

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

V.V. DOKUCHAEV SOIL SCIENCE INSTITUTE

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

Vol. 97

Moscow
2019

<https://bulletin.esoil.ru>

ББК П03
Б 98
УДК 631.4

Главный редактор

А.Л. Иванов, академик

Редакционная коллегия:

А-Ксин Джу (университет Висконсина, США)
Б.М. Когут (Почвенный институт, Москва)
Л. Монтанарелла (Институт окружающей среды и устойчивого развития Объединенного исследовательского центра Европейской комиссии (IES JRC), Италия)
А. Б. Розанов (Университет Стелленбош, ЮАР)
И.Ю. Савин, член-корреспондент (Почвенный институт, Москва) (*зам. гл. ред.*)
И.А. Тихонович (Санкт-Петербургский университет), академик РАН)
Г. Тот (Университет Паннонии, Венгрия)
Н.Б. Хитров (Почвенный институт)
Ю.Г. Чендев (белгородский государственный университет)
А.З. Швиденко (Международный институт прикладного системного анализа, Австрия)
Т. Шишков (Институт почвоведения им. Н. Пушкарлова, Болгария)

Editor-in-chief:

A.L. Ivanov, Academician

Editorial board:

A-Xing Zhu (University of Wisconsin, USA)
Kogut B.M. (Soil Science Institute)
Montanarella L. (Institut für Umwelt und nachhaltige Entwicklung der Gemeinsamen Forschungsstelle der Europäischen Kommission (IES GFS), Italien)
Rozanov A.B. (Stellenbosh University, SAR)
Savin I.Yu. corresponding member (Soil Science Institute) (Deputy of editor-in-chief)
Tikhonovich I.A. (Sankt-Petersburg State University, Russia)
Toth G. (University of Pannonia, Hungary)
Khitrov N.B. (Soil Science Institute)
Chendev Yu.G. (Belgorod State University, Russia)
Shvidenko A.Z. (IIAAS, Austria)
Shishkov T. (Institut für Bodenkunde ihnen. N. Poushkarov, Bulgarien)

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

© V.V. Dokuchaev Soil Science Institute, 2019

СОДЕРЖАНИЕ

Проблема масштаба в современной почвенной картографии И. Ю. Савин	5
Почвы восточного Приольхонья на побережье озера Байкал: современное состояние и использование И. А. Белозерцева, Д. Н. Лопатина, Н. А. Зверева.....	21
Комбинация засоленных почв северного склона возвышенности Ергени после прекращения орошения Н. Б. Хитров, И. Н. Горохова, Е. И. Кравченко	52
Способ подготовки образцов почв для определения контактного угла смачивания методом сидячей капли Н. В. Матвеева, Е. Ю. Милановский, О. Б. Рогова	91
Молекулярно-массовый состав гуминовых кислот городских почв (на примере САО г. Москвы) А. И. Филатова, В. Г. Мамонтов, П. Ю. Панова.....	113
Влияние гуминовых препаратов на свойства деградированных почв техногенных пустошей П. Н. Трегубова, Г. Н. Копчик, А. Л. Степанов, А. А. Степанов, М. Ю. Корнеечева, Ю. В. Куприянова.....	129
Параметры моделей вертикальной миграции в почвах тяжелых металлов в окрестности завода по производству свинца и сурьмы А. С. Фрид, Т. И. Борисочкина	150
Закономерности миграции ^{137}Cs в аллювиальной почве С. М. Пакшина, Л. П. Харкевич, Н. М. Белоус, Е. В. Смольский	165

CONTENTS

The scale problem in modern soil mapping	
I. Yu. Savin.....	5
Soils of the eastern Priol'khonye on the coast of the Lake Baikal: current state and use	
I. A. Belozertseva, D. N. Lopatina, N. A. Zvereva.....	21
Combination of saline soils of the Northern slope of the Ergeni upland after irrigation cessation	
N. B. Khitrov, I. N. Gorokhova, E. I. Kravchenko.....	52
The method of preparing soil samples for soil – water contact angle measurement using sessile-drop technique	
N. V. Matveeva, E. Yu. Milanovsky, O. B. Rogova	91
Molecular weight composition of humic acids in urban soils (the Northern Administrative District of Moscow city taken as an example)	
A. I. Filatova, V. G. Mamontov, P. Yu. Panova.....	113
Influence of humic preparations on degraded soils properties of technogenic barrens	
P. N. Tregubova, G. N. Koptsik, A. L. Stepanov, A. A. Stepanov, M. Yu. Korneicheva, Yu. V. Kupriianova	129
Parameters of mathematical models for vertical migration of heavy metals in soils in the area of lead and antimony plant	
A. S. Frid, T. I. Borisochkina.....	150
Regularities of migration ¹³⁷ Cs in the alluvial soil	
S. M. Pakshina, L. P. Harkevich, N. M. Belous, E. V. Smolsky	165

ПРОБЛЕМА МАСШТАБА В СОВРЕМЕННОЙ ПОЧВЕННОЙ КАРТОГРАФИИ

© 2019 г. И. Ю. Савин

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

*Аграрно-технологический институт РУДН,
Россия, 117198, Москва, ул. Миклухо-Маклая, 6*

<http://orcid.org/0000-0002-8739-5441>, e-mail: savin_iyu@esoil.ru.

*Поступила в редакцию 10.01.2019, после доработки 04.03.2019,
принята к публикации 28.05.2019*

Одной из особенностей перехода от традиционной почвенной картографии к цифровым технологиям составления и использования почвенных карт является качественное изменение как понятия “карта”, так и понятия “масштаб карты”. Под картой в цифровой картографии понимается пространственно-координированная база данных, которая может состоять из многих слоев информации и может быть визуализирована в любом масштабе. Масштаб традиционно составленных бумажных почвенных карт имеет большое значение для понимания смысловой нагрузки карты и степени ее генерализованности. При использовании цифрового картографирования почв понятие “масштаб” теряет свое значение. Это происходит потому, что уровень генерализованности информации о почвах в этом случае определяется не тем, в каком масштабе карта визуализирована на экране монитора компьютера или распечатана, а тем, с каким размером пикселя карта создана (в случае растровых карт), или тем, какая карта служила основой для создания векторного слоя почвенной карты. Для растровых почвенных карт более логично оперировать понятием “размер пикселя” вместо “масштаб”. Для векторных почвенных карт важнее указывать масштаб исходной почвенной карты (которая была векторизована), а не масштаб их визуализации. Масштаб визуализации цифровой почвенной карты не важен при компьютерном (цифровом) прикладном анализе почвенных данных. При создании растровых почвенных карт нельзя использовать исходные материалы разных масштабов без их приведения к единому уровню генерализованности. Все это необходимо учитывать при использовании цифровых технологий картографирования почв.

