по Михаэлису – Ментен для липаз определялась по гидролизу флуоресцина диацетата (ФДА) ([Schnürer, Rosswall, 1982](#)). Для расчета константы Михаэлиса (K_m) и максимальной скорости реакции (V_m) применялась серия растворов из 20 возрастающих концентраций ФДА ([Бызов, Якушев, 2008](#)) в диапазоне от 0 до 160 мкмоль/л. Каждая концентрация ФДА для каждого исследуемого образца была воспроизведена в 6-кратной повторяемости.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Контроль (почва и почва с опадом) по гранулометрическому составу не отличались. Опад в отсутствие животных не оказал никакого влияния на соотношение фракций.

В ходе первого этапа эксперимента в копролитах происходит увеличение доли фракций тонкого песка (50–250 мкм), и, как следствие, увеличивается удельная поверхность почвенных частиц.

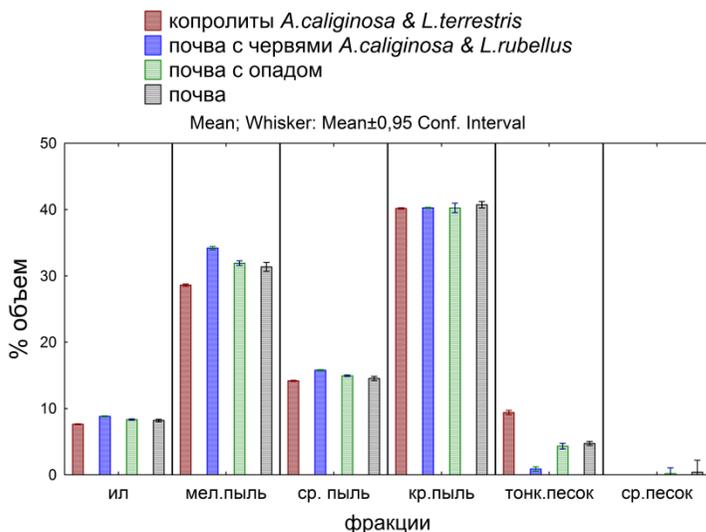


Рис. 1. Гранулометрический состав первого этапа эксперимента.

Fig. 1. The soil grain size distribution at the first stage of the experiment.

На первом этапе эксперимента копролиты и почва, где жили черви, характеризуются меньшим разбросом значений (размаха 95 % интервала для среднего процентного объема), по сравнению с почвой и почвой с опадом. В копролитах происходит укрупнение частиц, а в почве, где жили черви, напротив, наблюдается повышение доли мелких частиц. Это хорошо заметно во фракции мелкой пыли и тонкого песка. Подобное перераспределение может иметь две причины: во-первых, оно связано с избирательностью дождевых червей, которые используют более крупные минераль-

ные частицы для перетирания органических остатков в мышечном желудке (Перель, 1979); во-вторых, в кишечник дождевых червей и в копролиты попадают более крупные органические частицы опада, которыми питаются черви. Учитывая разную экологию выбранных видов дождевых червей, появилось предположение о специфике их питания – большей частью минеральными частицами (*A. caliginosa*) и слаборазложившимися растительными остатками (*L. rubellus*).

Таким образом, значимым фактором, оказывающим влияние на свойства копролитов, является видовая принадлежность дождевых червей. Чтобы это подтвердить, на втором этапе эксперимента дождевые черви содержались отдельно.

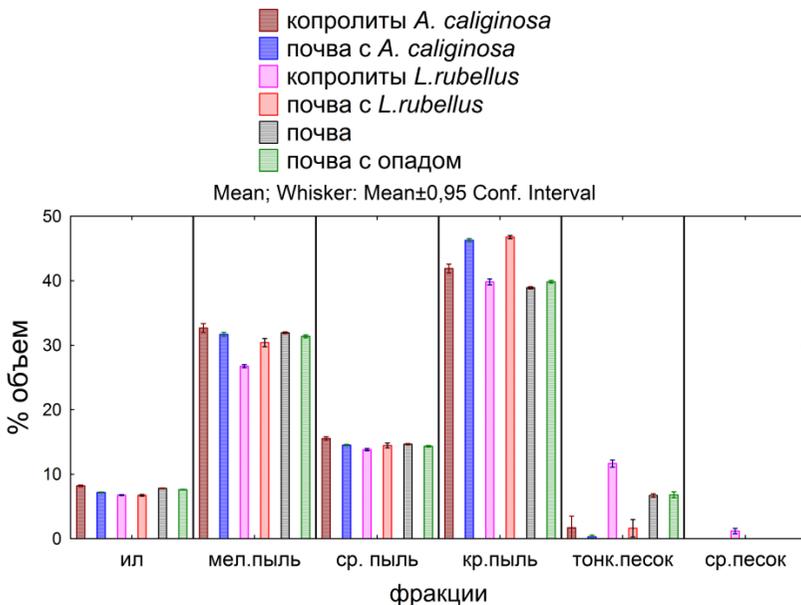


Рис. 2. Гранулометрический состав второго этапа эксперимента.

Fig. 2. The soil grain size distribution at the second stage of the experiment.

Гетерогенность копролитов и почвы, где жили черви, заметно выше, чем в контроле (почва и почва с опадом). Копролиты *A. caliginosa* по гранулометрическому составу состоят из частиц

меньших, чем почва, в которой жили черви. Это заметно во фракциях ила, мелкой пыли, средней пыли. Процентное содержание мелких частиц в этих фракциях для копролитов выше, а для почвы, где жили черви, ниже. Во фракции крупной пыли наблюдается существенное увеличение частиц, по сравнению с контролем (на ~ 3 %). При этом увеличение содержания частиц большего размера наблюдается в почве, где жили черви, по сравнению с копролитами (на ~ 4.4 %). Частиц фракции тонкого песка практически нет как в копролитах, так и в почве, где жили черви *A. caliginosa*.

Иная картина наблюдается для *L. rubellus* (копролиты и почва, где жили черви). Во фракциях ила и мелкой пыли, содержание частиц ниже, чем в контроле (для фракции ила уменьшение на ~ 1 %, и для копролитов, и для почвы, где жили черви; для фракции мелкой пыли уменьшение составило ~ 4.5 % для копролитов и ~ 1 % для почвы, где жили черви). При этом доля фракции мелкой пыли в копролитах ниже, чем в почве, где жили черви. Фракция средней пыли не отличается от контроля. Во фракции крупной пыли почва с червями содержит большее количество частиц, чем в контроле и копролитах. Интерес представляет то, что в копролитах *L. rubellus* во фракции тонкого песка содержится намного больше частиц, чем в контроле и почве, где жили черви (последняя представлена единичными частицами из этой фракции). Вероятно, это связано с присутствием в копролитах органических частиц из опада. Наибольшее же внимание привлекает наличие в копролитах частиц крупнее 250 мкм. Это частицы, которых не было в образцах исходной почвы из-за специфики пробоподготовки (просеивание образцов через сито 250 мкм). В данном случае частицы крупнее 250 мкм представляют собой органический материал, который переработали черви (по данным микроскопирования). Предположительно, из-за своей несферичности подобные частицы смогли пройти сквозь сито. Поскольку такие частицы являются результатом преобразования опада, прошедшего через кишечник дождевых червей, они найдены именно в копролитах.

Наличие опада на поверхности почвы (вариант ПО) не оказало влияния на гранулометрические показатели. Из чего можно заключить, что все зафиксированные отличия в гранулометрическом составе произошли за счет деятельности дождевых червей.

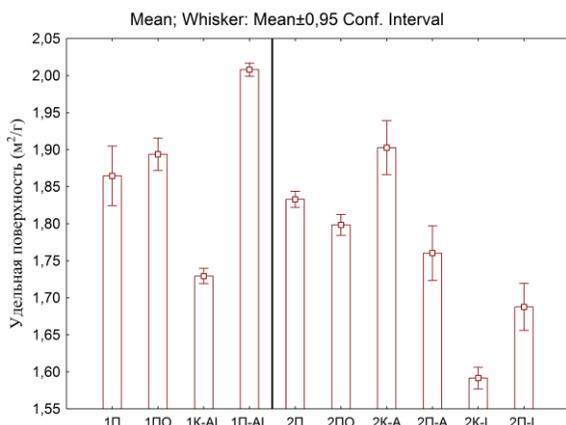


Рис. 3. Удельная поверхность для двух этапов эксперимента: слева (первый этап 1П – почва, 1ПО – почва с опадом, 1К-AL – копролиты двух видов, 1П-AL – почва, где жили черви), справа (второй этап 2П – почва, 2ПО – почва с опадом, 2К-А – копролиты *A. caliginosa*; 2П-А – почва, где жили *A. caliginosa*, 2К-Л – копролиты *L. rubellus*; 2П-Л – почва, где жили *L. rubellus*).

Fig. 3. The specific surface for the two stages of the experiment: on the left (first stage 1П – soil, 1ПО – soil with litter, 1К-AL – two types of coprolites, 1П-AL – soil where the worms lived), on the right (second stage 2П – soil, 2ПО – soil with litter, 2К-А – coprolites of *A. caliginosa*; 2П-А – the soil where *A. caliginosa* lived, 2К-Л – coprolites of *L. rubellus*; 2П-Л – soil where *L. rubellus* lived).

Удельная поверхность почвы (рис. 3) рассчитана исходя из данных гранулометрического анализа. Для совместного содержания двух видов дождевых червей характерно уменьшение удельной поверхности в копролитах и увеличение в почве, где жили черви, по сравнению с контролем (т. е. после прохождения через кишечник наблюдалась большая агрегированность почвы). Для вида *A. caliginosa* наблюдается увеличение удельной поверхности копролитов, по сравнению с контролем (т. е. черви размельчили почву, пропуская ее через кишечник). Почва, где жил *A. caliginosa* практически не отличается от почвы контроля. Для *L. rubellus* наблюдается уменьшение удельной поверхности, как для копролитов, так и для почвы, где жил *L. rubellus*

(предположительно за счет массового добавления к почве органических частиц опада). При этом удельная поверхность копролитов ниже, чем почвы.

Анализируя микробиологические данные можно отметить, что для копролитов во всех вариантах опыта наблюдается увеличение численности бактерий (рис. 4). На рисунке первая треть отображает численность для первого этапа эксперимента (*A. caliginosa* и *L. Rubellus*, содержащиеся вместе), а последующие две трети – для второго этапа (*A. caliginosa* и *L. Rubellus*, содержащиеся раздельно). Для каждого определения показателей численности брался свой контроль (почва без червей и почва только с опадом).

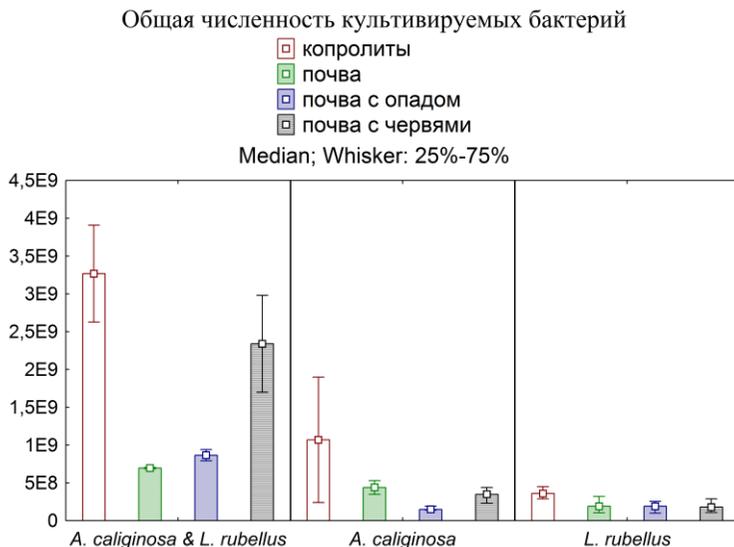


Рис. 4. Общая численность культивируемых бактерий.

Fig. 4. The total number of cultivated bacteria.

Несмотря на то, что точность метода микробиологического посева позволяет определять изменение численности при разнице более чем на порядок, можно сказать, что наибольшее увеличение численности наблюдается при содержании двух видов дождевых червей вместе. Также наблюдается тенденция усиления этого эф-

фекта в ряду *L. rubellus* и *A. caliginosa* > *A. caliginosa* > *L. rubellus*.

Проведена оценка липазной активности, на основании реакции гидролиза ФДА (флуоресцеина диацетата). На рисунке 7 приведен пример экспериментально полученных кривых зависимости скорости ферментативной реакции от концентрации субстрата реакции, используемых для расчета кинетических параметров V_m и K_m липаз с помощью аппроксимации экспериментальных данных кинетической математической моделью Михаэлиса – Ментен.

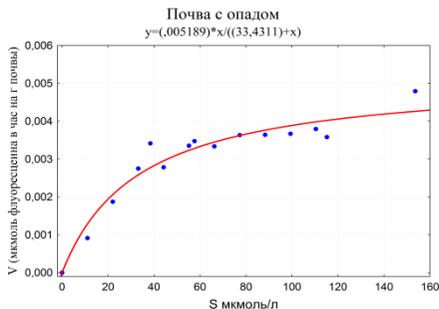


Рис. 5. Пример кривой насыщения липаз субстратом ферментативной реакции (ФДА), используемой для расчета кинетических параметров ферментов по модели Михаэлиса – Ментен.

Fig. 5. An example of a lipase saturation curve with an enzyme reaction substrate (FDA) used to calculate the kinetic parameters of enzymes according to the Michaelis – Menten model.

На основании подобных кривых рассчитаны значения V_m (рис. 6) и K_m (рис. 7) для липаз.

Для первого этапа эксперимента характерно увеличение V_m в копролитах и почве, где содержались черви, что говорит о повышении дождевыми червями активности микроорганизмов при содержании двух видов червей вместе. При этом увеличение в копролитах ниже, чем в почве с *L. rubellus* и *A. caliginosa*. Это может быть связано с действием кожных выделений дождевых червей. Во второй части эксперимента при раздельном содержании червей разных видов наблюдается увеличение V_m для копролитов *A. caliginosa*, по сравнению с контролем, и уменьшение в почве, где жили *A. caliginosa*.

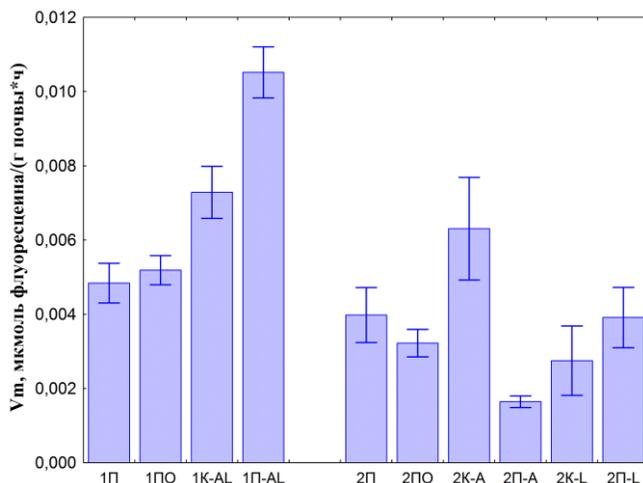


Рис. 6. Максимально возможная скорость гидролиза (V_m) ФДА, осуществляемого липазами при полном насыщении их активных центров субстратом реакции (первый этап 1П – почва, 1ПО – почва с опадом, 1К-АЛ – копролиты двух видов, 1П-АЛ – почва, где жили черви), справа (второй этап 2П – почва, 2ПО – почва с опадом, 2К-А – копролиты *A. caliginosa*; 2П-А – почва, где жили *A. caliginosa*, 2К-Л – копролиты *L. rubellus*; 2П-Л – почва, где жили *L. rubellus*).

Fig. 6. The maximum possible rate of hydrolysis (V_m) of FDA carried out by lipases at full saturation of their active centers with the reaction substrate (first stage 1П – soil, 1ПО – soil with litter, 1К-АЛ – two types of coprolites, 1П-АЛ – soil where the worms lived), on the right (second stage 2П – soil, 2ПО – soil with litter, 2К-А – coprolites of *A. caliginosa*; 2П-А – the soil where *A. caliginosa* lived, 2К-Л – coprolites of *L. rubellus*; 2П-Л – soil where *L. rubellus* lived).

В копролитах *L. rubellus* происходит снижение V_m , а почва, где жил *L. Rubellus*, достоверно не отличается от контроля. Значения V_m вариантов контроля с почвой и почвой с опадом практически не отличаются. Присутствие опада не дает изменения липазной активности, соответственно, все изменения вызваны деятельностью дождевых червей.

Таким образом, можно сделать вывод, что V_m уменьшается в ряду копролитов *L. rubellus* и *A. caliginosa* > *A. caliginosa* > *L. rubellus*. Это явление подтверждается увеличением общей чис-

ленности бактерий в копролитах, достигающей своего максимума при совместном содержании дождевых червей.

Важно заметить, что абсолютные значения липазной активности (V_m) существенно ниже в нашем эксперименте, чем они представлены в литературных данных ([Киреева и др., 2006](#); [Zhimin et al., 2015](#)). Причины столь низких значений, возможно, кроются в длительном хранении исходной почвы в воздушно-сухом состоянии. Для некоторых ферментов подобные условия хранения могут привести к значительному снижению исходной ферментативной активности ([Даденко, Казеев, 2004](#)).

Эффективность работы ферментов характеризует константа полунасыщения Михаэлиса K_m (рис. 7). Для первого этапа эксперимента характерно незначительное увеличение K_m для копролитов и почвы, где жили черви. При этом увеличение в копролитах ниже чем в почве с *L. rubellus* и *A. caliginosa*. Из этого можно сделать предположение, что два вида дождевых червей мало влияют на эффективность работы липазы.

На втором этапе наблюдается увеличение K_m для копролитов *A. caliginosa* и, особенно, для *L. rubellus* и уменьшение K_m в почве, где жил *A. caliginosa*, по сравнению с контролем. Эффективность работы ферментов в почве, где жили *L. rubellus*, увеличивается не столь сильно и достигает тех же значений, что и в копролитах *A. caliginosa*.

Контроль с почвой и почвой с опадом существенно не отличаются по данному показателю. Поскольку присутствие опادا не дает изменения K_m , значит, все изменения вызваны деятельностью дождевых червей. Таким образом, можно заключить, что по отдельности каждый вид дождевых червей повышает эффективность работы фермента липаз, но при совместном содержании эффективность фермента падает, однако значительно возрастает скорость ферментативной активности.

Для интегрального анализа полученных физических и микробиологических параметров и для выявления скрытых биологических факторов был проведен дискриминантный анализ отдельно для физических и микробиологических параметров.

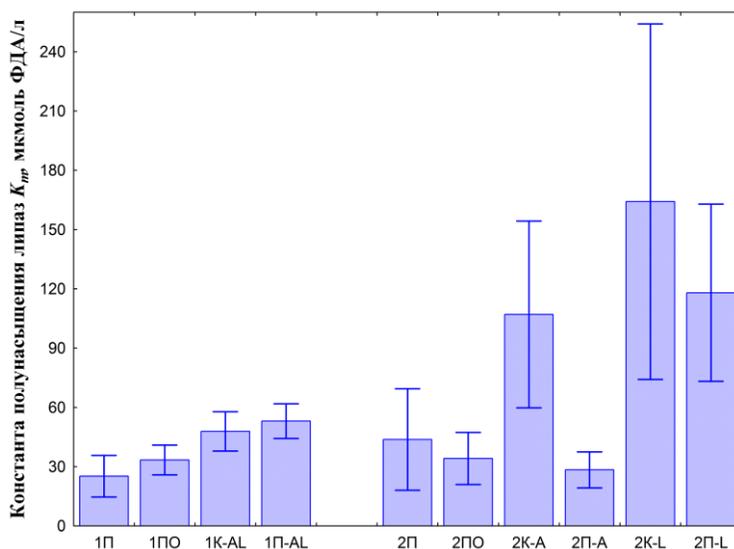


Рис. 7. Средство липаз к субстрату, оцененное по константе полунасыщения Михаэлиса (K_m) (первый этап 1П – почва, 1ПО – почва с опадом, 1К-AL – копролиты двух видов, 1П-AL – почва, где жили черви), справа (второй этап 2П – почва, 2ПО – почва с опадом, 2К-А – копролиты *A. caliginosa*; 2П-А – почва, где жили *A. caliginosa*, 2К-Л – копролиты *L. rubellus*; 2П-Л – почва, где жили *L. rubellus*).

Fig. 7. The affinity of lipase to the substrate, estimated by the Michaelis constant of half-saturation (K_m) (first stage 1П – soil, 1ПО – soil with litter, 1К-AL – two types of coprolites, 1П-AL – soil where the worms lived), on the right (second stage 2П – soil, 2ПО – soil with litter, 2К-А – coprolites of *A. caliginosa*; 2П-А – the soil where *A. caliginosa* lived, 2К-Л – coprolites of *L. rubellus*; 2П-Л – soil where *L. rubellus* lived).