Ключевые слова: почвенная карта, генерализация, картографирование почв.

DOI: 10.19047/0136-1694-2019-97-5-20

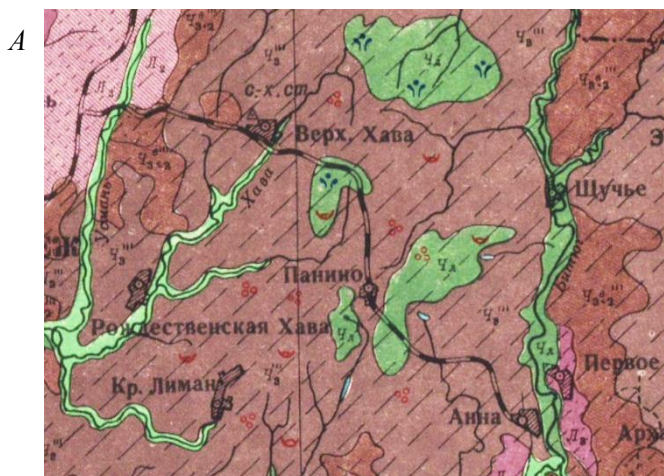
ВВЕДЕНИЕ

Традиционное картографирование почв является трудоемкой и дорогостоящей процедурой. Именно поэтому до сих пор во всем Мире невозможно создание детальных или хотя бы крупномасштабных почвенных карт на большие территории. Это же служит причиной того, что в традиционной (и не только почвенной) картографии является принятым выделение набора уровней обобщения (масштабов) для решения практических задач ([Салищев, 1987](#)). Так в советское время создание почвенных карт для решения производственных задач осуществлялось на уровне хозяйства (масштаб 1 : 10 000 – 1 : 50 000), на уровне административного района (масштаб 1 : 50 000 – 1 : 100 000), на уровне областей (масштаб 1 : 200 000 – 1 : 500 000) и на уровне всей страны (масштаб 1 : 1 000 000 – 1 : 4 000 000) ([Долгова, 1979](#); [Савин и др., 2015](#)).

На каждом уровне обобщения почвенные карты создавались с использованием разных подходов. В основе создания крупномасштабных почвенных карт лежала крупномасштабная топооснова, иногда детальные аэрофотоснимки, а также результаты полевых обследований маршрутным или маршрутно-ключевым методами. Почвенные карты средних масштабов создавались в основном с использованием среднемасштабных топокарт, иногда результатов дешифрирования растительности и почв по космическим снимкам, а также результатов генерализации имеющихся крупномасштабных почвенных карт. Очень редко, но все же использовались результаты маршрутных наблюдений и обследований. Почвенные карты мелких масштабов всегда были концептуальными и составлялись преимущественно путем генерализации среднемасштабных почвенных карт и уложения результатов генерализации на мелкомасштабную топооснову ([Долгова, 1979](#); [Составление областных..., 1990](#)).

Необходимо отметить, что генерализация карт очень редко осуществлялась чисто механическим уменьшением контурной части карты до нужного масштаба. Этот процесс всегда был творче-

ским, экспертным. Почвовед-картограф всегда пытался сохранить характерные особенности почвенного покрова той или иной территории и отразить их, пусть даже и утрированно, на карте более мелкого масштаба. Так, к примеру, утрированно на картах мелкого и даже среднего масштаба показаны пойменные почвы многих рек, многие интразональные почвы. Часто не выражающиеся в масштабе карты, но важные для понимания строения почвенного покрова почвы, показывались на карте внесмасштабными знаками, которые могли быть как локализованными, так и равномерно распределенными по контуру карты (рис.1).



Бюллетень Почвенного института им. В.В. Докучаева. 2019. Вып. 97.
Dokuchaev Soil Bulletin, 2019, 97

Рис.1. Традиционная картографическая генерализация изображения почвенного покрова на почвенных картах (*A* – фрагмент листа Государственной почвенной карты с показом сопутствующих почв внемасштабными знаками; *B* – фрагмент геометрической части [ЕГРПР России \(2013\)](#) с утрированным изображением выделов аллювиальных почв (выдел показан стрелкой)).

Fig.1. Traditional generalization of soil cover image on soil maps (*A* is a fragment of a sheet of the State soil map where accompanying soils are marked with point symbols; *B* is a fragment of the geometric part of the [Unified State Register of Soil Resources of Russia \(2013\)](#) with an exaggerated representation of alluvial soils (highlighted by arrow)).

Ситуация качественно изменилась с переходом на цифровые технологии создания и хранения почвенных карт ([Берлянд, 1997, 2006](#); [Кошкарёв, Зинчук, 1990](#); [Лурье, 1997](#)). На первом этапе развития этих технологий бумажные почвенные карты, созданные традиционно, векторизовались, а их легенда превращалась в атрибутивную часть получаемой почвенно-географической базы данных ([Столбовой, 1993](#)).

Уже на этом этапе появилась возможность представления и распечатки векторных почвенных карт в ГИС в любом масштабе. То есть любую изначально крупномасштабную карту можно было показать на экране монитора или распечатать в мелком масштабе и наоборот. При этом, конечно же, увеличение мелкомасштабной почвенной карты до крупного масштаба не приводило к увеличению ее информативности и точности, а сильное уменьшение крупномасштабных карт вело к оптической генерализации мелких выделов, излишней изрезанности границ и потере части информации. При этом в базе данных ГИС вся информация хранилась в неизменном виде ([Савин, 2004](#)).

Дальнейшее “размывание” традиционного понятия масштаба почвенных карт произошло при переходе от векторных почвенных карт к растровым, при попытках использования цифровых спутниковых данных для картографирования почв ([Korolyuk, Shcherbenko, 1994](#); [Кравцова, 2000](#)) и при развитии методов так называемого “цифрового” картографирования почв ([Цифровая почвенная..., 2012](#); [Кравцова, 2014](#)).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Известно, что растровые карты отличаются от векторных тем, что элементарной пространственной единицей информации на растровой карте является пиксель, а на векторной – непосредственно почвенно-географический выдел. То есть в базе данных ГИС хранится информация о почвах именно этих объектов (выдела или пикселя). И как бы ни изменялся масштаб визуализации карты, информация в базе данных ГИС не прирастает и не исчезает. При этом уровень генерализации представленной на карте информации определяется тем, каков размер пикселя (на растровой карте) и минимального выдела (на векторной карте), и какая информация о почвенном покрове к ним привязана, а не масштабом, в котором карта визуализирована на экране монитора или выведена на печать.