В ходе анализа был выявлен только один статистически достоверный биологический фактор, действующий на физические и микробиологические свойства и формально математически выраженный как дискриминационная функция 1 ($ДФ1_{\text{микр}}$ – для микробиологических свойств; $ДФ1_{\text{физ}}$ – для физических свойств).

Вторая дискриминантная функция является вспомогательной, математически обусловленной проводимым анализом. По взаиморасположению объектов исследования в двумерном факторном пространстве, образованном пересечением $ДФ1$ и $ДФ2$

(рис. 8), можно заключить, что этот фактор – влияние дождевых червей на физические и микробиологические свойства субстратов. Так как слева направо на рисунке 8 наблюдается разделение объектов в ряд от копролитов, через почву, в которой жили черви, до контрольных вариантов почвы.

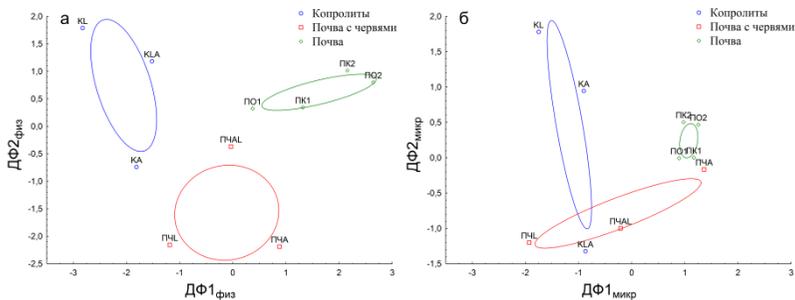


Рис. 8. Взаиморасположению объектов исследования в двумерном факторной пространстве, образованном пересечением ДФ1 и ДФ2, полученных в ходе дискриминантного анализа физических (а) и микробиологических (б) параметров.

Fig. 8. The interposition of the objects of study in a two-dimensional factor space, formed by the intersection of ДФ1 and ДФ2, obtained in the course of discriminant analysis of physical (a) and microbiological (b) parameters.

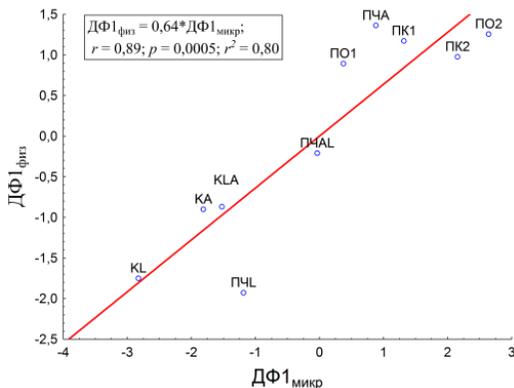


Рис. 9. Корреляция между ДФ1 микр. и ДФ1 физ.
Fig. 9. Correlation between ДФ1 микр. and ДФ1 физ.

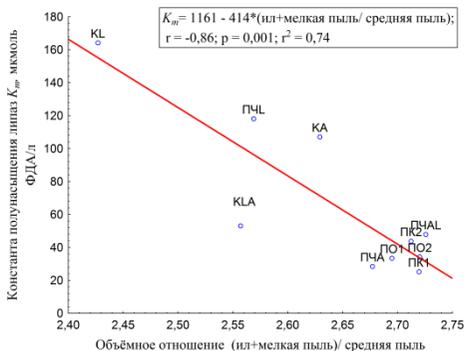


Рис. 11. Корреляция между K_m липаз и отношением ил с мелкой пылью к средней пыли.

Fig. 11. The correlation between K_m lipase and the ratio of sludge and fine dust to medium dust.

Увеличение удельной поверхности почвы и копролитов приводит к увеличению площади поверхности, доступной для иммобилизации внеклеточных липаз, которые стабилизируются и сохраняют свою активность преимущественно в адсорбированном состоянии. Обилие липаз связано с обилием гетеротрофных бактерий, что указывает на преимущественно микробное происхождение этих ферментов и недолгое сохранение их активности в почве (вне клеток), что и обеспечивает наблюдаемую тесную корреляцию. Уменьшение эффективности работы липаз при увеличении фракции средней пыли (ярко наблюдаемое для *L. rubellus* увеличение во фракции тонкого песка и снижение активности фермента (V_m)) обусловлено привнесением червями пористых органических частиц размера средней пыли из опада (подобные частицы наблюдаются в световой микроскоп в почвенной суспензии), на которых липазы адсорбируются, в том числе и на внутренних поверхностях, для которых затруднена диффузия субстрата реакции к активным центрам липаз, иммобилизованных внутри частиц. Это приводит к увеличению K_m .

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Данные эксперимента охватывают гетерогенность внутри микрососмов и позволяют говорить о порядке величин наблюдае-

мых эффектов, а также позволяют выделить параметры, которые следует рассмотреть в качестве базовых для проведения дальнейших исследований, направленных на изучение свойств копролитов дождевых червей. На основании полученных результатов можно заключить, что происходит изменение гранулометрического состава и удельной поверхности при жизнедеятельности дождевых червей в почве с опадом. Наблюдается увеличение численности микроорганизмов и ферментативной активности в копролитах и почве с дождевыми червями. Разные виды червей оказывают разное влияние, а степень и характер влияния неаддитивные. Это связано с различными экологическими группами выбранных видов. *A. caliginosa* – истинно почвенный (эндогейный) червь. Он в большей степени питается органическими остатками, которые находятся в толще почвы. В то время как *L. rubellus* – подстилочный (эпигейный) червь. Для него характерно обитание в подстилке и верхнем слое почвы. Следовательно, и преобразование опада, а также функции этих видов в почве различны. Вероятно, именно это приводит к столь сильным отличиям в определяемых параметрах. Неаддитивность же эффекта стоит отнести к устойчивости экосистем. Чем выше биоразнообразие, тем устойчивее система. Усиление эффектов при совместном содержании двух видов иллюстрирует этот принцип.

Копролиты дождевых червей отличаются как от почвы без червей, так и от почвы, в которой они обитают. Наличие опада в почве без червей практически не оказывает влияние на изученные параметры. Это может указывать на то, что в природе значительная роль в активизации почвенной микробиоты отводится не только растительным остаткам, поступающим на поверхность почвы, существенную роль играет почвенная фауна, которая размельчает листовую опад, инициирует и активизирует переработку органических веществ почвенными микроорганизмами.

Одним из важных выводов можно считать экспериментально подтвержденную низкую неоднородность (разброс значений) определяемых физических и микробиологических параметров, по сравнению с различиями между исследуемыми объектами. Это позволит проверять гипотезы и предположения, а также статистически обосновывать выводы с дальнейшей экстраполяцией на

природные экосистемы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Бызов Б.А., Якушев А.В.* Микробиологическая характеристика вермикомпостирования методом мультисубстратного тестирования // Почвоведение. 2008. № 11. С. 1381–1387. DOI: [10.1134/S1064229308110112](https://doi.org/10.1134/S1064229308110112).
2. *Всеволодова-Перель Т.С.* Дождевые черви: Кадастр и определитель. М.: Наука. 1997. 102 с.
3. *Даденко Е.В., Казеев К.Ш.* Влияние различных сроков и способов хранения почвенных образцов на ферментативную активность чернозема // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Естественные науки. 2004. № 6. С. 61–65.
4. *Звягинцев Д.Г., Бабьева И.П., Зенова Г.М.* Биология почв. М.: Изд-во Моск. ун-та, 2005. 445 с.
5. *Киреева Н.А., Маркарова М.Ю., Щемелинин Т.Н., Рафикова Г.Ф.* Ферментативная и микробиологическая активность загрязненных нефтью глееподзолистых почв на разных стадиях их восстановления // Вестник Башкирского университета. 2006. Т. 11. № 4. С. 56–60.
6. *Кутовая О.В.* Характеристика гумусовых веществ агродерново-подзолистой почвы и копролитов дождевых червей // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2012. Вып. 69. С. 46–59. DOI: [10.19047/0136-1694-2012-69-46-59](https://doi.org/10.19047/0136-1694-2012-69-46-59).
7. *Кутовая О.В., Гребенников А.М., Тхакахова А.К., Исаев В.А., Гармашов В.М., Беспалов В.А., Чевевердин 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. Вып. 92. С. 35–61. DOI: [10.19047/0136-1694-2018-92-35-61](https://doi.org/10.19047/0136-1694-2018-92-35-61).
8. *Перель Т.С.* Распространение и закономерности распределения дождевых червей фауны СССР. М.: Наука, 1979. 272 с.
9. *Тихонов В.В., Бызов Б.А., Завгородняя Ю.А., Демин В.В.* Дождевые черви – преобразователи структуры и биологической активности гуминовых кислот // Изв. РАН. Сер. биологическая. 2011. № 1. С. 24–32. DOI: [10.1134/S1062359010061032](https://doi.org/10.1134/S1062359010061032).
10. *Фролов О.А., Якушев А.В.* Влияние на бактериальный гидролитический комплекс гумусо-аккумулятивного горизонта техноурбанозема пассажа через кишечник дождевого червя *Aporrectodea caliginosa* // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2018. Вып. 94. С. 57–73. DOI: [10.19047/0136-1694-2018-92-57-73](https://doi.org/10.19047/0136-1694-2018-92-57-73).

11. Храмченкова О., Веремеев В., Бачура Ю. Водоросли почв и копролитов дождевых червей в луговых экосистемах // Наука и инновации. 2012. № 108. С. 67–70.
12. Чернов Т.И., Холодов В.А., Козут Б.М., Иванов А.Л. Методология микробиологических исследований почвы в рамках проекта “Микробиом России” // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2017. Вып. 87. С. 100–113. DOI: [10.19047/0136-1694-2017-87-100-113](https://doi.org/10.19047/0136-1694-2017-87-100-113).
13. Юрков А.М., Чернов И.Ю., Тиунов А.В. Влияние дождевых червей *Lumbricus terrestris* на структуру дрожжевого сообщества лесной подстилки // Микробиология. 2008. Т. 77. № 1. С. 121–125. DOI: [10.1134/S0026261708010153](https://doi.org/10.1134/S0026261708010153).
14. Bal L. Morphological investigation in two moder-humus profiles and the role of the soil fauna in their genesis // Geoderma. 1970. Vol. 4. Issue 1. P. 5–36. DOI: [10.1016/0016-7061\(70\)90030-3](https://doi.org/10.1016/0016-7061(70)90030-3).
15. Bi Y.M., Tian G.L., Wang C., Zhang Y., Wang D.N., Zhang F.F., Sun Z.J. Differential effects of two earthworm species on Fusarium wilt of strawberry // Appl. Soil Ecology. 2018. Vol. 126. P. 174–181. DOI: [10.1016/j.apsoil.2018.02.024](https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2018.02.024).
16. Blouin M., Hodson M.E., Delgado E.A., Baker G., Brussaard L., Butt K.R., Cluzeau D. A review of earthworm impact on soil function and ecosystem services // European Journal of Soil Science. 2013. Vol. 64. Vol. 2. P. 161–182. DOI: [10.1111/ejss.12025](https://doi.org/10.1111/ejss.12025).
17. Edwards C.A. Earthworm ecology. CRC press. 2004. 456 p.
18. Filser J., Faber J.H., Tiunov A.V., Brussaard L., Frouz J., Deyn G.D., Uvarov A.V., Berg M.P., Lavelle P., Loreau M., Wall D.H., Querner P., Eijsackers H., Jiménez J.J. Soil fauna: key to new carbon models // Soil. 2016. No. 2. P. 565–582. DOI: [10.5194/soil-2-565-2016](https://doi.org/10.5194/soil-2-565-2016).
19. Frouz J., Livečková M., Albrechtová J., Chroňáková A., Cajthaml T., Pižl V., Šimáčková H. Is the effect of trees on soil properties mediated by soil fauna? A case study from post-mining sites // Forest Ecology and Management. 2013. Vol. 309. P. 87–95. DOI: [10.1016/j.foreco.2013.02.013](https://doi.org/10.1016/j.foreco.2013.02.013).
20. Huang K., Xia H. Role of earthworms' mucus in vermicomposting system: Biodegradation tests based on humification and microbial activity // Sci. Total Environ. 2018. Vol. 610–611. P. 703–708. DOI: [10.1016/j.scitotenv.2017.08.104](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.08.104).
21. Laverack N.S. Mechanistic mathematical models of microbial growth in bioreactors and in natural soils: explanation of complex phenomena // Mathematics and Computers in Simulation. 1996. Vol. 42. Issue 2–3. P. 179–186. DOI: [10.1016/0378-4754\(95\)00127-1](https://doi.org/10.1016/0378-4754(95)00127-1).
22. Ma Y., Filley T.R., Johnston C.T., Crow S.E., Szlavecz K., McCormick M.K. The combined controls of land use legacy and earthworm activity on soil organic matter chemistry and particle association during afforestation //

- Organic geochemistry. 2013. Vol. 58. P. 56–68. DOI: [10.1016/j.orggeochem.2013.02.010](https://doi.org/10.1016/j.orggeochem.2013.02.010).
23. Peigne J., Vian J.F., Payet V., Saby N.P. Soil fertility after 10 years of conservation tillage in organic farming // Soil and Tillage Res. 2018. Vol. 175. P. 194–204. DOI: [10.1016/j.still.2017.09.008](https://doi.org/10.1016/j.still.2017.09.008).
24. Römbke J., Jänsch S., Didden W., Römbke J., Jänsch S., Didden W. The use of earthworms in ecological soil classification and assessment concepts // Ecotoxicology and Environmental Safety. 2005. Vol. 62. Issue 2. P. 249–265. DOI: [10.1016/j.ecoenv.2005.03.027](https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2005.03.027).
25. Sanchez-Hernandez J.C. Biochar activation with exoenzymes induced by earthworms: A novel functional strategy for soil quality promotion // J. Hazardous Materials. 2018. Vol. 350. P. 136–143. DOI: [10.1016/j.jhazmat.2018.02.019](https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2018.02.019).
26. Sanchez-Hernandez J.C., del Pino J.N., Capowiez Y., Mazzia C., Rault M. Soil enzyme dynamics in chlorpyrifos-treated soils under the influence of earthworms // Sci. Total Environ. 2018. Vol. 612. P. 1407–1416. DOI: [10.1016/j.scitotenv.2017.09.043](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.09.043).
27. Satchell J.E. Earthworm microbiology // Earthworm ecology from Darwin to vermiculture. London, N.Y, 1983. P. 351–364. DOI: [10.1007/978-94-009-5965-1](https://doi.org/10.1007/978-94-009-5965-1).
28. Schnürer J., Rosswall T. Fluorescein diacetate hydrolysis as a measure of total microbial activity in soil and litter // Appl. Environ. Microbiol. 1982. Vol. 43(6). P. 1256–1261.
29. Zhimin Y.U.A.N., Haijun L.I.U., Jun H.A.N., Jingjing S.U.N., Xiaoying W.U., Jun, Y.A.O. Monitoring soil microbial activities in different cropping systems using combined methods // Pedosphere. 2017. Vol. 27. No. 1. P. 138–146. DOI: [10.1016/S1002-0160\(15\)60100-X](https://doi.org/10.1016/S1002-0160(15)60100-X).

REFERENCES

1. Byzov B.A., Jakushev A.V., Mikrobiologicheskaja karakteristika vermikompostirovaniya metodom mul'tisubstratnogo testirovaniya (Microbiological characteristics of vermicomposting by the method of multisubstrate testing), *Pochvovedenie*, 2008, No. 11, pp. 1381–1387, DOI: [10.1134/S1064229308110112](https://doi.org/10.1134/S1064229308110112).
2. Vsevolodova-Perel' T.S., *Dozhdevye chervi: Kadastr i opredelitel'* (Earthworms: Cadastre and qualifier), Moscow: Nauka, 1997, 102 p.
3. Dadenko E.V., Kazeev K.Sh., Vlijanie razlichnyh srokov i sposobov hraneniya pochvennyh obrazcov na fermentativnuju aktivnost' chernozema (The influence of different terms and methods of storing soil samples on the enzymatic activity of chernozem), *Izvestija vysshih uchebnyh zavedenij. Severo-Kavkazskij region*, Natural Sciences, 2004, No. 6, pp. 61–65.

4. Zvyagintsev D.G., Bab'eva I.P., Zenova G.M., *Biologiya pochv* (Soil biology), Moscow: Izd-vo Mosk. un-ta, 2005. 445 p.
5. Kireeva N.A., Markarova M.Yu., Shchemelinin T.N., Rafikova G.F., Fermentativnaya i mikrobiologicheskaya aktivnost' zagryaznennykh neft'yu gleepodzolistykh pochv na raznykh stadiyakh ikh vosstanovleniya (Enzymatic and microbiological activity of oil-contaminated geysodzol soils at different stages of their restoration), *Vestnik Bashkirskogo universiteta*, 2006, Vol. 11, No. 4, pp. 56–60.
6. Kutovaya O.V., Grebennikov A.M., Tkhakakhova A.K., Isaev V.A., Garmashov V.M., Bespalov V.A., Cheverdin Y.I., Belobrov V.P., The changes in soil-biological processes and structure of microbial community of agrochernozems in conditions of different ways of soil cultivation, *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).
7. Kutovaya O.V., Characteristics of humus and coprolites of earthworms in agro-soddy podzolic soils, *Dokuchaev Soil Bulletin*, 2012, Vol. 69, pp. 46–59, DOI: [10.19047/0136-1694-2012-69-46-59](https://doi.org/10.19047/0136-1694-2012-69-46-59).
8. Perel' T.S., *Rasprostraneniye i zakonmernosti raspredeleniya dozhdevykh chervei fauny SSSR* (Distribution and distribution patterns of earthworms of the fauna of the USSR), Moscow: Nauka, 1979, 272 p.
9. Tikhonov V.V., Byzov B.A., Zavgorodnyaya Y.A., Demin V.V., Earthworms as modifiers of the structure and biological activity of humic acids, *Biol. Bull. Russ. Acad. Sci.*, 2011, Vol. 38, Issue 1, pp. 17–24, DOI: [10.1134/S1062359010061032](https://doi.org/10.1134/S1062359010061032).
10. Frolov O.A., Yakushev A.V., The impact of passage through the intestine of the earthworm *Aporrectodea caliginosa* on the bacterial community, *Dokuchaev Soil Bulletin*, 2018, Vol. 94, pp. 57–73, DOI: [10.19047/0136-1694-2018-92-57-73](https://doi.org/10.19047/0136-1694-2018-92-57-73).
11. Khranchenkova O., Veremeev V., Bachura Yu., Vodorosli pochv i koprolitov dozhdevykh chervei v lugovykh ekosistemakh (Algae of soils and coprolites of earthworms in meadow ecosystems), *Nauka i innovatsii*, 2012, No. 108, pp. 67–70.
12. Chernov T.I., Kholodov V.A., Kogut B.M., Ivanov A.L., The Method of Microbiological Soil Investigations within the Framework of the Project “Microbiome of Russia”, *Dokuchaev Soil Bulletin*, 2017, Vol. 87, pp. 100–113, DOI: [10.19047/0136-1694-2017-87-100-113](https://doi.org/10.19047/0136-1694-2017-87-100-113).
13. Yurkov A.M., Chernov I.Y., Tiunov A.V., Influence of *Lumbricus terrestris* earthworms on the structure of the yeast community of forest litter, *Microbiology*, 2008, Vol. 77, Issue 1, pp. 121–125, DOI: [10.1134/S0026261708010153](https://doi.org/10.1134/S0026261708010153).