Из вышесказанного следует несколько важных заключений:

1. Уровень генерализованности цифровой почвенной карты определяется не масштабом ее представления и визуализации, а уровнем обобщения исходной информации, которая служила в качестве основы для создания карты

Если векторная почвенная карта создавалась путем оцифровки (векторизации) традиционно составленной бумажной почвенной карты известного масштаба, то уровень генерализованности представленной на ней информации полностью соответствует уровню генерализованности исходной почвенной карты. Если почвенная карта изначально создана на основе растровой информации, то уровень генерализованности информации о почвенном покрове определяется размером пикселя и той информацией о почвенном покрове и почвах, которая к нему привязана.

Компьютерная техника в настоящий момент позволяет визуализировать (на экране монитора или в виде распечатки) цифровую карту в любом масштабе, но количество отраженной на карте информации и уровень ее обобщения при этом не изменяются (рис. 2).

Конечно же, пользователь воспринимает визуально разную картину, но при этом информация в базе данных ГИС остается и хранится в неизменном виде при любом варианте визуализации. И для цифрового анализа почвенных данных это наиболее важно.

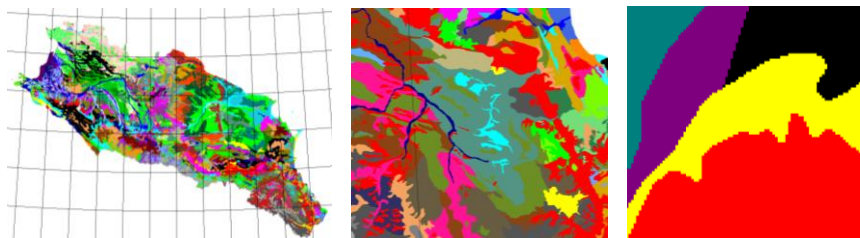


Рис. 2. Цифровая почвенная карта Северного Кавказа ([Драгавцева и др., 2016](#)) и ее фрагменты (слева в масштабе 1 : 5 млн (нанесена градусная сетка), в центре – увеличено до масштаба 1 : 500 000, справа – увеличено до масштаба 1 : 50 000).

Fig. 2. Digital soil map of the North Caucasus ([Drahavtseva et al., 2016](#)) and its fragments (on the left – the scale of 1 : 5 million (degree grid plotted)), in the center – exaggerated to the scale of 1 : 500.000, on the right – exaggerated to the scale of 1 : 50.000).

2. Для растровых почвенных карт более логично оперировать понятием “размер пикселя” вместо “масштаб”. Для векторных почвенных карт важнее указывать масштаб исходной почвенной карты (которая была векторизована), а не масштаб их визуализации

Масштаб визуализации карты также может быть указан, но он не будет нести той информации об уровне генерализованности карты, которую он имеет на традиционной бумажной почвенной карте (рис. 3).



Рис. 3. Фрагмент контурной части векторной почвенной карты исходного масштаба 1 : 2 500 000, визуализированный в масштабе 1 : 300 000.

Fig. 3. Fragment of the contour part of the soil map (vector format) with original scale 1 : 2.500.000, visualized in 1 : 300.000 scale.

То, что фрагмент карты на рисунке 3 визуализирован в среднем масштабе, не означает, что карта действительно средне-масштабная. Уровень генерализации отображения на ней почвенного покрова остается мелкомасштабным. И именно для того, чтобы можно было это понять, необходимо указывать масштаб исходной почвенной карты.

3. При создании растровых почвенных карт нельзя использовать исходные материалы разных масштабов без их приведения к единому уровню генерализованности

Современные цифровые технологии открыли широкие возможности для одновременного, сопряженного, анализа любой пространственной информации. Таким образом, при создании цифровой почвенной карты могут быть собраны в единую базу данных ГИС все имеющиеся карты отдельных факторов почвообразования, данные дистанционного зондирования и результаты их анализа, архивные почвенные карты и т.п. Все эти пространственные данные могут быть приведены к единой географической проекции и совмещены друг с другом (наложены друг на друга).

Но уровень генерализованности информации на этих первоисточниках может оставаться разным. Так, например, в последние годы для анализа рельефа местности часто используют цифровые модели SRTM с пространственным разрешением (размером пикселя) 90 м (<http://srtm.csi.cgiar.org/>). Но анализировать эти данные совместно с космическими изображениями с размером пикселя 1–2 метра (и даже 10–20 м) вряд ли правильно без предварительной генерализации спутниковых данных. Это связано с тем, что объекты, которые хорошо дешифрируются по спутниковым данным сверхвысокого пространственного разрешения, на SRTM часто генерализованы. Поэтому совместный анализ этих двух источников данных может привести к неправильным выводам и моделям пространственной организации почвенного покрова. Например, по данным SRTM участок представляет собой ровную территорию (рис. 4).

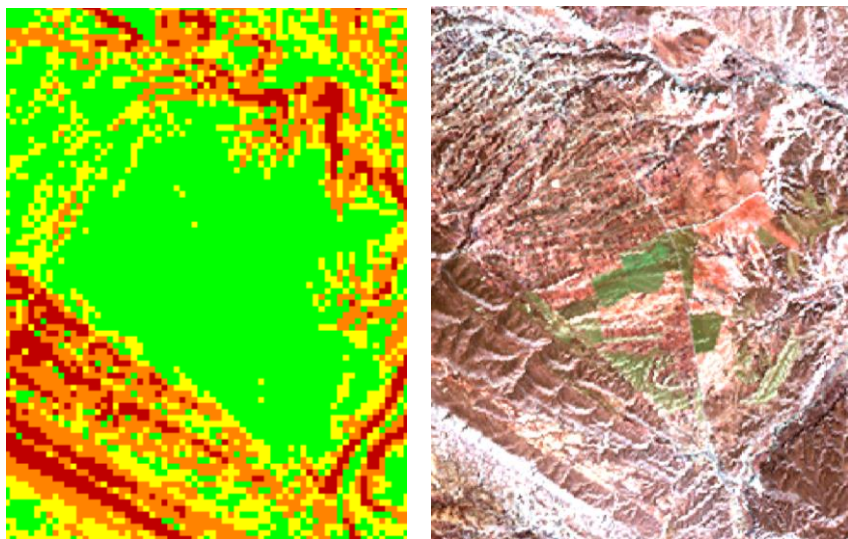


Рис. 4. Уклоны тестового участка по SRTM (размер пикселя 90 м, слева, зеленым цветом показаны уклоны менее 2°) и изображение Landsat (размер пикселя 30 м).