14. Bal L., Morphological investigation in two moder-humus profiles and the role of the soil fauna in their genesis, *Geoderma*, 1970, Vol. 4, Issue 1, pp. 5–36, DOI: [10.1016/0016-7061\(70\)90030-3](https://doi.org/10.1016/0016-7061(70)90030-3).
15. Bi Y.M., Tian G.L., Wang C., Zhang Y., Wang D.N., Zhang F.F., Sun Z.J., Differential effects of two earthworm species on Fusarium wilt of strawberry, *Appl. Soil Ecology*, 2018, Vol. 126, pp. 174–181, DOI: [10.1016/j.apsoil.2018.02.024](https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2018.02.024).
16. Blouin M., Hodson M.E., Delgado E.A., Baker G., Brussaard L., Butt K.R., Cluzeau D., A review of earthworm impact on soil function and ecosystem services, *European Journal of Soil Science*, 2013, Vol. 64, Vol. 2, pp. 161–182, DOI: [10.1111/ejss.12025](https://doi.org/10.1111/ejss.12025).
17. Edwards, Clive A., *Earthworm ecology*, CRC press, 2004, 456 p.
18. Filser J., Faber J.H., Tiunov A.V., Brussaard L., Frouz J., Deyn G.D., Uvarov A.V., Berg M.P., Lavelle P., Loreau M., Wall D.H., Querner P., Eijsackers H., Jiménez J.J., Soil fauna: key to new carbon models, *Soil*, 2016, No. 2, pp. 565–582, DOI: [10.5194/soil-2-565-2016](https://doi.org/10.5194/soil-2-565-2016).
19. Frouz J., Livečková M., Albrechtová J., Chroňáková A., Cajthaml T., Pižl V., Šimáčková H., Is the effect of trees on soil properties mediated by soil fauna? A case study from post-mining sites, *Forest Ecology and Management*, 2013, Vol. 309, pp. 87–95, DOI: [10.1016/j.foreco.2013.02.013](https://doi.org/10.1016/j.foreco.2013.02.013).
20. Huang K., Xia H., Role of earthworms' mucus in vermicomposting system: Biodegradation tests based on humification and microbial activity, *Sci. Total Environ.*, 2018, Vol. 610–611, pp. 703–708, DOI: [10.1016/j.scitotenv.2017.08.104](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.08.104).
21. Laverack N.S., Mechanistic mathematical models of microbial growth in bioreactors and in natural soils: explanation of complex phenomena, *Mathematics and Computers in Simulation*, 1996, Vol. 42, Issue 2–3, pp. 179–186, DOI: [10.1016/0378-4754\(95\)00127-1](https://doi.org/10.1016/0378-4754(95)00127-1).
22. Ma Y., Filley T.R., Johnston C.T., Crow S.E., Szlavecz K., McCormick M.K., The combined controls of land use legacy and earthworm activity on soil organic matter chemistry and particle association during afforestation, *Organic geochemistry*, 2013, Vol. 58, pp. 56–68, DOI: [10.1016/j.orggeochem.2013.02.010](https://doi.org/10.1016/j.orggeochem.2013.02.010).
23. Peigne J., Vian J.F., Payet V., Saby N.P., Soil fertility after 10 years of conservation tillage in organic farming, *Soil and Tillage Res.*, 2018, Vol. 175, pp. 194–204, DOI: [10.1016/j.still.2017.09.008](https://doi.org/10.1016/j.still.2017.09.008).
24. Römbke J., Jänsch S., Didden W., Römbke J., Jänsch S., Didden W., The use of earthworms in ecological soil classification and assessment concepts, *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2005, Vol. 62, Issue 2, pp. 249–265, DOI: [10.1016/j.ecoenv.2005.03.027](https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2005.03.027).
25. Sanchez-Hernandez J.C., Biochar activation with exoenzymes induced by earthworms: A novel functional strategy for soil quality promotion, *J.*

Hazardous Materials, 2018, Vol. 350, pp. 136–143, DOI: [10.1016/j.jhazmat.2018.02.019](https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2018.02.019).

26. Sanchez-Hernandez J.C., del Pino J.N., Capowiez Y., Mazzia C., Rault M., Soil enzyme dynamics in chlorpyrifos-treated soils under the influence of earthworms, *Sci. Total Environ.*, 2018, Vol. 612, pp. 1407–1416, DOI: [10.1016/j.scitotenv.2017.09.043](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.09.043).

27. Satchell J.E., Earthworm microbiology, *Earthworm ecology from Darwin to vermiculture*, London, N.Y, 1983, pp. 351–364, DOI: [10.1007/978-94-009-5965-1](https://doi.org/10.1007/978-94-009-5965-1).

28. Schnürer J., Rosswall T., Fluorescein diacetate hydrolysis as a measure of total microbial activity in soil and litter, *Appl. Environ. Microbiol.*, 1982, Vol. 43(6), pp. 1256–1261.

29. Zhimin Y.U.A.N., Haijun L.I.U., Jun H.A.N., Jingjing S.U.N., Xiaoying W.U., Jun, Y.A.O., Monitoring soil microbial activities in different cropping systems using combined methods, *Pedosphere*, 2017, Vol. 27, No. 1, pp. 138–146, DOI: [10.1016/S1002-0160\(15\)60100-X](https://doi.org/10.1016/S1002-0160(15)60100-X).

УДК 631.4, 579.266.2

DOI: 10.19047/0136-1694-2019-99-117-144

Ссылки для цитирования:

Железова А.Д., Пассова Д.И., Никитин Д.А., Яшин М.А., Железова С.В. Влияние способа сельскохозяйственной обработки на микробиологические характеристики дерново-подзолистой почвы // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2019. Вып. 99. С. 117-144. DOI: 10.19047/0136-1694-2019-99-117-144

Cite this article as:

Zhelezova A.D., Passova D.I., Nikitin D.A., Yashin M.A., Zhelezova S.V., The influence of agricultural treatment type on the microbial properties of sod-podzolic soil, Dokuchaev Soil Bulletin, 2019, V. 99, pp. 117-144, DOI: 10.19047/0136-1694-2019-99-117-144

Влияние способа сельскохозяйственной обработки на микробиологические характеристики дерново-подзолистой почвы

© 2019 г. А. Д. Железова^{1*}, Д. И. Пассова², Д. А. Никитин¹,
М. А. Яшин¹, С. В. Железова²

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

<https://orcid.org/0000-0002-2086-299X>, *e-mail: alferrum@mail.ru.

²РГАУ – МСХА имени К. А. Тимирязева,
Россия, 127550, Москва, ул. Тимирязевская, 49.

Поступила в редакцию 28.05.2019, принята к публикации 21.11.2019

Резюме: Проведено сравнение физических, химических и микробиологических свойств дерново-подзолистой пахотной среднесуглинистой почвы в условиях применения традиционной и нулевой обработки. Объектом исследования были образцы из пахотного слоя почвы (0–10, 10–20, 20–30 см) поля № 2 многолетнего опыта Центра точного земледелия РГАУ – МСХА имени К.А. Тимирязева, где в 2018 г. выращивали вико-овсяную смесь. Отбор образцов почвы под двумя способами обработки был проведен в июне 2018 г. в 8-кратной пространственной повторности. Была определена влажность, водоудерживающая способность, рН, процентное содержание углерода и азота. Вегетационный индекс NDVI, определенный с помощью прибора GreenSeeker HandHeld, был использован для оценки интенсивности

развития посева. Методом микробиологического посева на питательные среды в образцах была оценена численность эколого-трофических групп микроорганизмов (гетеротрофные аммонификаторы, аэробные и анаэробные азотфиксаторы, денитрификаторы, олиготрофы, целлюлозолитики). Вегетационный индекс NDVI был выше для растений на вспашке. По результатам статистического анализа (t-тест для сравнения независимых выборок) различия численности большинства эколого-трофических групп микроорганизмов при сравнении образцов почвы под нулевой обработкой и под вспашкой были незначимы. В верхнем слое почвы при нулевой обработке наблюдалась большая численность микромицетов, в том числе целлюлозолитических и фитопатогенных, чем при традиционной обработке. Попарное сравнение образцов разных слоев выявило сходное профильное распределение обилия бактерий и грибов при разных способах обработки. Сходство микробиологических характеристик наблюдалось в условиях более высокой влажности и процентного содержания азота в почве при нулевой обработке, по сравнению с почвой под вспашкой.

Ключевые слова: нулевая обработка, вспашка, бактерии, микроскопические грибы.

The influence of agricultural treatment type on the microbial properties of sod-podzolic soil

A. D. Zhelezova^{1*}, D. I. Passova², D. A. Nikitin¹,
M. A. Yashin¹, S. V. Zhelezova²

¹V.V. Dokuchaev Soil Science Institute,
7 Bld. 2 Pyzhevskiy per., Moscow 2119017, Russian Federation,
<https://orcid.org/0000-0002-2086-299X>, *e-mail: alferrum@mail.ru.

²Russian State Agrarian University –
Moscow Agricultural Academy named after K.A. Timiryazev,
49 Timiryazevskaya Str., Moscow 127550, Russian Federation.

Received 28.05.2019, Accepted 21.11.2019

Abstract: In this study we examined the effects of conventional agricultural treatment with plowing and no-till treatment on the physical, chemical and microbiological properties of agro-transformed sod-podzolic loamy soil. Soil was sampled in eightfold spatial replication from the arable layers (0–10, 10–20, 20–30 cm) of field No. 2 of the long-term field experiment of the Center for Precision Agriculture of the Russian State Agrarian University in June, 2018. The crop type on the field No. 2 was vetch and oat mix. Moisture

content, water holding capacity, pH, percentage of carbon and nitrogen were determined. The NDVI vegetation index was measured using GreenSeeker HandHeld and used to estimate the plant development intensity. Microbiological properties were assessed by selective plate counts. The abundance and activity were estimated for the next ecological and trophic groups of microorganisms: heterotrophic ammonifiers, aerobic and anaerobic nitrogen-fixing agents, denitrifiers, oligotrophs, cellulolytics. The vegetation index NDVI was higher for plants growing on the plowed part of the field. The differences in microbiological properties when comparing soil samples under no-till and under plowing were insignificant (by t-test for the independent groups comparison). In no-till samples a greater number of micromycetes, including cellulolytic and phytopathogenic, was observed compared to conventional treatment. Profile distributions of bacterial and fungal gene abundances were similar for both treatments according to the paired comparison of samples from different layers. The similarity in microbiological properties was found in the condition of a higher moisture content of the arable layer of the soil and a higher percentage of nitrogen were revealed in the soil under no-till compared with the soil treated by plowing.

Keywords: no-till, tillage, soil bacteria, soil fungi.

ВВЕДЕНИЕ

Традиционная обработка почвы на основе вспашки с оборотом пласта служит для оптимизации агрофизических свойств пахотного слоя (повышение аэрации, снижение твердости) и существенно снижает засоренность посевов. В настоящее время во всем мире возрастает интерес к минимальным обработкам и нулевым (no-till) технологиям, которые считаются почвосберегающими и более выгодными с экономической точки зрения ([Орлова и др., 2006](#); [Мельников, Железова, 2019](#)). Применение ресурсосберегающих технологий подразумевает снижение количества и глубины механических обработок, использование относительно легкой сельскохозяйственной техники для предотвращения переуплотнения, сохранение растительной мульчи на поверхности почвы ([Rainbow, Derpsch, 2011](#); [Кирюшин, 2014](#)). При нулевой обработке поверхностный слой почвы более уплотнен, по сравнению с традиционной обработкой, что помогает сохранить запас почвенной влаги и защитить почву от водной и ветровой эрозии ([Gras, Hernández, 2016](#)).

Сельскохозяйственные обработки изменяют экологические характеристики почвы как среды обитания микроорганизмов. Микробное сообщество обрабатываемых почв по своему таксономическому составу и функциям значительно отличается от сообществ почв естественных биоценозов ([Bissett et al., 2011](#); [Upchurch et al., 2008](#)). Наблюдается снижение численности и разнообразия микробиоты в почвах пашни, по сравнению с залежными почвами ([Semenov et al., 2018](#)), что может ослаблять супрессивную активность почв по отношению к патогенам ([Agtmaal van et al., 2018](#)). Снижение интенсивности воздействия при переходе от традиционной вспашки к минимальной и нулевой обработке рассматривается как способ сохранения естественной структуры почвы, ее обогащения органическим веществом и восстановления функционального и видового разнообразия микробного сообщества ([Simmons, Coleman, 2008](#); [Capelle van et al., 2012](#); [Souza et al., 2015](#)). Влияние применения ресурсосберегающих технологий земледелия на микробное сообщество почв было изучено для разных биоклиматических зон ([Widmer et al., 2006](#); [Hydbom et al., 2017](#); [Babin et al., 2018](#); [Kaurin et al., 2018](#)). При сниженной интенсивности сельскохозяйственных обработок наблюдается более высокая численность микромицетов ([Hydbom et al., 2017](#)), большее обилие бактерий и функциональных генов ([Kaurin et al., 2018](#)). Способ основной обработки почвы наряду с возделываемой культурой влияет на структуру прокариотного сообщества ([Babin et al., 2018](#)). Однако подобные исследования ранее не проводились для дерново-подзолистых почв.

Целью исследования было сравнение микробиологических свойств дерново-подзолистой почвы в условиях применения двух способов сельскохозяйственной обработки: традиционной, включающей вспашку с оборотом пласта, и нулевой.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Объектами исследования были образцы из поверхностного (0–30 см) слоя почвы опытного поля № 2 Центра точного земледелия РГАУ – МСХА имени К.А. Тимирязева (Москва, 55.8368° N; 37.5635° E). Данная территория располагается на моренной равнине на водоразделе рек Москвы и Яузы у склона Клинско-

Дмитровской гряды ([Патыка и др., 2009](#)). Почва была определена как агротрансформированная дерново-подзолистая среднесуглинистая на неоднородной почвообразующей породе с включениями тяжелосуглинистого материала и опесчаненными линзами ([Хитров, 2012](#)).

Научно-производственный опыт Центра точного земледелия представляет собой двухфакторный полевой эксперимент, заложенный в 2009 г. систематически, двухъярусно, в двухкратной повторности ([Железова и др., 2017](#)). Опытный полигон включает четыре поля общей площадью 6 га. В эксперименте используется четырехпольный зернопропашной севооборот: озимая пшеница + горчица пожнивно; картофель; ячмень; вико-овсяная смесь. Севооборот развернут во времени и в пространстве, площадь отдельных полей севооборота составляет 1.4 и 0.8 га. Каждое поле разделено на 8 стационарных учетных делянок, где попарно в двойной повторности изучают влияние двух факторов: фактор А – технология возделывания полевых культур: точное земледелие и традиционное, фактор Б – прием основной обработки почвы. В опыте используются два варианта основной обработки почв: традиционная отвальная вспашка с культивацией (вспашка с оборотом пласта на глубину 20–22 см) и ресурсосберегающая технология (нулевая обработка под вико-овсяную смесь и пшеницу и минимальная обработка под картофель и ячмень). В данной работе оценивали влияние на микробиологические свойства почвы только второго фактора, т. е. способа обработки почвы.

Исследования проводили на поле № 2 площадью 1.4 га, под посевами вико-овсяной смеси. Предшественник – ячмень яровой. Подготовка почвы на варианте традиционной отвальной вспашки (далее “Вспашка”) включала лущение жнивья после уборки предшественника и зяблевую вспашку с оборотом пласта (сентябрь 2017 г.), ранневесеннее боронование для закрытия влаги (конец апреля), предпосевную культивацию с внесением удобрений. Предпосевное внесение аммиачной селитры (N34) в норме 150 кг/га в физическом весе было проведено 10 мая 2018 г. На варианте “Нулевая обработка, прямой посев” (далее “Нулевая”) удобрения вносят поверхностно без заделки в почву. Посев вико-овсяной смеси был проведен 11 мая 2018 г., норма высева 190 кг/га. Посев

по варианту “Вспашка” осуществляли дисковой сеялкой AMAZONE D-9-30 на глубину 5–6 см, по варианту “Нулевая” пневматической стерневой сеялкой с долотообразным сошником AMAZONE Primera DMC-3000 на глубину 4–5 см. В момент посева деланки варианта “Нулевая” были покрыты прошлогодней стерней ячменя и вегетирующими озимыми сорняками с площадью проективного покрытия 50–80 %. Посев осуществляли в стерню. Для борьбы с сорной растительностью в день проведения посева деланки по варианту “Нулевая” были обработаны гербицидом Раундап (д. в. глифосат) в дозе 6 л/га с расходом рабочей жидкости 300 л/га.

Образцы почвы для микробиологических исследований отбирали 15 июня 2018 г. из верхнего горизонта с помощью почвенного бура с глубин 0–10, 10–20 и 20–30 см. Было заложено по восемь точек по варианту “Вспашка” и “Нулевая” (рис. 1).

Суммарно для исследования было отобрано 48 образцов. В момент отбора образцов почвы овес был в фазе выхода в трубку, вика в фазе 5–6 листьев, до цветения. Проективное покрытие посева составляло 80–100 %; высота полога посева 20–25 см. Для оценки развития биомассы посева в местах отбора почвенных проб с помощью прибора GreenSeeker HandHeld (Trimble) в момент отбора проб определяли вегетационный индекс NDVI посева.

Влажность в образцах определяли термостатно-гравиметрическим методом: высушивание образцов при 105 °С на протяжении 10 часов, после чего проводили измерение уменьшения массы ([Вадюнина, Корчагина, 1996](#)). Для оценки водоудерживающей способности (влажность после насыщения) для образцов почвы массой около 30 г проводили насыщение дистиллированной водой в течение 10 ч. и последующим свободным стеканием в течение 4 ч.

Был определен показатель pH водной вытяжки (в пропорции 1 : 2.5) на приборе РВ-11 Sartorius. Процентное содержание общего углерода и азота в образцах определяли на приборе CN-анализатор Vario Macro cube Elementar Analysensysteme.

(Bio-Rad Laboratories, USA). Была использована методика, описанная ранее ([Железова и др., 2017](#)).

Для характеристики микробиологического состава сообщества почв из образцов с глубины 0–10 см был сделан посев на элективные питательные агаризованные среды, выбранные для оценки численности разных эколого-трофических групп микроорганизмов: МПА (для бактерий-аммонификаторов – деструкторов белка различной природы), среда Гетчинсона с бумажными дисками (для целлюлозолитиков), среда Чапека (для микроскопических грибов), голодный агар (для олиготрофных бактерий и актиномицетов), среда Эшби (для свободноживущих азотфиксирующих бактерий) ([Теппер и др., 2005](#); [Кутовая и др., 2018](#)) (табл.1). Также посев проводили методом предельных разведений на жидкие среды: среда Виноградского (для анаэробных азотфиксаторов) и ГНД (для денитрификаторов) ([Егоров, 1976](#); [Кутовая и др., 2018](#)). Для посева брали 5 г свежей почвы и суспендировали в 50 мл стерильной воды. Для десорбции микробных клеток суспензия обрабатывалась на орбитальном шейкере “MSV-3500” (Латвия) при 300 об./мин в течение 10 минут, после готовили серию разведений суспензии в 10 раз. В таблице 1 указаны составы сред, используемые для посева разведения почвенной суспензии, и сроки учета каждой среды.

Статистическую обработку результатов проводили в программах STATISTICA 8.0 и Microsoft Excel, различие между средними значениями исследуемых признаков на двух вариантах проверяли по t-критерию для независимых выборок.

Таблица 1. Методика микробиологического посева на твердые и жидкие среды
Table 1. Methodology of microbiological plating on solid and liquid media

Название среды	Состав среды на 600 мл	Разведения почвенной суспензии	Объем суспензии для посева	Сроки учета, сутки
МПА	Мясопептонный бульон, агар	3–5	200 мкл	3
Среда Гетчинсона	K_2HPO_4 – 0.6 г; $CaCl_2$ – 0.1 г; $MgSO_4$ – 0.18 г; $NaCl$ – 0.06 г; $FeCl_3$ – 0.006 г; $NaNO_3$ – 1.50 г; $CaCO_3$ – 6 г. После застывания среды в чашках Петри перед посевом на поверхность среды кладут фильтровальную бумагу в качестве источника целлюлозы	1–3	1 мл	24
Среда Чапека	K_2HPO_4 – 0.6 г; $MgSO_4$ – 0.3 г; $NaNO_3$ – 1.8 г; KCl – 0.3 г; сахароза – 18 г; $FeSO_4$ – 0.006 г; агар-агар – 12 г. Перед разливом по чашкам Петри в колбу с горячей средой добавляют стрептомицин.	2–4	200 мкл	5
Голодный агар	Агар-агар – 12 г.	3–5	200 мкл	5
Среда Эшби	K_2HPO_4 – 0.12 г; $MgSO_4$ – 0.12 г; $NaCl$ – 0.12 г; K_2SO_4 – 0.06 г; Сахар – 7 г; $CaCO_3$ – 1.8 г; Агар-агар – 12 г.	По 25 комочков обрастания на 2 чашки Петри готовят из 2 г воздушно-сухой почвы с увлажнением стерильной водой		10
Жидкая среда Виноградского	Глюкоза – 20 г; K_2HPO_4 – 0.6 г; $MgSO_4$ – 0.6 г; в каждую пробирку перед разливом среды добавляют $CaCO_3$ на кончике шпателя.	2–6	1 мл	5, 7, 10, 12
Жидкая среда ГНД	KH_2PO_4 – 0.6 г; молочная кислота (80 %) – 0.36 г; яблочная кислота – 0.3 г; $C_2H_3O_2Na$ – 0.3 г; мясopептонный бульон – 60 мл; $FeCl_3$ – 0.012 г; $NaOH$ – 3.6 таблетки; бромтимоловый синий – 6 мл.	2–11	1 мл	3, 6, 10, 12

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Влажность почвы варьировала от 10.5 до 15.4 %, водоудерживающая способность – от 39 до 57 % (рис. 2). Способ обработки почвы не оказывал существенного влияния на водоудерживающую способность. На момент исследования 15 июня 2018 г. была выявлена более высокая влажность почвы на варианте “Нулевая” (табл. 2). Это явление может быть как следствием сохранения пожнивных растительных остатков в поверхностном слое почвы, так и более низкого водопотребления и развития биомассы посева из-за повышенной плотности почвы. При сравнении значений вегетационного индекса NDVI посевов в условиях двух способов обработки почвы было показано, что посева более интенсивно развиваются на варианте “Вспашка”, чем на “Нулевой”. Среднее значение NDVI по всем обследуемым точкам составило 0.66 на “Вспашке” и 0.46 на “Нулевой” (табл. 2).

Реакция среды (pH) водной вытяжки в изученных образцах изменялся от 4.0 до 5.4, что несколько ниже, чем для большей части дерново-подзолистых почв средней полосы России. Согласно ранее опубликованным данным, кислотность почвы значительно варьирует в пределах поля № 2 и отмечается общий тренд снижения средней величины pH на данном поле за предшествующий период наблюдений ([Железова и др., 2017](#)). Величина pH в разных точках пробоотбора существенно различалась, что свидетельствует о заметной почвенной неоднородности, которая может оказывать большое влияние на микробиологические показатели и элиминировать влияние способа сельскохозяйственной обработки.

Процентное содержание углерода варьировало в пределах 1.26–1.85 % для образцов верхнего слоя почвы (0–10 см) и значительно снижалось с глубиной. Выявлено более высокое процентное содержание азота в образцах почвы при нулевой обработке (табл. 2). Это согласуется с ранее полученными данными об увеличении пулов углерода и азота в почве при снижении интенсивности обработок ([Mishra et al., 2010](#)). Следует отметить достаточно заметную неоднородность процентного содержания углерода и азота, не обусловленную способами сельскохозяйственной обработки.

Таблица 2. Результаты сравнения выборок (n = 48), сгруппированных по способу сельскохозяйственной обработки (t-test by group treatment)
Table 2. Comparison results of samples (n = 48) grouped according to agricultural treatment (t-test by group treatment)

	Mean нулевая	Mean вспашка	Std. Dev. нуле- вая	Std. Dev. вспаш- ка	t- value	P
Влажность	14 %	12 %	1 %	1 %	5.49	0.000
Водоудер- живающая способ- ность	48 %	47 %	4 %	3 %	0.46	0.646
pH	4.87	4.61	0.37	0.36	2.50	0.016
C, %	1.457	1.277	0.189	0.089	2.44	0.029
N, %	0.199	0.160	0.031	0.009	3.35	0.005
NDVI	0.46	0.66	0.07	0.11	-4.21	0.001

Примечание. Значимые различия ($p < 0.01$) между средними значениями выделены жирным шрифтом.

Распределение обилия бактерий и грибов в пахотном слое было исследовано с помощью метода количественной ПЦР. В образцах численность копий гена 16S рРНК бактерий варьировала от 8.71×10^9 до 8.11×10^8 копий/г почвы, численность копий гена ITS региона грибов – от 1.47×10^9 до 1.09×10^8 копий/г почвы. Для разных точек пробоотбора выявлены сходные тренды снижения обилия бактерий и грибов с глубиной: незначительная разница между образцами с глубин 0–10 см и 10–20 см, статистически достоверное снижение обилия к глубине 20–30 см по сравнению с глубиной 0–10 см (рис. 3). Способ обработки не оказывал влияния на обилие грибов и бактерий и на их распределение по глубине пахотного слоя. Согласно данным других исследований, при нулевой обработке в почве наблюдается стратификация микробного сообщества и органического вещества, аналогичное его распределению в профиле почв под естественным биоценозом ([Blanco-Canqui, Lal, 2008](#); [Rahman et al., 2008](#); [Martínez et al., 2016](#)). Отсут-

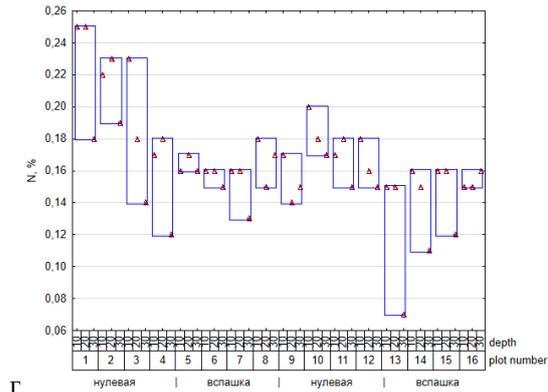
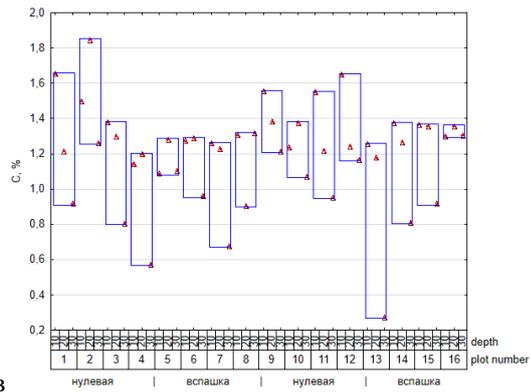
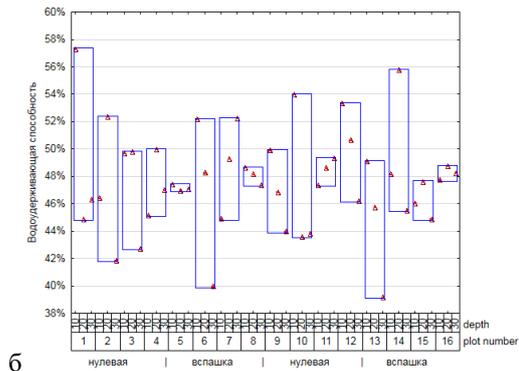
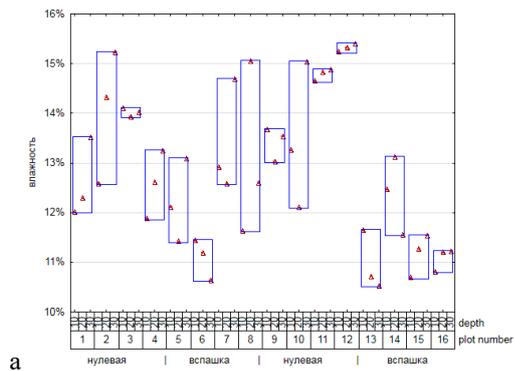
ствие ярко выраженных различий в дифференциации обилия бактерий и грибов может быть связано с изменением способа основной обработки почв при возделывании картофеля и ячменя, для которых применяется минимальная технология.

Для оценки воздействия способа сельскохозяйственной обработки на микробное сообщество пахотного горизонта почвы был проведен посев на элективные среды. Ввиду незначительной профильной дифференциации посев был сделан для образцов слоя 0–10 см. Не было выявлено значимого влияния способа сельскохозяйственной обработки на численность большинства изученных эколого-трофических групп микроорганизмов (табл. 3), за исключением численности микроскопических грибов, определяемой микробиологическим посевом на среду Чапека.

Численность бактерий-аммонификаторов во всех образцах варьировала в пределах $2,9 \times 10^6 - 8,9 \times 10^7$ КОЕ/г почвы. Эти значения сопоставимы с ранее измеренными для почв длительного опыта РГАУ – МСХА имени К.А. Тимирязева ([Поддымкина, 2008](#)). Процент обрастания почвенных комочков на среде Эшби составлял 40–100 %, что свидетельствует о высокой численности свободноживущих азотфиксирующих бактерий и сопоставимо с данными, полученными для черноземных почв ([Василенко и др., 2014](#); [Кутовая и др., 2016](#)). Активность и численность анаэробных азотфиксаторов определяли на жидкой среде Виноградского по интенсивности газообразования.

Выявлена более высокая активность свободноживущих азотфиксаторов в образцах при вспашке – газообразование наблюдалось на 5-е сутки инкубации, однако их численность, рассчитанная по таблицам Мак-Креди ([Егоров, 1976](#)), не различается для образцов под разными обработками.

Денитрификация является многостадийным процессом восстановления нитратов до промежуточных продуктов (оксидов азота) или до молекулярного азота. В агроценозах этот процесс приводит к уменьшению количества нитратных форм азота в почве, в том числе вносимых в виде удобрений. Эмиссия закиси азота увеличивается пропорционально дозе применяемых азотных удобрений и при разрушении почвенной структуры ([Степанов, 2011](#); [Добровольская и др., 2015](#)).



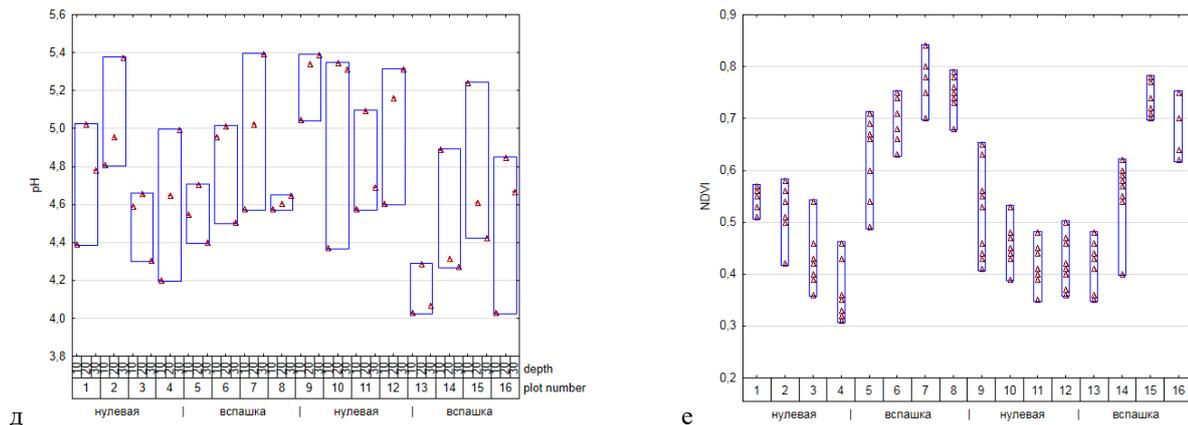


Рис. 2. Внутрипольное варьирование и размах индивидуальных значений влажности (а), водоудерживающей способности (б), процентного содержания углерода (в), азота (г) и pH почвы (д) с трех глубин отбора образцов и варьирование вегетационного индекса NDVI посева (е) в разных точках на поле.

Fig. 2. Intrafield variation and range of individual values of moisture (a), water holding capacity (b), carbon content percentage (c), nitrogen (d) and soil pH (e) from three sampling depths and variation of the stands NDVI (f) in different field locations.

Таблица 3. Результаты сравнения выборок (n = 8), сгруппированных по способу сельскохозяйственной обработки (t-test by group treatment)

Table 3. Results of samples comparison (n = 8) grouped according to the method of agricultural treatment (t-test by group treatment)

Среда	Экологическая группа микроорганизмов	Mean нулевая	Mean вспашка	Std.Dev. нулевая	Std.Dev. вспашка	t-value	p
МПА	аммонификаторы, гетеротрофы	1.98E + 07	1.91E + 07	2.07E + 07	2.87E + 07	0.057	0.955
ГА	бактерии-олиготрофы	1.54E + 07	1.98E + 07	9.41E + 06	1.29E + 07	-0.786	0.445
ГА	актиномицеты-олиготрофы	4.41E + 06	4.09E + 06	3.17E + 06	2.11E + 06	0.233	0.819
Чапек	микробицеты	1.03E + 06	6.69E + 05	2.69E + 05	2.14E + 05	2.981	0.010
Эшби	аэробные азотфиксаторы	67 %	71 %	23 %	20 %	-0.377	0.712
Гетчинсон	целлюлозолитики	5.11E + 05	4.78E + 05	1.84E + 05	1.92E + 05	0.360	0.725
Гетчинсон	индекс Шеннона – разнообразие микробицетов	1.308	1.362	0.291	0.252	-0.399	0.696
ГНД – изменение цвета	денитрификаторы (восстановление NO ₃ ⁻)	6.26E + 05	7.31E + 02	1.77E + 06	1.11E + 03	1.000	0.334
ГНД – накопление биомассы	денитрификаторы	9.34E + 03	2.76E + 04	8.97E + 03	4.29E + 04	-1.178	0.259
ГНД – газообразование	денитрификаторы (образование оксидов азота)	3.21E + 09	3.45E + 08	8.82E + 09	7.78E + 08	0.914	0.376
Виноградского – газообразование	анаэробные азотфиксаторы	6.63E + 05	7.26E + 05	1.14E + 06	1.11E + 06	-0.113	0.912

Примечание. Значимые различия (p < 0.05) между средними значениями выделены жирным шрифтом. Количество микроорганизмов указано в КОЕ/г почвы.

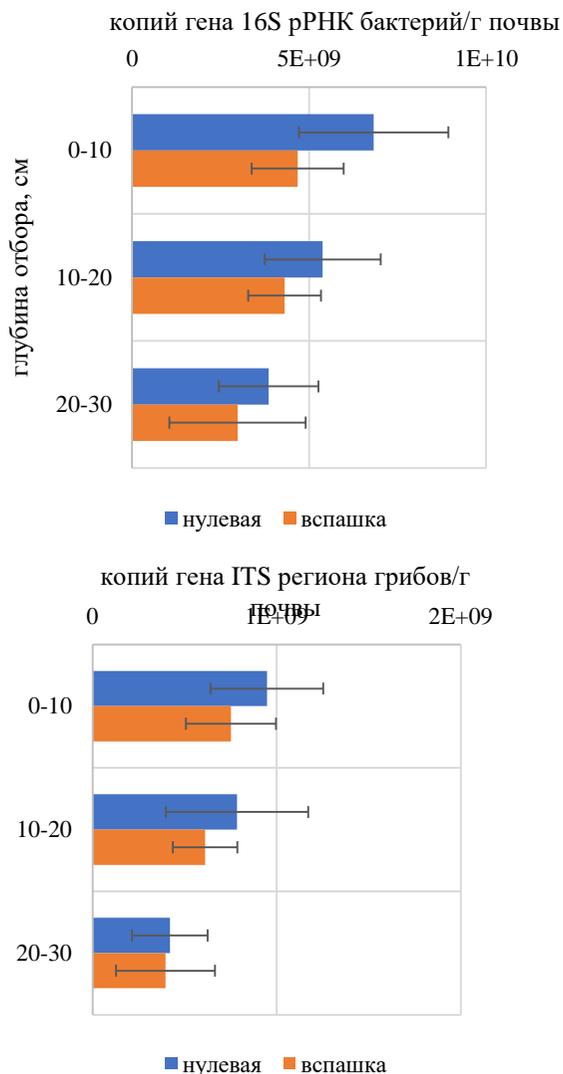


Рис. 3. Изменение обилия бактерий (по количеству копий гена 16S рНК) и грибов (по количеству копий гена ITS) с глубиной в условиях нулевой обработки и вспашки.

Fig. 3. Change of bacterial and fungal ribosomal gene abundances with depth under no-till and conventional tillage.

Денитрифицирующую активность почвенной микробиоты детектировали на среде ГНД по трем признакам – изменение цвета (1-я стадия процесса), помутнение среды (накопление биомассы денитрификаторов) и газообразование (последние стадии). В некоторых образцах (точки пробоотбора 3, 4, 6, 14, 16) выявлена более высокая численность микроорганизмов-денитрификаторов по сравнению с другими образцами. Это может быть следствием почвенной неоднородности, в частности, в значениях pH, к которому весьма чувствительна эта эколого-трофическая группа. Активность денитрификаторов повышена в кислых почвах ([Bobbink et al., 2010](#)). Более активное газообразование было выявлено в образцах почвы под вспашкой. Изменение цвета среды (восстановление нитрата до нитрита) наблюдалось в нескольких образцах почв под нулевой обработкой. Не было выявлено статистически значимого влияния способа сельскохозяйственной обработки почвы на показатели денитрифицирующей активности ввиду их высокого варьирования.

Экологическая группа олиготрофов была в основном представлена бактериями ($4.9 \times 10^6 - 4.2 \times 10^7$ КОЕ/г почвы), численность актиномицетов была ниже ($3.8 \times 10^5 - 9.7 \times 10^6$ КОЕ/г почвы). Количество олиготрофных и гетеротрофных бактерий было сопоставимо. Способ обработки почвы не оказывал значимого влияния на численность олиготрофных бактерий (табл. 3). Олиготрофные микроорганизмы развиваются на финальных стадиях сукцессии разложения органического вещества, их численность может быть использована как индикатор степени нарушенности почв: согласно ранее проведенным исследованиям на разных типах почв, при интенсивных системах земледелия численность олиготрофов ниже, чем при биологических системах земледелия ([Diepeningen Van et al., 2006](#); [Семенов и др., 2013](#)).

Численность и таксономический состав микромицетов определяли на средах Чапека и Гетчинсона. В образцах под традиционной обработкой было значимо снижено количество микроскопических грибов по сравнению с образцами под нулевой обработкой (табл. 3). Это согласуется с литературными данными об увеличении численности микромицетов при снижении интенсивности сельскохозяйственных воздействий ([Hydbom et al., 2017](#);

[Кутовая и др., 2018](#); [Schmidt et al., 2019](#)). Более высокая численность микромицетов при нулевой обработке может быть обусловлена следующими факторами: сохранение ненарушенной почвенной структуры и обилие растительных остатков в напочвенном слое и в верхнем горизонте почвы ([Hydbom et al., 2017](#)). При увеличении количества и интенсивности обработок нарушается сложение почвы, что может приводить к механическому разрыву, а также к снижению жизнеспособности грибных гиф. Растительные остатки используются многими микромицетами в качестве питательного субстрата.

Способ обработки почвы не влиял на индекс Шеннона, характеризующий биоразнообразие микромицетов (табл. 3). Не было выявлено значимого влияния способа обработки на численность грибов-целлюлозолитиков ($2.5 - 8.7 \times 10^5$ КОЕ/г почвы). Отмечено, что численность микроскопических грибов, в целом, несколько выше для большинства образцов на среде Чапека, чем на среде Гетчинсона (исключение – точки пробоотбора 13 и 14). Это свидетельствует о высокой доле целлюлозолитиков, активно разрушающих растительные остатки, вне зависимости от способа обработки почвы. Анаэробное разложение целлюлозы, определяемое на жидкой среде Гетчинсона, наблюдалось только в 5 образцах в 1–2-м разведении, что свидетельствует о низкой гидролитической активности микробных сообществ исследуемых почв.

Из исследованных почв выделено 18 видов микромицетов на среде Чапека и 15 видов – на среде Гетчинсона, которые относятся к 23 родам из 2 отделов (табл. 3). Количество выделенных видов микроскопических грибов в исследуемых образцах почвы колебалось от 7 до 13 на образец. Отдел Mucoromycota представлен родами *Mortierella*, *Mucor*, *Rhizopus*, *Zygorrhynchus*. Отдел Ascomycota – 1 телеоморфным (*Talaromyces*) и 13 анаморфными родами. Также было выделено 3 типа изолятов, представленных стерильными пигментированными или гиалиновыми мицелиями неопределенного систематического положения ввиду их сложного культивирования. Наибольшим видовым разнообразием характеризовались роды: *Penicillium* (6 видов), *Acremonium* (3 вида) и *Fusarium* (3 вида). Они являются типичными представителями сапротрофного блока почвенной микобиоты в умеренном климате

([Мирчинк, 1988](#); [Domsch et al., 2007](#)). В то же время некоторые представители *Penicillium* – активные целлюлозолитики, а представители рода *Fusarium* – фитопатогены ([Ellis, 1971](#); [Domsch et al., 2007](#)). Максимальная встречаемость (в посевах хотя бы на одной из использованных сред) выявлена у таксонов: *Penicillium* spp.; *Acremonium* spp.; *Clonostachys rosea*, *Fusarium* spp., *Mucor hiemalis* и у стерильного гиалинового мицелия.

В исследованных почвах по обилию, численности и таксономическому разнообразию преобладают олиготрофные/сапротрофные (виды родов *Mortierella*, *Paecilomyces*, *Penicillium*, *Talaromyces*) микромицеты – до 1.2×10^5 КОЕ/г почвы. Значительно меньше по обилию целлюлозолитических (виды родов *Clonostachys*, *Humicola*, *Mucor*, *Monilia*, *Rhizopus*, *Trichoderma*, *Zygorrhynchus*) и фитопатогенных микроскопических грибов (виды родов *Acremonium*, *Cladosporium*, *Fusarium*, *Verticillium*, *Ulocladium*). Относительно высокая численность (до 1.2×10^4 КОЕ/г почвы) целлюлозолитиков выявлена в образцах 3 и 4 (преобладали представители рода *Rhizopus*) и, преимущественно, на среде Гетчинсона. Значительная численность (до 1.3×10^4 КОЕ/г почвы) фитопатогенных микромицетов выявлена только в образцах 1, 2 (преобладали представители рода *Cladosporium*). В исследовании отмечен лишь 1 энтомопатогенный род микромицета – *Metarhizium*. Эпифитная/эндофитная экологическая группа представлена единичными колониями *Aurebasidium pullulans* и *Epicoccum nigrum*, маловажными для сельскохозяйственных растений данных полей ввиду малой численности микобионтов.