Fig. 4. The slopes of the SRTM test area (pixel having 90 m resolution, on the left, slopes less than 2 degrees are green coloured) and the Landsat image (30 m pixel resolution).

Но на космическом изображении Landsat на этом участке (рис. 3, справа) четко видны эрозионные неоднородности. В этом случае совместный анализ этих источников может привести к ошибочному выводу, что эродированные почвы расположены на ровной поверхности, а не на крутых склонах.

Также часто встречаются случаи, когда по SRTM детектируются крутые склоны, но на спутниковых изображениях на них видны потяжины с переувлажненными почвами. И совместный анализ этих данных может привести к ошибочному заключению, что переувлажненные почвы приурочены к крутым склонам.

Отсюда следует, что при анализе данных с разным пространственным разрешением они должны быть изначально приведены к одному уровню обобщения информации, либо более детальная информация должна быть сначала проанализирована, а затем результаты анализа – генерализованы, после чего станет возможным совместный анализ данных.

4. Масштаб визуализации цифровой почвенной карты не важен при компьютерном (цифровом) прикладном анализе почвенных данных

Прикладной анализ почвенных данных (например, при оценке пригодности почв и земель) в ГИС проводится в большинстве случаев на уровне пикселя. Даже в случае использования векторных почвенных карт они, как правило, сначала трансформируются в растровый формат. Это делается потому, что прикладной анализ почвенной карты в большинстве случаев проводится совместно с другими пространственными слоями информации, чаще всего информации о рельефе и о климате территории ([Савин, 2004](#); [Иванов и др., 2014](#)). И совмещение всех этих пространственных данных наиболее рационально проводить именно на пиксельном уровне. То есть, например, для геоинформационного анализа пригодности земель какой-либо территории для возделывания той или иной культуры создается база данных, включающая в себя пространственные слои параметров почв, рельефа, климата, которые приводятся к единой географической проекции и к единому размеру пикселя. Их пересечение друг с другом ведет к карте, к каждому пикселю которой привязаны в качестве атрибутов все параметры, имеющиеся в базе данных (почвенные, рельефа и климата). И, по сути, в этом случае пространственным объектом оценки на основе созданного пользователем алгоритма является каждый пиксель. Из этого следует, что вне зависимости от того, в каком масштабе информация визуализируется на экране монитора или распечатывается на бумаге, оценка ведется попиксельно и степень генерализованности информации зависит от размера пикселя, а не от того, в каком масштабе данные визуализированы на экране монитора компьютера.

5. О точности и кондиционности цифровых почвенных карт разного масштаба

В традиционной почвенной картографии вопрос кондиционности карты решается путем установления количества необходимых почвенных опробований (разрезов, прикопок и т.п.) при составлении карт разных масштабов. Так, для разных природных зон России в инструкциях по полевым почвенным обследованиям установлено количество разрезов, которое должно быть заложено и проанализировано, чтобы карта считалась кондиционной

Бюллетень Почвенного института им. В.В. Докучаева. 2019. Вып. 97.
Dokuchaev Soil Bulletin, 2019, 97

([Общесоюзная инструкция..., 1973](#)). В большей степени это, конечно же, относится к крупномасштабным и детальным почвенным картам, так как карты средних и мелких масштабов в основном составлялись путем генерализации крупномасштабных почвенных карт, но, безусловно, с привлечением имеющихся полевых данных и маршрутных полевых обследований.

При переходе к цифровой почвенной картографии вопрос о почвенных опробованиях и их необходимом количестве пока остается не до конца решенным. Качество цифровых почвенных карт, как правило, оценивают статистически, на основе проверочных выборок точек полевых обследований или же точек, “считанных” с обновляемой традиционно составленной почвенной карты. Считается, что для статистической оценки точности цифровой почвенной карты достаточно иметь несколько десятков точек с реальными данными ([Цифровая почвенная..., 2017](#)). Причем, пространственное расположение этих точек осуществляется либо случайно, либо по заданным правилам. При этом масштаб карт, как правило, вовсе не принимается во внимание.

Недостатком подобных подходов к оценке качества цифровых почвенных карт является то, что даже хорошие статистические оценки качества не гарантируют логичность получаемой карты с точки зрения экспертных знаний о географии почв региона исследований. И наоборот, получаемая карта может с точки зрения эксперта-почвоведа выглядеть вполне логично, но статистическая оценка ее качества при этом будет низкой ([Жоголев, 2016](#)).

На данном этапе развития цифровой картографии почв удовлетворительного решения этой задачи еще не найдено.

ВЫВОДЫ

Одной из особенностей перехода от традиционной почвенной картографии к цифровым технологиям составления и использования почвенных карт является качественное изменение как понятия “карта”, так и понятия “масштаб карты”. Под картой в цифровой картографии понимается пространственно-координированная база данных, которая может состоять из многих слоев информации и может быть визуализирована в любом масштабе.

Масштаб традиционно составленных бумажных почвенных карт имеет большое значение для понимания смысловой нагрузки карты и степени ее генерализованности. При использовании цифрового картографирования почв понятие “масштаб” теряет свое значение, так как уровень генерализованности информации о почвах в этом случае определяется не тем, в каком масштабе карта визуализирована на экране монитора компьютера или распечатана, а тем, с каким размером пикселя карта создана (в случае растровых карт), или тем, какая карта служила основой для создания векторного слоя почвенной карты.

Для растровых почвенных карт более логично оперировать понятием “размер пикселя” вместо “масштаб”. Для векторных почвенных карт важнее указывать масштаб исходной почвенной карты (которая была векторизована), а не масштаб их визуализации. Масштаб визуализации цифровой почвенной карты не важен при компьютерном (цифровом) прикладном анализе почвенных данных.

При создании растровых почвенных карт нельзя использовать исходные материалы разных масштабов без их приведения к единому уровню генерализованности.

Подходы к оценке точности и кондиционности создаваемых цифровых почвенных карт до сих пор недостаточно разработаны.

Все это необходимо учитывать при использовании цифровых технологий картографирования почв.