По таксономическому составу микромицетов почвы под вспашкой и нулевой обработкой незначительно различались. *Humicola fuscoatra*, *Metarhizium* spp., *Pochonia* spp. были выявлены в единичных образцах почвы под вспашкой. *Aurebasidium pullulans*, *Cladosporium herbarum*, *Rhizopus stolonifer*, *Geotrichum* spp., *Zygorrhynchus moelleri*, *Doratomyces microsporus* – выявлены только в единичных образцах почвы под нулевой обработкой.

С помощью корреляционного анализа была оценена взаимозависимость изученных показателей. Не было выявлено корреляций, значимых при $p < 0.05$ между показателями численности

микроорганизмов и физическими и химическими характеристиками почвы, кроме корреляции процентного содержания азота с интенсивностью обесцвечивания среды ГНД и численностью микромицетов. Выявленные корреляции могут быть обусловлены влиянием способа обработки почв.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При нулевой обработке наблюдалась более высокая влажность пахотного слоя почвы и большее процентное содержание азота, чем при традиционной обработке. Выявлена высокая неоднородность почвы исследуемого поля по рН и процентному содержанию С и N. Численность микромицетов, в особенности целлюлозолитических и фитопатогенных, была выше при нулевой обработке. Способ сельскохозяйственной обработки почвы не оказал значимого влияния на профилное распределение бактерий и грибов и на численность других исследованных экологических групп микроорганизмов. Таким образом, микробиологические характеристики дерново-подзолистой почвы под посевом викоовсяной смеси при применении нулевой обработки и вспашки почвы отличались незначительно.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

20. Вадюнина А.Ф., Корчагина З.А. Методы исследования физических свойств почв. М.: Агропромиздат, 1996. 415 с.
21. Василенко Е.С., Кутовая О.В., Тхакахова А.К., Мартынов А.С. Изменение численности микроорганизмов в зависимости от величины агрегатов гумусового горизонта миграционно-мицелярного чернозема // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2014. Вып. 73. С. 85–97. DOI: [10.19047/0136-1694-2014-73-150-173](https://doi.org/10.19047/0136-1694-2014-73-150-173).
22. 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. Т. 2015. № 9. С. 1087–1096. DOI: [10.7868/S0032180X15090038](https://doi.org/10.7868/S0032180X15090038).
23. Егоров Н.С. Практикум по микробиологии. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1976. 307 с.
24. Железова А.Д., Тхакахова А.К., Ярославцева Н.В., Гарбуз С.А., Лазарев В.И., Козут Б.М., Кутовая О.В., Холодов В.А.

Микробиологические показатели агрегатов типичных черноземов в многолетних полевых опытах // Почвоведение. 2017. № 6. С. 711–717. DOI: [10.7868/S0032180X17060120](https://doi.org/10.7868/S0032180X17060120).

25. 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 имени К.А. Тимирязева) // Агрехимия. 2017. № 4. С. 65–75.

26. Кирюшин В.И. Наследие В.Р. Вильямса и современные проблемы агропочвоведения // Известия ТСХА. 2014. № 1. С. 5–15.

27. Кутювая О.В., Тхакахова А.К., Чевердин Ю.И. Влияние поверхностного переувлажнения на биологические свойства лугово-черноземных почв Каменной Степи // Бюллетень Почвенного института имени 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).

28. Кутювая 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. Вып. 92. С. 35–61. DOI: [10.19047/0136-1694-2018-92-35-61](https://doi.org/10.19047/0136-1694-2018-92-35-61).

29. Мельников А.В., Железова С.В. Традиционная вспашка или нулевая технология – что выгоднее для производства озимой пшеницы в нечерноземной зоне России? // Теоретические и прикладные проблемы АПК. 2019. Т. 39. № 1. С. 35–40. DOI: [10.32935/2221-7312-2019-39-1](https://doi.org/10.32935/2221-7312-2019-39-1).

30. Мирчинк Т.Г. Почвенная микология. М.: Изд-во Московского университета, 1988. 220 с.

31. Орлова Л.В., Чернов Н.Д. Научно-практическое руководство по освоению и применению сберегающего земледелия. Рекомендации. М.: Евротехника, 2006. 183 с.

32. Патыка Н.В., Круглов Ю.В., Тихонович И.А., Патыка В.Ф. Профиль полиморфизма длин рестрикционных фрагментов (trFLP) комплекса прокариотных микроорганизмов подзолистых почв // Доповіді Національної академії наук України. 2009. Т. 1. С. 187–192.

33. Поддымкина Л.М. Влияние длительного применения средств химизации на микробиологическую активность дерново-подзолистой почвы // Известия ТСХА. 2008. № 2. С. 5–17.

34. Семенов А.М., Бубнов И.А., Семенов В.М., Семенова Е.В., Зеленев В.В., Семенова Н.А. Ежедневная динамика численности бактерий и эмиссии CO² почвы и связь их волнообразных колебаний с сукцессией

микробного сообщества // Почвоведение. 2013. Т. 2013. № 8. С. 963–979.
DOI: [10.7868/S0032180X13080078](https://doi.org/10.7868/S0032180X13080078).

35. Степанов А.Л. Микробная трансформация парниковых газов в почвах. М.: ГЕОС, 2011. 192 с.

36. Теплер Е.З., Шильникова В.К., Переверзева Г.И. Практикум по микробиологии. М.: Дрофа, 2005. 256 с.

37. Хитров Н.Б. Почвы длительного полевого опыта ТСХА // Известия ТСХА. 2012. № 3. С. 62–78.

38. Agtmaal van M., Straathof A.L., Termorshuizen A., Lievens B., Hoffland E., de Boer W. Volatile-mediated suppression of plant pathogens is related to soil properties and microbial community composition // Soil Biol. Biochem. 2018. Vol. 117. P. 164–174. DOI: [10.1016/j.soilbio.2017.11.015](https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2017.11.015).

39. Babin D., Deubel A., Jacquiod S., Sørensen S.J., Geistlinger J., Grosch R., Smalla K. Impact of long-term agricultural management practices on soil prokaryotic communities // Soil Biol. Biochem. 2018. Vol. 129. P. 17–28. DOI: [10.1016/j.soilbio.2018.11.002](https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2018.11.002).

40. Bissett A., Richardson A.E., Baker G., Thrall P.H. Long-term land use effects on soil microbial community structure and function // Appl. Soil Ecol. 2011. Vol. 51. P. 66–78. DOI: [10.1016/j.apsoil.2011.08.010](https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2011.08.010).

41. Blanco-Canqui H, Lal R. No-Tillage and Soil-Profile Carbon Sequestration: An On-Farm Assessment // Soil Sci Soc Am J. 2008. Vol. 72. P. 693-701. DOI: [10.2136/sssaj2007.0233](https://doi.org/10.2136/sssaj2007.0233).

42. Bobbink R., Hicks K., Galloway J., Spranger T., Alkemade R., Ashmore M., Bustamante M., Cinderby S., Davidson E., Dentener F., Emmett B., Erisman J.W., Fenn M., Gilliam F., Nordin A., Pardo L., De Vries W. Global assessment of nitrogen deposition effects on terrestrial plant diversity: A synthesis // Ecol. Appl. 2010. Vol. 20. P. 30–59. DOI: [10.1890/08-1140.1](https://doi.org/10.1890/08-1140.1).

43. Capelle C. van, Schrader S., Brunotte J. Tillage-induced changes in the functional diversity of soil biota – A review with a focus on German data // Eur. J. Soil Biol. 2012. Vol. 50. P. 165–181. DOI: [10.1016/j.soilbio.2017.11.015](https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2017.11.015).

44. Diepeningen A.D. Van, De Vos O.J., Korthals G.W., Van Bruggen A.H.C. Effects of organic versus conventional management on chemical and biological parameters in agricultural soils // Appl. Soil Ecol. 2006. Vol. 31. P. 120–135. DOI: [10.1016/j.apsoil.2005.03.003](https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2005.03.003).

45. Domsch K.H., Gams W., Anderson T.-H. Compendium of Soil Fungi. Eching: IHW-Verlag, 2007. 672 p. DOI: [10.1111/j.1365-2389.2008.01052.1.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.2008.01052.1.x).

46. Ellis M.B. Dematiaceous Hyphomycetes // Mycological Papers. 1971. Vol. 125. P. 1–30.

47. *Gras C., Hernández V.* Hegemony, Technological Innovation and Corporate Identities: 50 Years of Agricultural Revolutions in Argentina // Journal of agrarian change. 2016. Vol. 16. P. 675–683. DOI: [10.1111/joac.12162](https://doi.org/10.1111/joac.12162).
48. *Hydbom S., Ernfors M., Birgander J., Hollander J., Jensen E.S., Olsson P.A.* Reduced tillage stimulated symbiotic fungi and microbial saprotrophs, but did not lead to a shift in the saprotrophic microorganism community structure // Appl. Soil Ecol. 2017. Vol. 119. P. 104–114. DOI: [10.1016/j.apsoil.2017.05.032](https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2017.05.032).
49. *Kaurin A., Mihelič R., Kastelec D., Grčman H., Bru D., Philippot L., Suhadolc M.* Resilience of bacteria, archaea, fungi and N-cycling microbial guilds under plough and conservation tillage, to agricultural drought // Soil Biol. Biochem. 2018. Vol. 120. P. 233–245. DOI: [0.1016/j.soilbio.2018.02.007](https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2018.02.007).
50. *Martínez I., Chervet A., Weisskopf P., Sturny W.G., Etana A., Stettler M., Forkman J., Keller T.* Two decades of no-till in the Oberacker long-term field experiment: Part I. Crop yield, soil organic carbon and nutrient distribution in the soil profile // Soil Tillage Res. 2016. Vol. 163. P. 141–151. DOI: [10.1016/j.still.2016.05.021](https://doi.org/10.1016/j.still.2016.05.021).
51. *Mishra U., Ussiri D.A.N., Lal R.* Tillage effects on soil organic carbon storage and dynamics in Corn Belt of Ohio USA // Soil Tillage Res. 2010. Vol. 107. P. 88–96. DOI: [10.1016/j.still.2010.02.005](https://doi.org/10.1016/j.still.2010.02.005).
52. *Rahman M., Okubo A., Sugiyama S., Mayland H.* Physical, chemical and microbiological properties of an Andisol as related to land use and tillage practice // Soil Tillage Res, 2008. Vol. 101. P. 10–19. DOI: [10.1016/j.still.2008.05.006](https://doi.org/10.1016/j.still.2008.05.006).
53. *Rainbow R., Derpsch R.* Advances in no-till farming technologies and soil compaction management in rainfed farming systems // Rainfed farming systems. 2011. P. 991–1014.
54. *Schmidt R., Mitchell J., Scow K.* Cover cropping and no-till increase diversity and symbiotroph:saprotroph ratios of soil fungal communities // Soil Biol. Biochem. 2019. Vol. 129. P. 99–109. DOI: [10.1016/j.soilbio.2018.11.010](https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2018.11.010).
55. *Semenov M. V., Chernov T.I., Tkhakakhova A.K., Zhelezova A.D., Ivanova E.A., Kolganova T.V., Kutovaya O.V.* Distribution of prokaryotic communities throughout the Chernozem profiles under different land uses for over a century // Appl. Soil Ecol. 2018. Vol. 127. P. 8–18. DOI: [10.1016/j.apsoil.2018.03.002](https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2018.03.002).
56. *Simmons B.L., Coleman D.C.* Microbial community response to transition from conventional to conservation tillage in cotton fields // Appl. Soil Ecol. 2008. Vol. 40. P. 518–528. DOI: [10.1016/j.apsoil.2008.08.003](https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2008.08.003).

57. Souza R.C., Hungria M., Cantão M.E., Vasconcelos A.T.R., Nogueira M.A., Vicente V.A. Metagenomic analysis reveals microbial functional redundancies and specificities in a soil under different tillage and crop-management regimes // *Appl. Soil Ecol.* 2015. Vol. 86. P. 106–112. DOI: [10.1016/j.apsoil.2014.10.010](https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2014.10.010).
58. Upchurch R., Chiu C.Y., Everett K., Dyszynski G., Coleman D.C., Whitman W.B. Differences in the composition and diversity of bacterial communities from agricultural and forest soils // *Soil Biol. Biochem.* 2008. Vol. 40. P. 1294–1305. DOI: [10.1016/j.soilbio.2007.06.027](https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2007.06.027).
59. Widmer F., Rasche F., Hartmann M., Fliessbach A. Community structures and substrate utilization of bacteria in soils from organic and conventional farming systems of the DOK long-term field experiment // *Appl. Soil Ecol.* 2006. Vol. 33. P. 294–307. DOI: [10.1016/j.apsoil.2005.09.007](https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2005.09.007).

REFERENCES

1. Vadyunina A.F., Korchagina Z.A., *Metody issledovaniya fizicheskikh svoystv pochv* (Methods of studying of physical soil properties), Moscow: Agropromizdat, 1996, 415 p.
2. Vasilenko Y.S., Kutovaya O.V., Tkhakakhova A.K., Martynov A.S., Changes in the intensity of soil-biological processes caused by different-sized aggregates of migratory-mycelial chernozems, *Dokuchaev Soil Bulletin*, 2014, Vol. 73, pp.85–97, DOI: [10.19047/0136-1694-2014-73-150-173](https://doi.org/10.19047/0136-1694-2014-73-150-173).
3. 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., The role of microorganisms in the ecological functions of soils, *Eurasian Soil Science*, 2015, Vol. 48, No. 9, pp. 959–967. DOI: [10.7868/S0032180X15090038](https://doi.org/10.7868/S0032180X15090038).
4. Egorov N.S., *Praktikum po mikrobiologii* (Laboratory manual for microbiology studies), Moscow: Izdatelstvo Moskovskogo universitetata, 1976, 307 p.
5. Zhelezova A.D., Tkhakakhova A.K., Yaroslavtseva N. V., Garbuz S.A., Lazarev V.I., Kogut B.M., Kutovaya O. V., Kholodov V.A., Microbiological parameters of aggregates in typical chernozems of long-term field experiments, *Eurasian Soil Science*, 2017, No. 50, pp. 701–707, DOI: [10.7868/S0032180X15090038](https://doi.org/10.7868/S0032180X15090038).
6. Zhelezova S.V., Akimov T.A., Beloshapkina O.O., Berezovsky E.V., Vliyanie raznykh tekhnologii vozdeystviya ozimoi pshenitsy na urozhainost' i fitosanitarnoe sostoyanie posevov (na primere polevogo opyta Tsentra tochnogo zemledeliya RGAU-MSKhA im. K.A. Timiryazeva) (The productivity and phytosanitary status of winter wheat crops under different

cultivation technologies (in the field experiment at Precision Agriculture Centre), *Agrokhimiya*, 2017, No. 4, pp. 65–75.

7. Kiryushin V.I., Nasledie V.R. Vil'yamsa i sovremennye problemy agropochvovedeniya (The heritage of V.R. Williams and modern problems of agricultural soil science), *Izvestiya TSKhA*, 2014, No. 1, pp. 5–15.

8. Kutovaya O.V., Tkhakakhova A.K., Cheverdin Yu.I., Effects of surface flooding on biological properties of meadow-chernozems in 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. Kutovaya O.V., Grebennikov A.M., Tkhakakhova A.K., Isaev V.A., Garmashov V.M., Bepalov V.A., Cheverdin Yu.I., Belobrov V.P., The changes in soil-biological processes and structure of microbial community of agrochernozems in conditions of different ways of soil cultivation, *Dokuchaev Soil Bulletin*, 2018, No. 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. Mel'nikov A.V., Zhelezova S.V., *Traditsionnaya vspashka ili nulevaya tekhnologiya – chto vygodnee dlya proizvodstva ozimoi pshenitsy v nechernozemnoi zone Rossii?* (Conventional tillage or no-till – what is more beneficial for winter wheat production in nonchernozem belt of Russia?), *Teoreticheskie i prikladnye problemy APK*, 2019, Vol. 39, No. 1, pp. 35–40, DOI: [10.32935/2221-7312-2019-39-1](https://doi.org/10.32935/2221-7312-2019-39-1).

11. Mirchink T.G., *Pochvennaya mikologiya* (Soil mycology), Moscow: Izdatelstvo Moskovskogo universitetata, 1988, 220 p.

12. Orlova L.V., Chernov N.D., *Nauchno-prakticheskoe rukovodstvo po osvoeniyu i primeniyu sberegayushchego zemledeliya. Rekomendatsii.* (Recommendations for the research and practice of conservative agriculture), Moscow: Evrotekhnik, 2006, 183 p.

13. Patyka N.V., Kruglov Yu.V., Tikhonovich I.A., Patyka V.F., Profil' polimorfizma dlin restriksionnykh fragmentov (tRFLP) kompleksa prokariotnykh mikroorganizmov podzolistykh pochv (tRFLP of microbial complex of sod-podzolic soils), *Dopovidi Natsional'noi akademii nauk Ukraini*, 2009, Vol. 1, pp. 187–192.

14. Poddymkina L.M., Vliyanie dlitel'nogo primeneniya sredstv khimizatsii na mikrobiologicheskuyu aktivnost' dernovo-podzolistoi pochvy (The influence of long-term application of agricultural chemicals on the microbiological activities of sod-podzolic soils), *Izvestiya TSKhA*, 2008, No. 2, pp. 5–17.

15. Semenov A.M., Bubnov I.A., Semenov V.M., Semenova E.V., Zelenev V.V., Semenova N.A., Daily dynamics of bacterial numbers, CO₂ emissions from soil and relationships between their wavelike fluctuations and succession of the microbial community, *Eurasian Soil Science*, 2013, Vol. 2013, No. 8, pp. 963–979, DOI: [10.7868/S0032180X13080078](https://doi.org/10.7868/S0032180X13080078).

16. Stepanov A.L., *Mikrobnaya transformatsiya parnikovyykh gazov v pochvakh* (Microbial transformation of greenhouse gases in soils), Moscow: GEOS, 2011, 192 p.
17. Tepper E.Z., Shil'nikova V.K., Pereverzeva G.I., *Praktikum po mikrobiologii* (Laboratory manual for microbiology studies), Moscow: Drofa, 2005, 256 p.
18. Khitrov N.B., *Pochvy dlitel'nogo polevogo opyta TSKhA* (Soils of long-term field experiment of RSAU – Moscow Timiryazev Agricultural Academy), *Izvestiya TSKhA*, 2012, No. 3, pp. 62–78.
19. Agtmaal van M., Straathof A.L., Termorshuizen A., Lievens B., Hoffland E., de Boer W., Volatile-mediated suppression of plant pathogens is related to soil properties and microbial community composition, *Soil Biol. Biochem.*, 2018, Vol. 117, pp. 164–174, DOI: [10.1016/j.soilbio.2017.11.015](https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2017.11.015).
20. Babin D., Deubel A., Jacquiod S., Sørensen S.J., Geistlinger J., Grosch R., Smalla K., Impact of long-term agricultural management practices on soil prokaryotic communities, *Soil Biol. Biochem.*, 2018, Vol. 129, pp. 17–28, DOI: [10.1016/j.soilbio.2018.11.002](https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2018.11.002).
21. Bissett A., Richardson A.E., Baker G., Thrall P.H., Long-term land use effects on soil microbial community structure and function, *Appl. Soil Ecol.*, 2011, Vol. 51, pp. 66–78, DOI: [10.1016/j.apsoil.2011.08.010](https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2011.08.010).
22. Blanco-Canqui H, Lal R. No-Tillage and Soil-Profile Carbon Sequestration: An On-Farm Assessment // *Soil Sci Soc Am J.* 2008. Vol. 72. P. 693–701, DOI: [10.2136/sssaj2007.0233](https://doi.org/10.2136/sssaj2007.0233).
23. Bobbink R., Hicks K., Galloway J., Spranger T., Alkemade R., Ashmore M., Bustamante M., Cinderby S., Davidson E., Dentener F., Emmett B., Erismann J.W., Fenn M., Gilliam F., Nordin A., Pardo L., De Vries W., Global assessment of nitrogen deposition effects on terrestrial plant diversity: A synthesis, *Ecol. Appl.*, 2010, Vol. 20, pp. 30–59, DOI: [10.1890/08-1140.1](https://doi.org/10.1890/08-1140.1).
24. Capelle C. van, Schrader S., Brunotte J., Tillage-induced changes in the functional diversity of soil biota – A review with a focus on German data, *Eur. J. Soil Biol.*, 2012, Vol. 50, pp. 165–181, DOI: [10.1016/j.soilbio.2017.11.015](https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2017.11.015).
25. Diepeningen A.D. Van, De Vos O.J., Korthals G.W., Van Bruggen A.H.C., Effects of organic versus conventional management on chemical and biological parameters in agricultural soils, *Appl. Soil Ecol.*, 2006, Vol. 31, pp. 120–135, DOI: [10.1016/j.apsoil.2005.03.003](https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2005.03.003).
26. Domsch K.H., Gams W., Anderson T.-H., *Compendium of Soil Fungi*, Eching: IHW-Verlag, 2007. 672 p., DOI: [10.1111/j.1365-2389.2008.01052.1.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.2008.01052.1.x).
27. Ellis M.B., *Dematiaceous Hyphomycetes*, *Mycological Papers*, 1971, Vol. 125, pp. 1–30.

28. Gras C., Hernández V. Hegemony, Technological Innovation and Corporate Identities: 50 Years of Agricultural Revolutions in Argentina, *Journal of agrarian change*, 2016, Vol. 16, pp. 675–683, DOI: [10.1111/joac.12162](https://doi.org/10.1111/joac.12162)
29. Hydbom S., Ernfors M., Birgander J., Hollander J., Jensen E.S., Olsson P.A., Reduced tillage stimulated symbiotic fungi and microbial saprotrophs, but did not lead to a shift in the saprotrophic microorganism community structure, *Appl. Soil Ecol.*, 2017, Vol. 119, pp. 104–114, DOI: [10.1016/j.apsoil.2017.05.032](https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2017.05.032).
30. Kaurin A., Mihelič R., Kastelec D., Grčman H., Bru D., Philippot L., Suhadolc M., Resilience of bacteria, archaea, fungi and N-cycling microbial guilds under plough and conservation tillage, to agricultural drought, *Soil Biol. Biochem.*, 2018, Vol. 120, pp. 233–245, DOI: [0.1016/j.soilbio.2018.02.007](https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2018.02.007).
31. Martínez I., Chervet A., Weisskopf P., Sturny W.G., Etana A., Stettler M., Forkman J., Keller T., Two decades of no-till in the Oberacker long-term field experiment: Part I. Crop yield, soil organic carbon and nutrient distribution in the soil profile // *Soil Tillage Res.* 2016. Vol. 163. P. 141–151, DOI: [10.1016/j.still.2016.05.021](https://doi.org/10.1016/j.still.2016.05.021).
32. Mishra U., Ussiri D.A.N., Lal R., Tillage effects on soil organic carbon storage and dynamics in Corn Belt of Ohio USA, *Soil Tillage Res.*, 2010, Vol. 107, pp. 88–96, DOI: [10.1016/j.still.2010.02.005](https://doi.org/10.1016/j.still.2010.02.005).
33. Rahman M., Okubo A., Sugiyama S., Mayland H. Physical, chemical and microbiological properties of an Andisol as related to land use and tillage practice // *Soil Tillage Res.*, 2008. Vol. 101. P. 10–19, DOI: [10.1016/j.still.2008.05.006](https://doi.org/10.1016/j.still.2008.05.006).
34. Rainbow R., Derpsch R., Advances in no-till farming technologies and soil compaction management in rainfed farming systems, *Rainfed farming systems*, 2011, pp. 991–1014.
35. Schmidt R., Mitchell J., Scow K., Cover cropping and no-till increase diversity and symbiotroph: saprotroph ratios of soil fungal communities, *Soil Biol. Biochem.*, 2019, Vol. 129, pp. 99–109, DOI: [10.1016/j.soilbio.2018.11.010](https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2018.11.010).
36. Semenov M.V., Chernov T.I., Tkhakakhova A.K., Zhelezova A.D., Ivanova E.A., Kolganova T.V., Kutovaya O.V., Distribution of prokaryotic communities throughout the Chernozem profiles under different land uses for over a century, *Appl. Soil Ecol.*, 2018, Vol. 127, pp. 8–18, DOI: [10.1016/j.apsoil.2018.03.00](https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2018.03.00).
37. Simmons B.L., Coleman D.C., Microbial community response to transition from conventional to conservation tillage in cotton fields, *Appl. Soil Ecol.*, 2008, Vol. 40, pp. 518–528, DOI: [10.1016/j.apsoil.2008.08.003](https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2008.08.003).

38. Souza R.C., Hungria M., Cantão M.E., Vasconcelos A.T.R., Nogueira M.A., Vicente V.A., Metagenomic analysis reveals microbial functional redundancies and specificities in a soil under different tillage and crop-management regimes, *Appl. Soil Ecol.*, 2015, Vol. 86, pp. 106–112, DOI: [10.1016/j.apsoil.2014.10.010](https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2014.10.010).
39. Upchurch R., Chiu C.Y., Everett K., Dyszynski G., Coleman D.C., Whitman W.B., Differences in the composition and diversity of bacterial communities from agricultural and forest soils, *Soil Biol. Biochem.*, 2008, Vol. 40, pp. 1294–1305, DOI: [10.1016/j.soilbio.2007.06.027](https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2007.06.027).
40. Widmer F., Rasche F., Hartmann M., Fliessbach A., Community structures and substrate utilization of bacteria in soils from organic and conventional farming systems of the DOK long-term field experiment, *Appl. Soil Ecol.*, 2006, Vol. 33, pp. 294–307, DOI: [10.1016/j.apsoil.2005.09.007](https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2005.09.007).

УДК 631.861: 895

DOI: 10.19047/0136-1694-2019-99-145-170

Ссылки для цитирования:

Якума Е.Г., Кой К., Азовцева Н.А., Пивень Е.А., Шуравилин А.В. Состав, свойства и особенности плодородия красной ферраллитной почвы пятилетней залежи в Республике Чад // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2019. Вып. 99. С. 145-170. DOI: 10.19047/0136-1694-2019-99-145-170

Cite this article as:

Yakouma E.G., Koy K., Azovtseva N.A., Piven E.A., Shuravilin A.V., Evaluation of the composition, properties and fertility of Haplic Ferralsol on the fields abandoned for five years in the Republic of Chad, Dokuchaev Soil Bulletin, 2019, V. 99, pp. 145-170, DOI: 10.19047/0136-1694-2019-99-145-170

Состав, свойства и особенности плодородия красной ферраллитной почвы пятилетней залежи в Республике Чад

© 2019 г. Е. Г. Якума^{1*}, К. Кой¹, Н. А. Азовцева²,
Е. А. Пивень¹, А. В. Шуравилин¹,

¹Российский университет дружбы народов,
Россия, 117198, Москва, ул. Миклухо-Маклая, 6,
*e-mail: gahavakouma@gmail.com.

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

Поступила в редакцию 30.05.2019, после доработки 02.07.2019,
принята к публикации 21.11.2019

Резюме: Цель исследований состояла в изучении состава и свойств красной ферраллитной почвы пятилетней залежи в Республике Чад для определения возможности ее использования под культуру хлопчатника. Дана оценка морфологического строения почвы, изучены гранулометрический и валовой состав, емкость катионного обмена и содержание обменных катионов, агрохимические и агрофизические свойства по почвенным горизонтам. Красные ферраллитные почвы региона обладают большой мощностью почвенного профиля и постепенным переходом между генетическими горизонтами, а также имеют облегченный гранулометрический состав верхней части профиля. Основу валового химического состава красных ферраллитных почв

составляют SiO_2 , Fe_2O_3 и Al_2O_3 , которые по глубине почвенного профиля варьируют в пределах 61.83–82.73 %, 3.50–6.40 % и 11.46–29.25 % соответственно. Почвы характеризуются низкой емкостью катионного обмена (6.6–11.1 смоль (экв)/кг. Среди обменных катионов определяющим является кальций (Ca^{2+}). В верхних почвенных слоях содержание гумуса составляет 1.53–1.66 %. Почвы характеризуются кислой реакцией – от средне кислой в верхних горизонтах до очень сильно кислой в нижнем горизонте. Содержание подвижных соединений фосфора и калия в профиле составляет соответственно 0.76–1.09 мг/100 г и 0.05–1.48 мг/100 г. По своим агрофизическим свойствам почвы могут использоваться для возделывания хлопчатника. В верхнем слое (0–42 см) плотность почвы составляет 1.36–1.45 г/см³, общая пористость – 45.9–48.9 % и наименьшая влагоемкость – 22.4–25.7 %.

Ключевые слова: гранулометрический состав, валовой состав, емкость катионов обмена, гумус, кислотность, подвижный фосфор, подвижный калий, плотность сложения, пористость, наименьшая влагоемкость.

Evaluation of the composition, properties and fertility of Haplic Ferralsol on the fields abandoned for five years in the Republic of Chad

**E. G. Yakouma^{1*}, K. Koy¹, N. A. Azovtseva²,
E. A. Piven¹, A. V. Shuravilin¹**

¹*RUDN University,*

6 Miklukho-Maklaya Str., Moscow 117198, Russian Federation,

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

²*V.V. Dokuchaev Soil Science Institute,*

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

Received 30.05.2019, Revised 02.07.2019, Accepted 21.11.2019

Abstract: The article deals with the fertility of red ferralitic soils in the Republic of Chad. The studies were carried out in the period between 2016 and 2018 in the southern part of the province of Moundou on the red ferralitic soils (Haplic Ferralsol) of the Cotton-Chad farm, which cultivates cotton first of its formation. Haplic Ferralsols are characterized by significant reservoir thickness and are not rich in nutrients. The aim of our research was to study the composition and properties of the Haplic Ferralsols of the fields abandoned for five years for their use under cotton export culture. We have evaluated the morphological structure of the soil on neglected fields and its

description by genetic horizons, studied the particle size distribution of the soil profile, its gross composition, cation exchange capacity, the content of exchangeable cations, and also considered the agrochemical and agrophysical properties of soil horizons. It has been established that Haplic Ferralsols have their own characteristics: red color, thick soil profile and a gradual transition between genetic horizons, and lightweight granulometric composition in the upper part of the profile. The basis of the gross chemical composition of Haplic Ferralsols is SiO_2 , Fe_2O_3 and Al_2O_3 , the content of which varies depending on the depth of the soil profile within the ranges of 61.83–82.73 %, 3.50–6.40 % and 11.46–29.25 % correspondingly. Haplic Ferralsols are characterized by a high cation exchange capacity (6.6–11.1 cmol (eq)/kg). Among the exchangeable cations, calcium (Ca^{2+}) is the most essential. Haplic Ferralsols are moderately provided with humus. In the upper soil layers (up to 42 cm), its content varied within 1.53–1.66 %. Soils are characterized by acidic reactions – from moderately acidic in the upper horizons to very strongly acidic in the lower horizon. The content of mobile compounds of phosphorus and potassium in the profile is low and very low, respectively, 0.76–1.09 mg/100 g and 0.05–1.48 mg/100 g. According to its agrophysical properties, the soil may be used for cotton growing. In the upper soil layer (0–42 cm) the bulk density is 1.36–1.45 g/cm³, the total porosity is 45.9–48.9 % and the field water-holding capacity is 22.4–25.7 %.

Keywords: grain-size distribution, gross composition, capacity of exchange cations, humus, acidity, labile phosphorus, labile potassium, bulk density, porosity, field moisture capacity.

ВВЕДЕНИЕ

Красные ферралитные почвы широко распространены в тропических странах Мира ([Сагоян, 1993](#); [Турсина, Соколов, 2008](#); [Хисен, Чернов, 2009](#); [Allan, 1965](#); [Aubert, Segalen, 1986](#); [Bekayo, 1998](#); [Conklin, 1957](#); [Fosbrooke, 1974](#); [Maignien, 1959](#); [Mohr, van Varen, 1954](#); [Nye, Greenland, 1964](#)). Их свойства достаточно хорошо изучены ([Розов, 1979](#); [Соколов, 1988](#); [Чернов и др., 2009](#)). Тропический пояс занимает площадь 1.7 млрд га, что составляет около 37 % площади суши. Ферралитные почвы тропиков формируются в Африке (от сахельского и суданского до экваториального гумидного пояса). Красные ферралитные почвы широко используются в сельском хозяйстве Республики Чад. Площадь сельскохозяйственных угодий составляет 49.9 млн га (2014 г.), из них на долю пастбищ приходится 90.1 %, пашни – 9.8 %, многолетних

насаждений – 0.1 %. Главные сельскохозяйственные культуры: хлопчатник (валовой сбор хлопка-сырца в 2014 г. составил 108 тыс. т, в т. ч. семян – 80 тыс. т, выращивают его главным образом в южных районах). Однако, несмотря на большую важность, для сельского хозяйства свойства этих почв до сих пор изучены недостаточно ([Tursina et al., 1992](#)). Правильное и рациональное использование данных почв возможно лишь на основе детального изучения физико-химических и агрохимических особенностей и их изменения при сельскохозяйственном использовании. В сельском хозяйстве Чада почвы часто специально переводят в залежь для восстановления их плодородия ([Maignien, 1959](#); [McGrath, 1987](#); [Mohr, van Varen, 1954](#); [Nye, Greenland, 1960](#)). После залежи их опять вводят в оборот под культуры, которые на момент ввода считаются наиболее экономически значимыми. Одной из таких культур в настоящее время является хлопчатник ([Сагоян, 1993](#)). Цель настоящей статьи состоит в исследовании свойств красной ферраллитной почвы пятилетней залежи в Республике Чад для оценки возможности ее использования при выращивании хлопчатника.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Объектами исследований послужили красные ферраллитные почвы. Образцы почв были отобраны в 2016 г. в районе города Мунду (8°44'02.3" N; 17°21'28.4" E) – регион Бекамба республики Чад (Центральная Африка) (рис. 1, 2).

Красные ферраллитные почвы в литературе *Ferralsols* описаны как *Sols ferrallitiques rouges* (Франция), *Oxisols* (США), *Latossolos* (Бразилия); *Alítico, Ferrítico u Ferralítico* (Куба) (WRB, 2015). Поскольку в Чаде не применяется World reference base for soil resources, в работе используется исключительно французская классификация почв ([Référentiel pédologique, 2008](#)) в прямом переводе на русский язык ([Почвенный справочник, 2000](#)).

Самый теплый месяц года – май, средняя температура воздуха – +31.7 °С, средняя температура января – +20.9 °С. Это самая низкая средняя температура в течение года. Средняя годовая температура воздуха в данном районе составляет +26.7 °С.

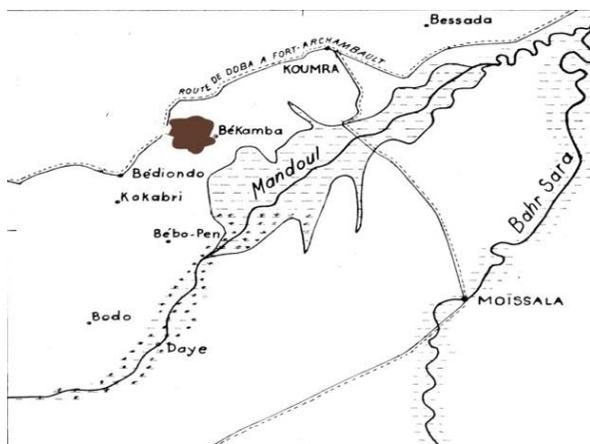


Рис 1. Карта-схема территории исследования.
Fig. 1. Map of the study area.

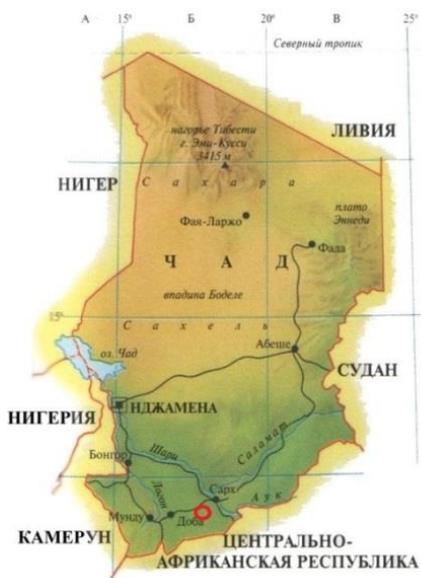


Рис 2. Схематическая карта Республики Чад. Красным кругом показано положение территории исследования.
Fig. 2. Schematic map of the Republic of Chad. The red circle shows the location of the study area.

В год выпадает около 900 мм осадков. Самый сухой месяц – январь (около 0 мм). Большая часть осадков выпадает в августе (в среднем 160 мм). Варьирование показателей климата по годам приведено в таблице 1. Следует отметить, что во влажный сезон (с июня по ноябрь) хлопок и другие сельскохозяйственные культуры выращивают в данном регионе без орошения.

Почвы опытного участка – красные ферраллитные легкосуглинистые, которые сформировались на однородных почвообразующих породах, представляющих собой четвертичные отложения. При определении агрофизических и химических свойств почвы были использованы общепринятые методы. Морфологическое описание почвенного профиля проведено по разрезу глубиной 2 м, заложенному на пятилетней залежи перед ее распашкой. Гранулометрический состав почвы определяли методом пипетки по Н.А. Качинскому. Плотность твердой фазы – пикнометрически, плотность сложения – методом цилиндров. Пористость определялась расчетным путем. Наименьшую влагоемкость (НВ) определяли методом залива площадок по Л.П. Розову, максимальную гигроскопичность (МГ) – по методу А.В. Николаева, влажность завядания (ВЗ) – расчетным методом ($VZ = MG \times 1.5$). Агрохимические анализы проводились по методикам Е.В. Аринушкиной ([Аринушкина, 1970](#)). Гумус – по методу И.В. Тюрина, валовое содержание фосфора и азота – по А.М. Мещерякову, валовое содержание калия – потенциметрически, подвижные формы азота, фосфора и калия – по методикам СоюзНИХИ (1963). Поглощенные основания и емкость поглощения – по Пфейфферу. Аналитическая повторность трехкратная, вычислялись коэффициенты линейной корреляции $R^2 = 0.95$. Статистическую обработку выполняли с помощью программы Microsoft Office Excel.

Таблица 1. Метерологические показатели периодов вегетации хлопчатника за 2016–2018 гг. в сравнении со среднемноголетними значениями

Table 1. Meteorological parameters of cotton vegetation periods for 2016–2018 in comparison with mean annual values

Год вегетации	Месяцы вегетации						Средние или сумма
	Июнь	Июль	Август	Сентябрь	Октябрь	Ноябрь	
Температура воздуха, °С							
2016	28.3	30.3	31.0	29.8	26.6	27.0	28.8
2017	26.1	27.2	26.1	26.4	24.3	23.5	25.6
2018	25.4	25.8	24.5	24.2	21.7	21.2	23.8
Среднемноголетние	26.8	28.2	25.8	24.9	23.6	22.4	25.2
Сумма осадков, мм							
2016	129.3	128.7	125.8	123.1	122.6	120.7	750.2
2017	175.4	185.4	184.5	183.7	184.6	180.5	1094.1
2018	188.3	188.6	187.9	186.00	186.1	182.0	1118.9
Среднемноголетние	144.3	160.2	160.9	157.0	150.2	146.2	918.8
Относительная влажность воздуха, %							
2016	72.4	72.6	71.8	72.1	72.6	71.8	433.3
2017	75.1	77.8	75.2	74.3	75.1	74.7	452.2
2018	76.4	80.2	78.1	77.0	78.6	79.6	469.9
Среднемноголетние	73.7	74.8	76.4	75.6	76.8	78.4	455.7

Год вегетации	Месяцы вегетации						Средние или сумма
	Июнь	Июль	Август	Сентябрь	Октябрь	Ноябрь	
Относительная влажность воздуха, %							
2016	72.4	72.6	71.8	72.1	72.6	71.8	433.3
2017	75.1	77.8	75.2	74.3	75.1	74.7	452.2
2018	76.4	80.2	78.1	77.0	78.6	79.6	469.9
Среднемноголетие	73.7	74.8	76.4	75.6	76.8	78.4	455.7
Испаряемость, мм							
2016	141.1	136.6	160.1	151.0	131.4	137.2	857.4
2017	117.0	108.9	116.5	122.3	109.1	107.1	680.9
2018	108.0	92.0	96.6	100.2	84.0	78.3	559.1
Среднемноголетие	127.0	128.3	109.6	109.3	98.63	87.3	660.1
Дефицит естественного увлажнения (осадки минус испарения), мм							
2016	-11.8	-7.9	-34.3	-27.9	-8.8	-16.5	-107.2
2017	58.4	76.5	68	61.4	75.5	73.4	413.2
2018	80.3	92	91.3	85.8	102.1	103.7	555.2
Среднемноголетие	17.3	50.6	51.3	47.4	51.57	58.9	258.7

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Морфологическое строение профиля красных ферраллитных почв территории исследований имеет свои особенности. Они характеризуются красной окраской почвенных горизонтов с более темным тоном поверхностного гумусово-аккумулятивного горизонта, большой мощностью почвенного профиля. В разрезе отмечается размытость границы между почвой и корой выветривания и постепенный переход между генетическими горизонтами. Характерной чертой красной ферраллитной почвы является облегченный гранулометрический состав верхней части профиля и наличие высокой пористости. При описании морфологического строения генетического профиля красной ферраллитной почвы выделены следующие почвенные горизонты:

A₀ (0–4 см) – маломощный слой органических растительных остатков;

A (4–25 см) – гумусово-аккумулятивный горизонт;

AB (25–42 см) – переходный гумусово-метаморфический горизонт, красно-коричневого цвета;

B_m (42–68 см) – метаморфический горизонт, светло-коричневого цвета с красноватым оттенком;

B_{im} (68–105 см) – иллювиальный ферраллитно-метаморфический горизонт, красно-желтого цвета с перламутровым блеском;

C (105–200 см) – почвообразующая (материнская) порода, кирпично-красного цвета, местное название Терра Дэ Бар (*Terre de Barre*), очень плотная, увлажненная, гомогенная, бесструктурная, легкоглинистая.