БЛАГОДАРНОСТЬ

Исследования выполнены при финансовой поддержке Гранта Президиума РАН 2019 года № 51 и гранта РФФИ № 18-016-00052.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Берлянд А.М. Геоинформационное картографирование. М.: МГУ, 1997. 62 с.
2. Берлянд А.М. Теория геоизображений. М.: ГЕОС, 2006. 262 с.
3. Долгова Л.С. Методика составления мелкомасштабных почвенных карт. М.: МГУ, 1979. 80 с.
4. Драгавцева И.А., Савин И.Ю., Загиров Н.Г., Казиев М.Р.А., Ахматова З.П., Моренец А.С., Батталов С.Б. Ресурсный потенциал земель

Бюллетень Почвенного института им. В.В. Докучаева. 2019. Вып. 97.
Dokuchaev Soil Bulletin, 2019, 97

Северного Кавказа для плодородства. Краснодар-Махачкала: ДагНИИСХ, 2016. 138 с.

5. *Единый государственный реестр почвенных ресурсов России. Версия 1.0* (ред. Иванов А.Л., Шоба С.А.). М.: Почвенный институт им. В.В. Докучаева. 2014, 768 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. М. 2016. 22 с.

7. *Иванов А.Л., Савин И.Ю., Егоров А.В.* Методология оценки ресурсного потенциала земель России для сельскохозяйственного производства (на примере хмеля) // Бюл. Почв. ин-та им. В.В. Докучаева. 2014. № 73. С. 29–94.

8. *Кошкарёв А.В., Зинчук Л.Н.* Произведения автоматической картографии. М.: Наука, 1990. 108 с.

9. *Кравцова В.И.* Генерализация аэрокосмического изображения: континуальные и дискретные снимки. М.: МГУ, 2000. 255 с.

10. *Кравцова В.И.* Дискретная пиксельная стереомодель: графическое моделирование. М.: Научный мир, 2014. 172 с.

11. *Лурье И.К.* Геоинформатика. Учебные геоинформационные системы. М.: Изд-во МГУ, 1997. 115 с.

12. *Общесоюзная инструкция по почвенным обследованиям и составлению крупномасштабных почвенных карт землепользования.* М.: Колос, 1973. 95 с.

13. *Салищев К.А.* 9. Проектирование и составление карт. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1987. 240 с.

14. *Составление областных среднемасштабных почвенных карт Нечерноземья с показом структуры почвенного покрова (рекомендации).* М.: Агропромиздат, 1990. 80 с.

15. *Савин И.Ю.* Анализ почвенных ресурсов на основе геоинформационных технологий: Автореф. дис. ... докт. с.-х. наук. М., 2004. 47 с.

16. *Савин И.Ю., Симакова М.С., Овечкин С.В.* Перспективы развития картографии почв в России // Почвенные и земельные ресурсы: состояние, оценка, использование. Материалы Первой Всероссийской открытой конференции. 2015. С. 274–279.

17. *Столбовой В.С.* Компьютерная картография почв и ее применение для планирования экологического землепользования. // География и картография почв. М. 1993. С. 291–301.

18. *Цифровая почвенная картография* (ред. Савин И.Ю., Докукин П.А.). М.: РУДН, 2017. 152 с.

Бюллетень Почвенного института им. В.В. Докучаева. 2019. Вып. 97.
Dokuchaev Soil Bulletin, 2019, 97

19. *Цифровая почвенная картография: теоретические и экспериментальные исследования* (ред. Иванов А.Л., Савин И.Ю., Сорокина Н.П., Самсонова В.П., Мешалкина Ю.Л., Конюшкова М.В.). М.: Почвенный институт им. В.В. Докучаева, 2012. 333 с.

20. Korolyuk T.V., Shcherbenko H.V. Compiling soil maps on the basis of remotely-sensed data digital processing: soil interpretation // International Journal of Remote Sensing. 1994. Vol. 15. No. 7. P. 1379–1400.

THE SCALE PROBLEM IN MODERN SOIL MAPPING

I. Yu. Savin

V.V. Dokuchaev Soil Science Institute,
Russia, 119017, Moscow, Pizhevskiy per., 7, build. 2

People's Friendship University of Russia,
Russia, 117198, Moscow, Miklukho-Maklay str., 6

<http://orcid.org/0000-0002-8739-5441>, e-mail: savin_iyu@esoil.ru

Received 10.01.2019, Revised 04.03.2019, Accepted 28.05.2019

One of the features of the transition from traditional soil cartography to digital technologies for compiling and using soil maps is a qualitative change in both the concept of “map” and the concept of “map scale”. A map in digital cartography is a spatially coordinated database that can consist of many layers of information and can be visualized at any scale. The scale of traditionally compiled paper soil maps is of great importance for understanding the semantic load of the map and the degree of its generalization. When using digital soil mapping, the concept of “scale” loses its meaning. This happens because the level of generalization of soil information in this case is not determined by the scale at which the map is visualized on the computer monitor or printed, but by what pixel size the map was created (in the case of raster maps) or which map served the basis for creating a vector layer of the soil map. For raster soil maps it is more logical to use the concept of “pixel size” instead of “scale”. For vector soil maps it is more important to indicate the scale of the original soil map (which was vectorized), rather than the scale of their visualization. The scale of visualization of the digital soil map is not important in the computer (digital) applied analysis of soil data. When creating raster soil maps, it is impossible to use source materials of different scales without bringing them to a unified level of generalization. All this must be taken into account when using digital soil mapping technology.