Почва красная ферраллитная легкосуглинистая сверху с утяжелением по глубине на ферраллитной коре выветривания ферраллит-каолинитового состава легкоглинистой почвообразующей породы. В соответствии с международной классификацией ([WRB, 2015](#)) изученная почва относится к *Haplic Ferralsol (Loamic, Eutric, Ochric)*.

Результаты гранулометрического анализа красных ферраллитных почв (пирофосфатный метод подготовки) выявили резкую текстурную дифференциацию почвенного профиля на две зоны: первая зона, расположенная в верхней части почвенного профиля мощностью 42 см, представлена фракциями крупного и мелкого

песка, где его содержание превышало 50 %; вторая зона, расположенная в нижней части почвенного профиля глубиной более 42 см, сформирована преимущественно крупнопылеватыми, пылеватыми и иловатыми фракциями (табл. 2).

Таблица 2. Гранулометрический состав красной ферраллитной почвы, %
Table 2. Grain size distribution in the studied Haplic Ferralsol, %

Глубина, см	1–0.25	0.25– 0.05	0.05– 0.01	0.01– 0.005	0.005– 0.001	< 0.001	< 0.01
0–4	25.8	27.5	20.1	4.2	8.2	14.2	26.6
4–25	27.4	29.4	15.8	2.7	4.2	20.5	27.4
25–42	21.8	28.6	19.8	4.5	5.8	19.5	29.8
42–68	17.3	21.8	22.8	4.3	5.0	28.7	38.0
68–105	14.5	16.4	24.4	5.1	8.7	30.9	44.7
105–112	11.8	19.3	17.1	3.9	10.5	37.4	51.8

В целом красная ферраллитная почва пятилетней залежи с поверхности земли до глубины 42 см представлена легким суглинком. В метаморфическом горизонте 42–68 см гранулометрический состав почвы был среднесуглинистый, а в иллювиальном ферраллитно-метаморфическом горизонте 68–105 см почва характеризовалась тяжелосуглинистым составом.

Наибольшее утяжеление (содержание физической глины 51.8 %) отмечено в материнской породе ниже 105 см от поверхности земли. При этом почвообразующая порода по гранулометрическому составу представлена легкой глиной. Увеличение содержания физической глины в почвенных горизонтах с глубиной почвенного профиля может свидетельствовать о протекании в исследуемой красной ферраллитной почве процессов ферраллитизации и лессиважа (табл. 3).

Валовой химический состав красных ферраллитных почв Республики Чад определяется особенностями процессов почвообразования. Наиболее важными химическими элементами являются кремний, алюминий, железо, кальций, магний, калий и натрий. Именно эти химические элементы вместе с кислородом составляют 99 % всей минеральной части почвы. При этом валовой химический состав почвы определяется гранулометрическим составом.

В минеральной части почвы содержится максимальное количество кремнезема (SiO_2), содержание которого с глубиной постепенно снижается от 67.73 до 46.83 % в материнской породе (табл. 3).

Таблица 3. Валовой состав исследуемых почв
Table 3. Gross composition of the studied soils

Горизонт	Глубина, см	SiO_2	Fe_2O_3	Al_2O_3	CaO	Na_2O_3	P_2O_5	MnO	K_2O	MgO
A_0	0–4	82.73	3.86	11.46	0.07	0.08	0.18	0.03	0.07	0.03
A	4–25	81.80	3.50	12.50	0.06	0.06	0.25	0.06	0.11	0.05
AB	25–42	76.34	3.60	18.08	0.05	0.09	0.20	0.04	0.13	0.05
B_m	42–68	67.48	4.20	25.76	0.04	0.14	0.20	0.05	0.22	0.10
B_{tm}	68–105	62.64	6.32	28.74	0.02	0.19	0.09	0.06	0.31	0.24
C	105–112	61.83	6.40	29.25	0.02	0.23	0.10	0.09	0.27	0.26

По-видимому, такое распределение обусловлено литологической составляющей изучаемой почвы. Второе место в минеральной части почвы занимает алюминий, количество которого в почвенном профиле изменяется в широких пределах. Содержание окислов Al, в 2–3 раза превышает содержание Fe_2O_3 . Их содержание закономерно увеличивается в относительно оглиненном горизонте на глубине 42–68 см, что, очевидно, вызвано лессиважем. До глубины 42 см содержание Al_2O_3 изменялось от 7.50 до 12.08 %. В более глубоких почвенных горизонтах содержание алюминия увеличивается в 2–3 раза. Максимальное его количество наблюдается в нижней части иллювиального ферраллитно-метаморфического горизонта (28.7 %). Это происходит в результате процесса ферраллитизации. Оксиды алюминия и железа накапливаются относительно остальных, создавая характерный красный цвет почвы и коры выветривания. Содержание железа по профилю почвы изменяется в пределах 2.50–6.3 %. В целом наименьшее количество

оксидов Al и Fe наблюдалось в поверхностных почвенных горизонтах, а наибольшее – в глубоких горизонтах, что, по-видимому, связано с перераспределением илистой фракции по почвенному профилю. Корреляция содержания Fe_2O_3 с распределением ила указывает ([Дюшофур, 1970](#)) на образование недиссоциирующегося комплекса между глиной и железом. Такой процесс происходит при ферраллитизации почвенного профиля. Характерной особенностью рассматриваемой почвы является отсутствие почвенного горизонта с высоким содержанием железа.

Ферраллитные красные почвы характеризуются степенью насыщения ниже 40 %, илистой фракцией ([Schwertmann, 1988](#)), состоящей из каолинита, оксидов железа и оксида алюминия, соотношением $SiO_2 : Al_2O_3$ между 1.7 и 2. Количество кальция и магния в красной ферраллитной почве очень низкое и составляет соответственно 0.02–0.07 и 0.03–0.26 %. При этом низкое содержания кальция связано с составом коры выветривания (ферраллитно-каолинитовый состав почвообразующих пород). При этом содержание магния было заметно выше, чем кальция, особенно в иллювиальном горизонте и почвообразующей породе, где содержание MgO достигало 0.24–0.26 %. В минеральной части почвы содержание Na_2O_3 и K_2O было также невысоким. Содержание натрия по глубине профиля изменялось в пределах 0.06–0.19 %, а калия – 0.07–0.31 %, т. е. по глубине почвенного профиля наблюдается тенденция увеличения этих показателей. Количество марганца (MnO) очень низкое (0.03–0.09 %) и по глубине профиля отмечается незначительное увеличение его содержания. Количество фосфора по глубине почвенного профиля изменялось в пределах 0.09–0.25 %. Наибольшее его количество (0.18–0.25 %) было зафиксировано в верхнем почвенном горизонте до глубины 68 см, а ниже его количество уменьшилось в два раза (0.09–0.10 %).

Состав обменных катионов является главной особенностью физико-химической характеристики красных ферраллитных почв. Важнейшими катионами, определяющими почвенно-поглощающий комплекс этих почв, являются Ca^{2+} , Mg^{2+} , H^+ , Al^{3+} (табл. 4).

Таблица 4. Обменные катионы красных ферраллитных почв
Table 4. Exchangeable cations of the studied Haplic Ferrallic soil

Горизонт	Глубина, см	Ca ²⁺		Mg ²⁺		H ⁺ + Al ³⁺		ЕКО	V
		смоль (экв)/кг	% от ЕКО	смоль (экв)/кг	% от ЕКО	смоль (экв)/кг	% от ЕКО	смоль (экв)/кг	%
A ₀	0–4	1.3	13.4	0.2	1.8	8.2	84.8	9.7	15.2
A	4–25	7.0	77.2	2.0	22.1	0.1	0.8	9.1	99.2
AB	25–42	7.0	86.0	1.0	12.3	0.1	1.7	8.1	98.3
B _m	42–68	6.0	91.2	0	0	0.6	8.8	6.6	91.2
B _{tm}	68–105	0.4	3.7	0.2	1.6	10.2	94.7	10.7	5.3
C	105–200	0.4	3.6	0.1	1.0	10.6	95.4	11.1	4.6

Степень насыщенности почв основаниями (V, %) – доля суммы обменных оснований от емкости катионного обмена, выраженная в процентах.

$$V = (S / \text{ЕКО}) \cdot 100, \%$$

по-другому можно записать $V = S / (S + \text{Hr}) \cdot 100, \%$.

Среди обменных катионов кальция (Ca²⁺) является определяющим, его содержание изменяется в широком диапазоне – от 0.4 до 7.0 смоль (экв)/кг. Наибольшее его содержание (6.0–7.0 смоль (экв)/кг) наблюдается в почвенных горизонтах А, АВ и В_m на глубинах 4–68 см, а наименьшее – 0.4 смоль (экв)/кг – в почвенных горизонтах В_{tm} и С. Содержание обменного магния было значительно меньше, чем кальция и изменялось от 0 до 2.0 смоль (экв)/кг из-за обеднения магнием красных ферраллитных почв, а также из-за сильной ферраллитизации коры выветривания. Оптимальный магниевый режим ферраллитных почв оценивают величиной соотношения Ca : Mg, равной 5 : 1 (Хисен, 2009). Заметное содержание обменного магния (1.0–0.2 смоль (экв)/кг) наблюдалось в верхних почвенных горизонтах А и АВ. По профилю отмечается заметное увеличение содержания катионов обменного водорода и алюминия с 0.1 до 10.6 смоль (экв)/кг, что обусловлено увеличением кислотности. Повышенное содержание обменного водорода и алюминия в горизонтах В и С обусловлено

снижением концентрации катионов кальция в почвенном поглощающем комплексе. В целом емкость катионного обмена изменялась в пределах 6.6–11.1 смоль (экв)/кг. Основные агрохимические свойства почв приведены в таблице 5.

Таблица 5. Агрохимические свойства красной ферраллитной почвы
Table 5. Agrochemical properties of Naplic Ferralisol

Горизонт	Гумус, %	N валовое, %	C : N	pH		Нг мг-экв/100г	P ₂ O ₅		Подвижный K ₂ O мг/100 г
				H ₂ O	KCl		Валовой, %	Подвижный мг/100 г	
A ₀	1.67	0.11	6.18	6.20	4.80	6.60	0.08	0.76	0.05
A	1.54	0.08	12.63	5.90	4.66	1.23	0.25	1.07	1.48
AB	1.53	0.07	13.14	5.52	4.50	1.23	0.20	0.96	0.96
B _m	1.07	0.06	11.16	4.82	4.18	2.45	0.20	0.67	0.61
B _{tm}	0.08	0.04	4.00	4.40	4.00	8.01	0.09	1.09	0.15
C	0.09	0.04	3.75	4.70	3.90	10.80	0.10	1.04	0.12

Из полученных данных следует, что почва слабо обеспечена гумусом. В горизонтах A₀, A и AB его содержание изменялось в пределах 1.53–1.66 %, с глубиной количество гумуса постепенно снижалось, и в почвенном горизонте B_m (42–68см) содержание гумуса составляло 1.07 %. В нижележащих горизонтах B и C содержание гумуса снижалось практически до 0. Валовое содержание общего азота с глубиной также постепенно снижалось – от 0.11 до 0.04 %. В целом почва обладает низкой обеспеченностью общего азота, за исключением дернового горизонта почвы (A₀), который характеризуется умеренно низкой обеспеченностью общим азотом. Следует отметить, что отношение C : N является узким по причине низкой обеспеченности азотом для горизонтов A₀, B и C, где оно изменялось от 3.75 до 6.18. Естественно самое узкое отношение характерно для горизонтов B и C. Отношение C : N было средним в горизонте B_m (42–68 см) и составило 11.16. Более ши-

рокое соотношение наблюдалось в почвенных горизонтах А и АВ (5–42 см) и изменялось в пределах 12.63–13.14.

Почвы характеризуются кислой реакцией. При этом рН по глубине почвенного профиля постепенно снижался от 6.20 до 4.40 и 4.80 до 3.90 соответственно при рН кислотной вытяжки в верхних горизонтах А₀ и А почва была средне кислой, в горизонтах АВ и В_м – сильно кислой, а в горизонтах В и С – очень сильно кислой. Гидролитическая кислотность (Нг) заметно изменялась по глубине почвенного профиля от 1.23 до 10.80 мг-экв/100 г. Наиболее благоприятной она наблюдалась в почвенных горизонтах А, АВ, В_м, где ее значения варьировало от 1.23 до 2.45 мг-экв/100 г. Повышение гидролитической кислотности от 6.60 до 10.80 мг-экв/100 г было зафиксировано в горизонтах А₀, В и С.

Валовое содержание фосфора достаточное высокое, особенно в горизонтах А, АВ и В_м и составляло 0.20–0.25 %. В дерновом слое А₀, а также в горизонтах В и С его количество уменьшалось до 0.08–0.10 %. Почвы характеризуются низкой обеспеченностью фосфором – от 0.76 до 1.09 мг/100 г. Снижение содержания фосфора является характерной особенностью ферраллитных почв, минеральная основа которых обогащена несиликатными соединениями железа и алюминия. Переход из растворимого состояния в нерастворимые соединения в почвах подвергаются не только почвенные фосфаты, но и фосфаты минеральных удобрений, вносимых под возделываемые культуры (10. Хисен, 2009). Содержание подвижного калия было очень низким и по профилю изменялось от 0.05 до 1.48 мг/100 г.

Эффективность возделывания сельскохозяйственных культур во многом определяется агрофизическими свойствами почв, результаты, исследования которых приведены в таблице 6.

Плотность по глубине почвенного профиля изменялась от 1.36 до 1.55 г/см³ и превышала оптимальные показатели. В почвенных горизонтах А₀, А и АВ с легкосуглинистым гранулометрическим составом до глубины 42 см плотность почвы находилась в пределах 1.36–1.47 г/см³; в почвенном горизонте В_м (42–68 см) со

среднесуглинистым гранулометрическим составом плотность увеличилась до 1.52 г/см^3 . Наиболее высокая плотность почвы отмечалась в горизонтах B_{tm} и C , где гранулометрический состав почвы представлен тяжелым суглинком и легкой глиной и изменялась от 1.53 до 1.55 г/см^3 . Эти данные свидетельствуют о необходимости разрыхления почвы и прежде всего верхних горизонтов (A_0 , A , AB).

Таблица 6. Агрофизические свойства красной ферраллитной почвы на начало исследований, май 2016 г.

Table 6. Agrophysical properties of Haplic Ferralsol at the beginning of research, May, 2016

Горизонт	Глубина, см	Плотность, г/см^3	Плотность твердой фазы, г/см^3	Пористость общая, %	Наименьшая влагосмкость, %	Максимальная гигроскопичность, влага, %	Влажность завядания, %
A_0	0–4	1.36	2.66	48.9	22.4	6.2	9.3
A	4–25	1.45	2.68	45.9	24.3	6.5	9.8
AB	25–42	1.47	2.69	45.4	25.7	6.7	10.1
B_m	42–68	1.52	2.71	44	26.9	6.9	10.4
B_{tm}	68–105	1.53	2.72	43.8	28.3	7.5	11.3
C	> 105	1.55	2.73	43.3	29.8	8.1	12.2

Плотность твердой фазы почвы по горизонтам изменялась в узких пределах – от 2.66 до 2.73 г/см^3 , и их значения в основном определялись минералогическим составом почвы. Тенденция некоторого увеличения плотности твердой фазы почвы с глубиной, по-видимому, связана с гранулометрическим составом.

Общая пористость почвы изменялась в зависимости от плотности почвы в пределах 43.3 – 48.9 %. Отмечена обратная корреляционная зависимость между общей пористостью и плотностью почвы. При этом отмечается, что с увеличением плотности

уменьшается общая пористость почвы. В целом общая пористость почвы даже в верхних почвенных горизонтах была ниже оптимальных значений (ниже 50 %). Близкие показатели к нижнему уровню оптимальной пористости наблюдались в горизонтах A_0 и A (0–25 см) – 48.9–45.9 %.

Наименьшая влагоемкость является важным показателем, характеризующим водные свойства почвы. По результатам исследований значения наименьшей влагоемкости почвенного профиля изменялись от 22.4 до 29.8 %. Для верхних горизонтов A_0 , A и AB , которые характеризуются легким гранулометрическим составом, она составляла 22.4–25.7 %. С утяжелением почвы по глубине до тяжелого суглинка и легкой глины значения наименьшей влагоемкости повышались до 28.3–29.8 %.

По профилю почвы с глубиной отмечалось увеличение значений МГ и ВЗ от 6.2 до 8.1 % и от 9.3 до 12.1 % соответственно. Увеличение этих показателей с глубиной почвенного профиля обусловлено утяжелением почв от легких суглинков до легкой глины.

Красные ферраллитные почвы имеют хорошую водопрочную мелкокомковатую структуру ([Дюшофур, 1970](#)), широко используются под различные культуры, в том числе и хлопчатник. Семена хлопчатника будут прорастать медленно, если температура почвы ниже 15 °С. При активном росте идеальная температура воздуха составляет 21–37 °С. Температура выше 37 °С нежелательна. Тем не менее, хлопчатник может выдерживать температуру до 43 °С в течение коротких периодов без значительного ущерба, но это также зависит от уровня влажности. Для того чтобы хлопчатник успешно созрел, нужно небольшое количество осадков во время созревания (летом) и в дни сбора урожая (осенью).

Красные ферраллитные почвы по своему составу и свойствам благоприятны для возделывания хлопчатника и широко используются в сельскохозяйственном производстве в зонах их распространения. Посевные площади под хлопчатником в Республике Чад составляют в настоящее время примерно 300 тыс. га. Хлопко-

водство является важным рычагом социально-экономического развития в Чаде ([Hauck, 1974](#); [Karpoff et al., 1973](#); [Maignien, 1959](#); [Carte Pédologique du Tchad, 1964](#)). Важное место в народном хозяйстве занимает хлопчатник как индустриальная культура с 1928 г. Хлопок обеспечивает налоговые поступления государству и существенные доходы для всех предприятий, имеющих деловые отношения с хлопковой компанией. В производственной зоне хлопок занимает ключевое место, поскольку он влияет на повседневную жизнь более 3 млн человек, или более 25 % населения страны, которые получают большую часть своего дохода от этой деятельности. Хлопок является одной из основных товарных культур в Республике Чад. Сельскохозяйственное предприятие Бекамба Котон-Чад (Мунду) (Coton-Chad), на территории которого были проведены данные почвенные изыскания, успешно специализируется в культивации хлопчатника ([Соколов, 1988](#); [Хисен, 2009](#)).

ВЫВОДЫ

1. Была проведена оценка состава и свойств красных ферраллитных почв Республики Чад.

2. Красные ферраллитные почвы имеют свои особенности. Они характеризуются красной окраской с более темным тоном поверхностного гумусово-аккумулятивного горизонта, большей общей мощностью почвенного профиля и постепенным переходом между генетическими горизонтами. Характерной чертой этих почв является их облегченный гранулометрический состав верхней части профиля (легкосуглинистый, с глубиной он утяжеляется до легкой глины).

3. Основу валового химического состава красных ферраллитных почв составляют кремний, алюминий, железо, кальций, магний, калий и натрий и вместе с кислородом достигают 99 % всей минеральной части. При этом наибольшая доля приходится на SiO_2 , Fe_2O_3 и Al_2O_3 , содержание которых по глубине почвенного профиля собственно изменяется в пределах 82.7–61.83 %, 3.50–6.40 % и 11.46–29.25 %. Емкость катионного обмена в профиле

почвы изменялась в пределах 6.6–11.1 смоль (экв)/кг. Среди обменных катионов кальций (Ca^{2+}) является определяющим.