Keywords: soil map, generalization, soil mapping

REFERENCES

1. Berlyand A.M., *Geoinformatsionnoe kartografirovanie* (Geoinformative cartography), Moscow: Moscow State University 1997, 62 p.
2. Berlyand A.M., *Teoriya geiozobrazhenii* (Theory of geoimages), Moscow: GEOS, 2006, 262 p.
3. Dolgova L.S., *Metodika sostavleniya melkomasshtabnykh pochvennykh kart* (Methodological manual for small-scale soil mapping), Moscow: Moscow State University, 1979, 80 p.
4. Dragavceva I.A., Savin I.Ju., Zagirov N.G., Kaziev M.R.A., Ahmatova Z.P., Morenec A.S., Battalov S.B., *Resursnyj potencial zemel' Severnogo Kavkaza dlya plodovodstva* (Resource potential of the land of the North Caucasus for fruit growing), Krasnodar – Mahachkala: DagNIISH, 2016, 138 p.
5. *Edinyi gosudarstvennyi reestr pochvennykh resursov Rossii. Versiya 1.0* (Unified State Register of Soil Resources of Russia. Version 1.0), Eds. Ivanov A.L., Shoba S.A., Moscow: Pochvennyi institut im. V.V. Dokuchaeva, 2014, 768 p.
6. Zhogolev A.V., *Aktualizatsiya regional'nykh pochvennykh kart na osnove sputnikovykh i geoinformatsionnykh tekhnologii (na primere Moskovskoi oblasti): Avtoref. dis. ... kand. s.-kh. nauk* (Updating of regional soil maps based on satellite and geoinformatic technologies (using Moscow region as an example), Extended abstract of Cand. Agric. sci. thesis), Moscow, 2016, 22 p.
7. Ivanov A.L., Savin I.Yu., Egorov A.V., *Metodologiya otsenki resursnogo potentsiala zemel' Rossii dlya sel'skokhozyaistvennogo proizvodstva (na primere khmelya)* (Methodology of land resources evaluation in Russia for agriculture (using hop as an example)), *Dokuchaev Soil Bulletin*, 2014, No. 73, pp. 29–94.
8. Koshkarev A.V., Zinchuk L.N., *Proizvedeniya avtomaticheskoi kartografii* (Outputs of automated mapping), Moscow: Nauka, 1990, 108 p.
9. Kravtsova V.I., *Generalizatsiya aerokosmicheskogo izobrazheniya: kontinual'nye i diskretnye snimki* (Generalization of aero-space image: continual and discrete images), Moscow: Moscow State University, 2000, 255 p.
10. Kravtsova V.I., *Diskretnaya piksel'naya stereomodel': graficheskoe modelirovanie* (Discrete pixel stereomodel: graphic modeling), Moscow: Naychny mir, 2014, 172 p.
11. Lurye I.K., *Geoinformatika. Uchebnye geoinformatsionnye sistemy* (Geoinformatics. Educational geoinformatic systems), Moscow: Moscow State University, 1997, 115 p.

Бюллетень Почвенного института им. В.В. Докучаева. 2019. Вып. 97.
Dokuchaev Soil Bulletin, 2019, 97

12. *Obshchesoyuznaya instruktsiya po pochvennym obsledovaniyam i sostavleniyu krupnomasshtabnykh pochvennykh kart zemlepol'zovaniya* (All-Union instruction on soil survey and large-scale soil mapping), Moscow: Kolos, 1973, 95 p.

13. Salischev K.A., 9. *Proektirovanie i sostavlenie kart* (Designing and compilation of maps), Moscow: Moscow State University, 1987, 240 p.

14. *Sostavlenie oblastnykh srednemasshtabnykh pochvennykh kart Nechernozem'ya s pokazom struktury pochvennogo pokrova (rekomentatsii)*. M.: Agropromizdat (Compilation of middle-scale soil maps of Nechernozem'e with reflection of soli patterns (recommendations), Moscow: Agropromizdat, 1990, 80 p.

15. Savin I.Yu., *Analiz pochvennykh resursov na osnove geoinformatsionnykh tekhnologii: Avtoref. dis. ... dokt. s.-kh. nauk.* (Analysis of soil resources based on geoinformatic technologies, Extended abstract of Dr. Agric. sci. thesis), Moscow, 2004, 47 p.

16. Savin I.Yu., Simakova M.S., Ovechkin S.V., *Perspektivy razvitiya kartografii pochv v Rossii* (Perspectives of development of soil mapping in Russia), In: *Pochvennye i zemel'nye resursy: sostoyanie, otsenka, ispol'zovanie* (Soil and Land resources: status, evaluation, usage), Proc. of the 1st All-Russian open Conf., 2015, pp. 274–279.

17. Stolbovoi V.S., *Komp'yuternaya kartografiya pochv i ee primenenie dlya planirovaniya ekologicheskogo zemlepol'zovaniya* (Computer based soil mapping and its application for ecological land use planning), In: *Geografiya i kartografiya pochv* (Geography and mapping of soils), Moscow, 1993, pp. 291–301.

18. *Tsifrovaya pochvennaya kartografiya* (Digital Soil Mapping), Eds. Savin I.Yu., Dokukin P.A., Moscow: RUDN, 2017, 152 p.

19. *Tsifrovaya pochvennaya kartografiya: teoreticheskie i eksperimental'nye issledovaniya* (Digital soil mapping: theoretical and experimental investigations), Eds. Ivanov A.L., Savin I.Yu., Sorokina N.P., Samsonova V.P., Meshalkina Yu.L., Konyushkova M.V., Moscow: V.V. Dokuchaev Soil Science Institute, 2012, 333 pp.

20. Korolyuk T.V., Shcherbenko H.V., *Compiling soil maps on the basis of remotely-sensed data digital processing: soil interpretation*, *International Journal of Remote Sensing*, 1994, Vol. 15, No. 7, pp. 1379–1400.

Ссылки для цитирования:

Савин И.Ю. Проблема масштаба в современной почвенной картографии // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2019. Вып. 97. С.5-20. DOI: 10.19047/0136-1694-2019-97-5-20

Бюллетень Почвенного института им. В.В. Докучаева. 2019. Вып. 97.
Dokuchaev Soil Bulletin, 2019, 97

For citation:

Savin I.Yu. The scale problem in modern soil mapping, Dokuchaev Soil Bulletin, 2019, V. 97, pp. 5-20, DOI: 10.19047/0136-1694-2019-97-5-20

ПОЧВЫ ВОСТОЧНОГО ПРИОЛЬХОНЬЯ НА ПОБЕРЕЖЬЕ ОЗЕРА БАЙКАЛ: СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И ИСПОЛЬЗОВАНИЕ

© 2019 г. И. А. Белозерцева^{1,2*}, Д. Н. Лопатина^{1},
Н. А. Зверева¹**

¹*Институт географии им. В.Б. Сочавы СО РАН, Россия,
664033, Иркутск, ул. Улан-Баторская, 1,*

^{*}*<https://orcid.org/0000-0001-7995-2298>, e-mail: belozia@mail.ru*

^{**}*<https://orcid.org/0000-0002-2696-0822>*

²*Иркутский государственный университет, Россия,
664011, Иркутск, ул. Сухэ-Батора, 5*

*Поступила в редакцию 27.09.2018, после доработки 28.03.2019,
принята к публикации 28.05.2019*