4. Красные ферраллитные почвы характеризуются низкой обеспеченностью гумусом. В верхних почвенных слоях, до 42 см, его содержание изменялось в пределах 1.53–1.66 %. Почвы характеризуются кислой реакцией – от средне кислой в верхних горизонтах до очень сильно кислой в нижнем горизонте. Содержание подвижного фосфора в почвенном профиле характеризуется как низкое (от 0.76 до 1.09 мг/100 г), а подвижного калия – очень низкое (от 0.05 до 1.48 мг/100 г).

Плотность почвы с глубиной почвенного профиля увеличивалась от 1.36 до 1.55 г/см³. Что касается технологий возделывания хлопчатника, то для повышения производительности почв требуется проведение их разрыхления, прежде всего верхних почвенных горизонтов. Общая пористость почвы изменялась в пределах 43.3–48.9 %. Близкие показатели к нижнему уровню оптимальной пористости наблюдались в слое 0–25 см – 45.9–48.9 %. Наименьшая влагоемкость почвы изменялась от 22.4 до 29.8 %. Для легкого суглинка она составляла 22.4–25.7 %. С утяжелением почвы по глубине до тяжелого суглинка и легкой глины значения наименьшей влагоемкости повышались до 28.3–29.8 %.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Аринушкина Е.В.* Руководство по химическому анализу почв. М.: МГУ, 1970. 487 с.
2. *Дюшофур Ф.* Основы почвоведения. М.: Прогресс, 1970. 590 с.
3. *Ларешин В.Г., Шуравилин А.В.* Пути снижения деградации и современные технологии повышения плодородия почв в антропогенных ландшафтах субтропической и тропической зон. М.: РУДН, 2008. 263 с.
4. Почвенный справочник / Пер. с фр. *И.В. Ковда*, под ред. *М.И. Герасимовой*. Смоленск. “Ойкумена”, 2000. 286 с.
5. *Розанов Б.Г.* Морфология почв. М., 2004. 432 с.
6. *Розов Н.Н., Строганова М.Н.* Почвенный покров Мира. М.: Изд-во МГУ, 1979. 290 с.
7. *Сагоян Л.Ю.* Республика Чад: Справочник РАН. Ин-т Африки. М.: Наука, 1993. 150 с.
8. *Соколов И.А.* О генезисе тропических красных ферраллитных почв // Почвоведение. 1988. № 4. С. 492–506.

9. *Турсина Т.В., Соколов И.А.* Макро- и микроморфологическая диагностика генезиса ферраллитных тропических почв Лаоса // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2008. Вып. 62. С. 22–35. DOI: [10.19047/0136-1694-2008-62-22-35](https://doi.org/10.19047/0136-1694-2008-62-22-35).
10. *ФАО.* Накормить мир, ликвидировать голод. Справочный документ для Всемирного саммита по продовольственной безопасности. Рим, 2009. 26 с.
11. *Хисен М.К.* Изменение физико-химических свойств красных ферраллитных почв Республики Чад в процессе окультуривания // Известия СПбГАУ. 2009. № 15. С. 11–16.
12. *Хисен М.К.* Кислотно-основные свойства красных ферраллитных почв Республики Чад // Научное обеспечение развития АПК в условиях реформирования. Сб. научных трудов. СПб: СПбГАУ, 2009. С. 152–155.
13. *Хисен М.К., Чернов Д.В.* Сравнительная характеристика почв гумидных ландшафтов на различных корях выветривания на примере форм соединений железа // Известия СПбГАУ. 2010. № 19. С. 110–115.
14. *Хисен М.К.* Сравнительная характеристика почв гумидных ландшафтов на различных корях выветривания // Материалы Всероссийской научной конференции XIV Докучаевские молодежные чтения “Почвы в условиях природных и антропогенных стрессов”. СПб: Изд-во СПбГУ, 2011. С. 96–97.
15. *Чернов Д.В., Хисен М.К., Плылова И.А.* Влияние окультуривания на содержание и состав гумуса в красных ферраллитных почвах Республики Чад // Гумус и почвообразование. СПбГАУ. 2009. С. 75–78.
16. *Чернов Д.В., Хисен М.К.* Содержание соединений алюминия в красных ферраллитных почвах Республики Чад // Известия СПбГАУ. 2010. № 21. С. 66–70.
17. *Alboucq A.M.* Esquisse hydrologique 1 : 1500000 (E 13°10'00" E 23° / N 15°30'00" – N 7°15'00") // ORSTOM. Paris, 1966.
18. *Allan W.* The African Husbandman. London: Oliver and Boyd, 1965. 503 p.
19. *Altieri M.A., Letourneau D.K., Davis J.R.* Developing sustainable agroecosystems // Bioscience. 1983. No. 33 (1). P. 45–49.
20. *Andriess J.P.* Nutrient level changes during a 20 year shifting cultivation cycle in Sarawak (Malaysia). Kuala Lumpur, 1977. 479 p.
21. *Arshad M.A.* Influence of the termite macrotermes michaelsoni (sjost) on soil fertility and vegetation in a semiarid savannah ecosystem // Agro-Ecosystems, 1982. No. 8. P. 47–58.
22. *Aubert G.* Influence de divers types de végétation sur les caractères de l'évolution des sols en région équatoriale et subéquatoriale. In Colloque “Sols et végétations des régions tropicales”. UNESCO. Abidjan, 1959. P. 41–45.

23. *Aubert G., Leneuf N.* Essai d'évaluation de la vitesse de ferrallitisation. 7th Intern. Congress Soc. of Soil Sc. Madison, 1960. 35 p.
24. *Aubert G., Tavernier R.* Soil Survey // Soil of the Humid Tropics. Natl. Acad. Sei. Washington. DC, 1972. P. 17–44.
25. *Aubert G., Segalen P.* Projet de classification des sols ferrallitiques // ORSTOM. 1986. 18 p.
26. *Bekayo N.D.* PROJET CHD/96/G3 1/B/IG/99. “Elaboration de la Stratégie Nationale et. Plan d'Action pour la Conservation de la Diversité Biologique”. Vol. Agropédologie. 1998. 18 p.
27. *Benneh G.* Systems of agriculture in tropical Africa // Economic Geography. 1972. No. 48 (3). P. 244–257.
28. *Boulande B.* Les formations bauxitiques lateritiques de Cote d'Ivoire. Les fades, leur transformation, leur distribution et revolution du modele // ORSTOM. Paris, 1984. 342 p.
29. *Boulvert Y.* Typologie sommaire des principaux sols ferrallitiques et ferrugineux tropicaux étudiés en République Centrafricaine // ORSTOM. Série Pédologie. 1972. No. 10 (1). P. 59–75.
30. *Colin F.* Histoire des sols tropicaux. Precieux traceurs // Le journal de L'IRD. Sciences du sol. 2001. P. 3.
31. *Conklin H.C.* Hanunoo Agriculture: a report on an integral system of shifting cultivation in the Philippines // Forestry Development Paper. Rome: FAO, 1957. No. 12. P. 9–15.
32. *D'Hoore J.K.* Carte des soil d'Afrique anl: 500 000, 7 fenilles. Bruxelles, CCTA, 1963.
33. *Fosbrooke H.A.* Aspects socioéconomiques de la culture itinérante // L'agriculture itinérante et la conservation des sols en Afrique. Bulletin pédologique de la FAO, Rome: FAO, 1974. No. 24. P. 144–150.
34. *Gliessman S.R.* Economic and ecological factors in designing and managing sustainable agroecosystems // Sustainable agriculture and integrated farming systems. East Lansing: Michigan State University Press, 1985. P. 56–63.
35. *Harrasovitz H.* Laterit, Material und Versutc erdgeschichtilnicher Ausvertung // Fortschr. Geol. Palaont. Berlin, 1926. No. 14. P. 253–566.
36. *Hauck F.* Introduction. In L'agriculture itinérante et la conservation des sols en Afrique // Bulletin pédologique de la FAO. Rome: FAO, 1974. No. 24. P. 1–5.
37. *Karpoff A.M., Bocquier G., Isnard P., Tardy Y.* Géochimie d'une toposéquences de sols tropicaux du Tchad. Utilisation des méthodes statistiques // Sci. Géol. Bull. Strasbourg, 1973. Vol. 26. No. 4. 315 p.
38. *Leneuf N.* L'altération des granites calco-alcalins et des granodiorites en Côte d'Ivoire forestière et les sols qui en sont derives // ORSTOM. Thèse Fac. Sci. Paris, 1965. 210 p.

39. *Maignien R.* Soil cuirasses in tropical West Africa // *Soils Africa*. 1959. No. 4. P. 4–41.
40. *McGrath D.G.* The role of biomass in shifting cultivation // *Human Ecology*. 1987. No. 15(2). P. 221–242.
41. *Mohr E.C., van Varen F.A.* Tropical soils. London, 1954. 320 p.
42. *Nye P.H., Greenland D.J.* The Soil under Shifting Cultivation // *Technical Communication*. Harpenden, 1960. No. 51. 156 p.
43. *Nye P.H., Greenland D.J.* Changes in the soil after clearing tropical rainforest // *Plant and Soil*. 1964. No. 21. P. 101–112.
44. *Pias J.* Les sols du Tchad // *ORSTOM. Collection de Référence*. Paris, 1964. P. 145–151.
45. *Référentiel pédologique 2008*. Versailles: Éditions Quæ, 2009. 405 p.
46. *République du Tchad*. Carte Pédologique du Tchad. 1 : 1 000 000. Pias, J. // *ORSTOM*. 1964.
47. *Robequain Ch.* Études géologiques et pédologiques dans la cuvette du Tchad, In: *Annales de Géographie*. 1956. Vol. 65. No. 348. P. 151–153.
48. *Schwertmann U.* Some properties of soil and syntetic iron oxides // *Iron in soil and clay minerals*. Dordrecht: Reidel, 1988. P. 203–250.
49. *Tursina T., Sokolov I., Shishov L.* New hypothesis of the genesis of red ferrallitic soils // *Micromorphology*. Adelaide, 1992. 27 p.
50. *Stoops G.* (Ed.). Evolution of tropical soil science: past and future. Academie royale des past and future. Workshop Brussels, 2003. 157 p.
51. *World reference base for soil resources 2014*. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. Update 2015. 203 p.

REFERENCES

1. Arinushkina E.V., *Rukovodstvo po khimicheskomu analizu pochv* (Chemical soil analysis guide), Moscow: Moscow State University, 1970, 487 p.
2. Dyushofur F., *Osnovy pochvovedeniya* (Fundamentals of soil science), Moscow: Progress, 1970, 590 p.
3. Lareshin V.G., Shuravilin A.V., *Puti snizheniya degradatsii i sovremennye tekhnologii povysheniya plodorodiya pochv v antropogennykh landshaftakh subtropicheskoy i tropicheskoy zon* (Ways to reduce soil degradation and modern technologies to increase soil fertility in anthropogenic landscapes of the subtropical and tropical zones), Moscow: RUDN, 2008, 263 p.
4. *Pochvennyy spravochnik* (Soil Handbook), I.V. Kovda (trans. from French), M.I. Gerasimova (Ed.), Smolensk. “Oykumena”, 2000, 286 p.

5. Rozanov B.G., *Morfologiya pochv* (Soil morphology), Moscow, 2004, 432 p.
6. Rozov H.H., Stroganova M.N., *Pochvennyy pokrov Mira* (Soil cover of the World), Moscow: Publishing house of Moscow State University, 1979, 290 p.
7. Sagoyan L.Yu., Respublika Chad, In: *Spravochnik RAN. In-t Afriki* (Republic of Chad, In: *A book of reference of the RAS. Institute of Africa*), Moscow: Nauka, 1993, 150 p.
8. Sokolov I.A., O genezise tropicheskikh krasnykh ferrallitnykh pochv (On the genesis of tropical red ferrallite soils), *Pochvovedenie*, 1988, No. 4, pp. 492–506.
9. Tursina T.V., Sokolov I.A., Macro- and micromorphological diagnostics of the genesis of tropical ferrallite soils of Laos, *Dokuchaev Soil Bulletin*, 2008, Iss. 62, pp. 22–35, DOI: [10.19047/0136-1694-2008-62-22-35](https://doi.org/10.19047/0136-1694-2008-62-22-35).
10. *FAO*, Technical papers from the Expert Meeting on How to Feed the World in 2050, Rome, 2009, 26 p.
11. Khisen M.K., Izmenenie fiziko-khimicheskikh svoystv krasnykh ferrallitnykh pochv Respubliki Chad v protsesse okul'turivaniya (Change of physico-chemical properties of red ferrallite soils of the Republic of Chad in the process of cultivation), *Izvestiya SPbGAU*, 2009, No. 15, pp. 11–16.
12. Khisen M.K., Kislотно-osnovnye svoystva krasnykh ferrallitnykh pochv Respubliki Chad (Acid-basic properties of red ferrallite soils of the Republic of Chad), *Scientific support for the development of the agro-industrial complex under the conditions of reformation*, St. Petersburg: SPbGAU, 2009, pp. 152–155.
13. Khisen M.K., Sravnitel'naya kharakteristika pochv gumidnykh landshaftov na razlichnykh korakh vyvetrivaniya (Comparative characteristics of the soils of humid landscapes on various weathering crusts), *Materialy Vserossiyskoy nauchnoy konferentsii XIV Dokuchaevskie molodezhnye chteniya "Pochvy v usloviyakh prirodnnykh i antropogennykh stressov"* (Proc. All-Russ. Conf. XIV Dokuchaev Youth Readings "Soils under Natural and Anthropogenic Stresses"), St. Petersburg: Publishing House of St. Petersburg State University, 2011, pp. 96–97.
14. Khisen M.K., Chernov D.V., Sravnitel'naya kharakteristika pochv gumidnykh landshaftov na razlichnykh korakh vyvetrivaniya na primere form soedineniy zheleza (Comparative characteristics of the soils of humid landscapes on different weathering crusts using iron compounds as an example), *Izvestiya SPbGAU*, 2010, No. 19, pp. 110–115.
15. Chernov D.V., Khisen M.K., Plylova I.A., Vliyanie okul'turivaniya na sodержanie i sostav gumusa v krasnykh ferrallitnykh pochvakh Respubliki Chad (The influence of cultivation on the content and composition of humus

in red ferrallite soils of the Republic of Chad), *Gumus i pochvoobrazovanie*, 2009, pp. 75–78.

16. Chernov D.V., Khisen M.K., Soderzhanie soedineniy alyuminiya v krasnykh ferrallitnykh pochvakh Respubliki Chad (The content of aluminum compounds in red ferrallitic soils of the Republic of Chad), *Izvestiya SPbGAU*, 2010, No. 21, pp. 66–70.

17. Alboucq A.M., Esquisse hydrologique 1 : 1500000 (E 13°10'00" E 23° ; N 15°30'00" – N 7°15'00"), *ORSTOM*, Paris, 1966.

18. Allan W., *The African Husbandman*, London: Oliver and Boyd, 1965, 503 p.

19. Altieri M.A., Letourneau D.K., Davis J.R., Developing sustainable agroecosystems, *Bioscience*, 1983, No. 33 (1), pp. 45–49.

20. Andriessse J.P., *Nutrient level changes during a 20 year shifting cultivation cycle in Sarawak (Malaysia)*, Kuala Lumpur, 1977, 479 p.

21. Arshad M.A., Influence of the termite macrotermes michaelsoni (sjost) on soil fertility and vegetation in a semiarid savannah ecosystem, *Agro-Ecosystems*, 1982, No. 8, pp. 47–58.

22. Aubert G., Influence de divers types de végétation sur les caractères de l'évolution des sols en région équatoriale et subéquatoriale, In : *Colloque "Sols et végétations des régions tropicales"*, UNESCO, Abidjan, 1959, pp. 41–45.

23. Aubert G., Leneuf N., Essai d'évaluation de la vitesse de ferralitisation, 7th *Intern. Congress Soc. of Soil Sc.*, Madison, 1960, 35 p.

24. Aubert G., Tavernier R., Soil Survey, *Soil of the Humid Tropics*, Natl. Acad. Sei., Washington DC, 1972, pp. 17–44.

25. Aubert G., Segalen P., Projet de classification des sols ferrallitiques, *ORSTOM*, 1986, 18 p.

26. Bekayo N.D., PROJET CHD/96/G3 1/B/IG/99, "Elaboration de la Stratégie Nationale et. Plan d'Action pour la Conservation de la Diversité Biologique", Vol. Agropédologie, 1998, 18 p.

27. Benneh G., Systems of agriculture in tropical Africa, *Economic Geography*, 1972, No. 48 (3), pp. 244–257.

28. Boulange B., Les formations bauxitiques lateritiques de Cote d'ivoire. Les fades, leur transformation, leur distribution et revolution du modele, *ORSTOM*, Paris, 1984, 342 p.

29. Boulvert Y., Typologie sommaire des principaux sols ferrallitiques et ferrugineux tropicaux étudiés en République Centrafricaine, *ORSTOM*, Série Pédologie, 1972, No. 10 (1), pp. 59–75.

30. Colin F., Histoire des sols tropicaux. Precieux traceurs, *Le journal de L'IR. Sciences du sol*, 2001, p. 3.

31. Conklin H.C., Hanunoo Agriculture: a report on an integral system of shifting cultivation in the Philippines, *Forestry Development Paper*, Rome: FAO, 1957, No. 12, pp. 9–15.
32. D'Hoore J.K., *Carte des soil d'Afrique anl: 500 000*, 7 fenilles, Bruxelles, CCTA, 1963.
33. Fosbrooke H.A., Aspects socioéconomiques de la culture itinérante, L'agriculture itinérante et la conservation des sols en Afrique, *Bulletin pédologique de la FAO*, Rome: FAO, 1974, No. 24, pp. 144–150.
34. Gliessman S.R., Economic and ecological factors in designing and managing sustainable agroecosystems, *Sustainable agriculture and integrated farming systems*, East Lansing: Michigan State University Press, 1985, pp. 56–63.
35. Harrasovitz H., Laterit, Material und Versutc erdgeschichtilncher Auswertung, *Fortschr. Geol. Palaont.*, Berlin, 1926, No. 14, pp. 253–566.
36. Hauck F., Introduction, In: *L'agriculture itinérante et la conservation des sols en Afrique*, *Bulletin pédologique de la FAO*, Rome: FAO, 1974, No. 24, pp. 1–5.
37. Karpoff A.M., Bocquier G., Isnard P., Tardy Y., Géochimie d'une toposéquences de sols tropicaux du Tchad. Utilisation des méthodes statistiques, *Sci. Géol. Bull.*, Strasbourg, 1973, Vol. 26, No. 4, 315 p.
38. Leneuf N., L'altération des granites calco-alcalins et des granodiorites en Côte d'Ivoire forestière et les sols qui en sont derives, *ORSTOM, Thèse Fac. Sci.*, Paris, 1965, 210 p.
39. Maignien R., Soil cuirasses in tropical West Africa, *Soils Africa*, 1959, No. 4, pp. 4–41.
40. McGrath D.G., The role of biomass in shifting cultivation, *Human Ecology*, 1987, No. 15 (2), pp. 221–242.
41. Mohr E.C., van Varen F.A., *Tropical soils*, London, 1954, 320 p.
42. Nye P.H., Greenland D.J., The Soil under Shifting Cultivation, *Technical Communication. Harpenden*, 1960, No. 51, 156 p.
43. Nye P.H., Greenland D.J., Changes in the soil after clearing tropical rainforest, *Plant and Soil*, 1964, No. 21, pp. 101–112.
44. Pias J., Les sols du Tchad, *ORSTOM*, Collection de Référence, Paris, 1964, pp. 145–151.
45. *Référentiel pédologique 2008*, Versailles: Éditions Quæ, 2009, 405 p.
46. République du Tchad. Carte Pédologique du Tchad 1 : 1 000 000, Pias J., *ORSTOM*, 1964.
47. Robequain Ch., Études géologiques et pédologiques dans la cuvette du Tchad, In: *Annales de Géographie*, 1956, Vol. 65, No. 348, pp. 151–153.
48. Schwertmann U., Some properties of soil and syntetic iron oxides, *Iron in soil and clay minerals*, Dordrecht: Reidel, 1988, pp. 203–250.

49. Tursina T., Sokolov I., Shishov L., New hypothesis of the genesis of red ferrallitic soils, *Micromorphology*, Adelaide, 1992, 27 p.
50. Stoops G. (Ed.), Evolution of tropical soil science: past and future, Academie royale des past and future, Workshop Brussels, 2003, 157 p.
51. *World reference base for soil resources 2014*, International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps, Update 2015, 203 p.

Научное издание

Бюллетень Почвенного института
имени В.В. Докучаева

Выпуск 99

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 15.12.2019 г.
Подписано в печать 15.12.2019 г.
Формат 60×84/16. Бумага офсетная.
Усл. печ. л. 10 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