Летом 2015–2017 гг. в составе комплексных экспедиций проведены почвенно-геохимические исследования в восточном Приольхонье. Всего отобрано более 120 образцов почв для последующего физико-химического анализа. В статье приведены некоторые физико-химические свойства почв степных и луговых ландшафтов восточного Приольхонья на территории самого посещаемого туристами западного побережья озера Байкал в его средней котловине. На побережье и в присклоновой поверхности распространено несколько типов почв: каштановые, темногумусовые, серогумусовые, серые, аллювиальные торфяно-глеевые и аллювиальные перегнойно-глеевые, также встречаются черноземы, аллювиальные темногумусовые, аллювиальные серогумусовые и др. Вследствие специфичных природных условий формируются самобытные почвы, например, “каштановидные”, которые в Иркутской области нигде более не встречаются. Большинство исследуемых почв имеют преимущественно маломощный сильно- и среднекаменистый профиль, легкий гранулометрический состав, относительно высокое содержание гумуса, преимущественно нейтральную и слабощелочную реакцию, среднее и низкое содержание азота по отношению к углероду. Результаты проведенных исследований показали, что почвы рекреационной зоны, а также на месте древнего городища имеют повышенное содержание тяжелых металлов (ТМ), превышающее санитарно-гигиенические нормы. Экологическое состояние почв степных ландшафтов Приольхонья на побережье озера Байкал на современном этапе можно характеризовать средней степенью антропогенного

загрязнения. Геохимическими барьерами являются органогенный и щелочной. Однако вследствие легкого гранулометрического состава почв может происходить загрязнение вод береговой зоны озера. Выявлено, что почвы лугово-болотных ландшафтов побережья не загрязнены ТМ, так как малодоступны для автотранспорта неорганизованного туризма.

Ключевые слова: каштановые, темногумусовые и аллювиальные почвы, рекреация, загрязнение, западное побережье озера Байкал.

DOI: 10.19047/0136-1694-2019-97-21-51

ВВЕДЕНИЕ

Территория исследования (рисунок) находится на берегу самого глубокого и чистого озера планеты, объекта всемирного наследия ЮНЕСКО, – Байкала. Частично рассматриваемая территория входит в состав Прибайкальского национального парка. Одним из самых привлекательных мест для туристов является Приольхонье. Побережье оз. Байкал в окрестностях р. Сарма входит в подтаежно-степной пояс, где светлохвойные лиственничные и сосновые леса соседствуют со степными участками. На территории исследования распространены почвы предгорных сухих степей. Западное побережье оз. Байкал в районе Приольхонья является наиболее посещаемой туристами территорией. В Приольхонье ежегодно приезжает около 50 тыс. туристов.

Относительно сухой климат, геоморфологические особенности, а также относительно теплая вода побережья Малого моря из-за небольшой его глубины создают специфичные природные условия в Приольхонье на побережье оз. Байкал, которые нигде более в Иркутской области не встречаются и привлекают много туристов. Данное живописное место по условиям можно смело назвать “Байкальский Крым”. В рекреационном использовании территории района доминирует автотуризм в сочетании с палаточным отдыхом у воды, далее следуют турбазы и базы отдыха. Большинство отдыхающих приезжают на автомобилях. Наиболее высок уровень антропогенного воздействия на ландшафт вдоль путей сообщения и на побережье. Отсутствие спланированной сети дорог приводит к тому, что появляются все новые и новые дороги, вдоль которых наблюдается активная дорожная эрозия и формирование временных водотоков. Территория побережья испещрена следами обустройства временных туристических стоя-

нок, установки и обкопки палаток, кострищами. К сожалению, с каждым годом антропогенная нагрузка, связанная с рекреационной деятельностью, в Приольхонье возрастает вследствие появления десятков новых туристических баз и неорганизованного палаточного туризма.

Целью исследования является изучение морфологических, химических и физико-химических свойств почв степных и луговых ландшафтов восточного Приольхонья на побережье оз. Байкал, выявление степени их загрязнения ТМ.

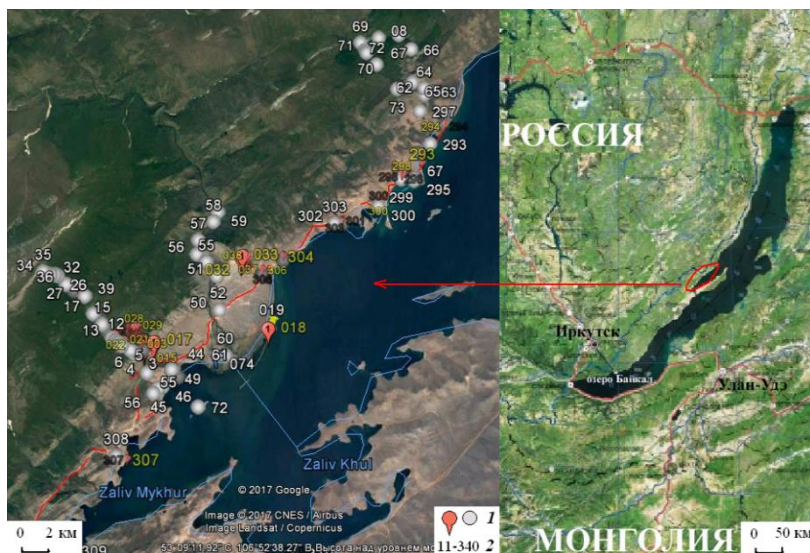


Рисунок. Территория исследований – восточное Приольхонье: 1– ключевой участок, 2 – номер площадки.

Figure. Research territory – the Eastern Priol'khonye: 1 – key studied area, 2 – plot number.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Физико-географические условия почвообразования.

Приольхонье относится к Предсаянской провинции подтаежной зоны Среднесибирского сектора. В соответствии с более детальной схемой физико-географического районирования ([Атлас..., 2004](#)) территория входит в Западнобайкальскую светлохвойную таежную с фрагментами степей провинцию Байкало-

Джугджурской гольцово-горно-таежной физико-географической области. В Приольхонье выделяется несколько высотных поясов растительности: возвышенное плато с горными степями и разреженными остепненными лиственничными лесами; подгорный подтаежных светлохвойных лесов; низкогорный остепненных лугов и степей; низкогорный таежных светлохвойных и вторичных мелколиственных травяных лесов; среднегорный таежных светлохвойных и смешанных темнохвойных лесов; кедрово-лиственничный редколесий и ерников; горная тундра. Степная растительность широко развита в Приольхонье и на о. Ольхон. Здесь произрастают степные сообщества с высоким уровнем узко локального эндемизма и древними разновозрастными ксерофильными реликтами ([Касьянова, Азовский, 2016](#)). На выходах коренных пород и скалистых участках побережья встречаются криоксеропетрофитные типчаково-тимьяновые степные группировки, в межгивных понижениях – комплексы полынно-типчаково-вострецовых и ковыльно-житняковых степей, заслуживающих особой охраны.

Ландшафты побережья оз. Байкал активно используются для рекреации и испытывают значительную антропогенную нагрузку. Наблюдаются процессы переуплотнения и эрозии почв, уменьшение продуктивности растительности ([Znamenskaya et al., 2018](#)).

На Приольхонском плато сохранился древний “добайкальский” геоморфологический ландшафт с синхронным ему прерывистым плащом глубоко выветрелых пород, которые сформировались в субтропических условиях позднемеловой-раннепалеогеновой эпохи. Древний рельеф плато сохранился в слабо измененном виде благодаря сухому климату и более или менее стабильному положению поверхности Приольхонского тектонического блока, зажатою между поднятым и опущенным плечом Байкальского рифта – Прибайкальским хребтом и Байкальской впадиной. На побережье оз. Байкал распространены кристаллические сланцы, гнейсы, мраморы и другие метаморфические породы. Широко представлены четвертичные обломочные коры выветривания и их дериваты. Локально обнаруживаются остатки древних глинистых красноцветных и пестроцветных кор выветривания.

Резкая континентальность климата, экстремальный гидро-термический режим определяют своеобразные признаки и свой-

ства почв. Для большинства почв побережья оз. Байкал в Приольхонье характерен непромывной тип водного режима. Годовой режим влажности почв имеет следующие особенности: влага поступает в почву неравномерно – основное количество осадков относится к апрелю – октябрю (максимально влажный период: июль – август), коэффициент увлажнения 0.35–0.60. Годовая сумма осадков в степных районах не превышает 200–300 мм, возрастая в горно-таежном поясе до 350–450 мм ([Атлас..., 2004](#)). Это самый аридный участок вокруг Байкала. Недостаток атмосферного увлажнения усугубляется здесь высокой водопроницаемостью щебнисто-суглинистых почв и грунтов. Следствие экстремальных почвенно-климатических условий – низкая биопродуктивность.

Объектом исследования являются почвы степных и луговых ландшафтов восточного Приольхонья. Приольхоньем называется территория, примыкающая к острову Ольхон и расположенная на юго-западном побережье оз. Байкал. В неотектонической структуре территория представляет собой промежуточную ступень между Приморским хребтом и южной котловиной Байкала. С юго-востока она ограничена Приольхонским, а с северо-запада – Приморским сбросами ([Гутарева, 2009](#)).

Летом 2015–2017 гг. в составе комплексных экспедиций были проведены исследования почвенного покрова в восточном Приольхонье. Всего отобрано более 120 образцов почв для последующего физико-химического анализа.

Пробоподготовка и выполнение анализов физико-химических свойств почв осуществлялась в Химико-аналитическом центре Института географии им. В.Б. Сочавы СО РАН по общепринятым методикам: содержание органического углерода ($C_{орг}$) – методом мокрого сжигания по Тюрину ([Аринушкина, 1970](#)); содержание общего азота ($N_{общ}$) – по Кьельдалю с фотоколориметрическим окончанием по методу индофеноловой зелени ([ГОСТ 26107-84](#)); актуальная кислотность водной суспензии ($pH_{водн.}$) – потенциометрически ([Аринушкина, 1970](#)); потеря при прокаливании – по Аринушкиной ([Аринушкина, 1970](#)); гранулометрический состав – методом пипетки с диспергацией пирофосфатом натрия по Качинскому ([Вадюнина, Корчагина, 1986](#)); содержание в почвах и породах макро- и микроэлементов определено атомно-эмиссионным

Бюллетень Почвенного института им. В.В. Докучаева. 2019. Вып. 97.
Dokuchaev Soil Bulletin, 2019, 97

спектральным методом на приборе Optima 2000DV (Optical Emission Spectrometer) ([ПНДФ 16.1:2.3:3.11-98](#)). Химико-аналитический центр института лицензирован, входит в Центр коллективного пользования ИНЦ СО РАН.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Использование земель Приольхонья. Антропогенное воздействие на ландшафты за весь период хозяйственного освоения во время советского этапа было самым интенсивным. Основные отрасли экономики Приольхонья в 1930–1980 гг. – это сельское и лесное хозяйство, добыча полезных ископаемых. Активно развивалась рыбопромысловая отрасль. Добыча полезных ископаемых в Приольхонье велась преимущественно на мелких месторождениях железных и марганцевых руд, пегматитов, фосфоритов, микрокварцитов, строительных материалов и полудрагоценных камней.

Скотоводческая пастбищно-выгонная специфика землепользования была хорошо выражена в 1930-е годы. Наиболее сильную нагрузку пастбищные угодья испытывали в 1965–1985 гг. ([Экологически..., 2004](#)). Большинство пастбищных земель относилось к низкопродуктивным сухостепным. Нерегулируемый выпас скота вызывал механическое нарушение почв и почвенного покрова вплоть до его уничтожения на отдельных участках, деградацию почв, дигрессию растительного покрова. Современный этап, начавшийся в 1990-е годы и продолжающийся по настоящее время, охарактеризовался определенным изменением прежних форм природопользования, свертыванием сельскохозяйственной деятельности, рыболовства, заготовок леса, недропользования. Ведущее значение стали приобретать туризм и рекреация.

В настоящее время в структуре сельскохозяйственных угодий Ольхонского района около 76 % приходится на горные пастбища, 12 % – на сенокосы и 11 % – на пашни. В границах отдельных хозяйств имеются небольшие участки лесов, древесно-кустарниковой растительности, ручьев, болот, озер. Пахотные почвы зацебнены, а в Онгуренской системе расселения они еще и сильно каменисты, завалунены. Из-за сухого климата они низкопродуктивны. Пастбища – главный вид использования сельскохозяйственных земель в районе. Они все отнесены к горному типу,

среди которых преобладают низкопродуктивные сухостепные угодья.

В рекреационном использовании территории преобладает автотуризм с палаточным отдыхом (более 50 тыс. туристов за сезон). Также на побережье располагаются сотни турбаз и баз отдыха ([Экологически..., 2004](#)). В пиковый сезон нагрузка возрастает, практически все берега заняты палаточными лагерями отдыхающих. Базы отдыха на побережье Малого моря расположены на незначительном расстоянии друг от друга. Некоторые базы размещаются на крутых эрозионно-опасных склонах в береговой полосе озера. Имеется несколько “диких” туристических троп, расположенных по водосборам рек Сарма, Курма, Харга и ручья Ланинский. Тропы проложены от берегов оз. Байкал к гольцам Приморского хребта. В подгольцовой и гольцовой зоне тропы теряются. Туристические тропы плохо обустроены, заросшие, часто труднопроходимые. Основное количество отдыхающих концентрируются на побережье оз. Байкал. Хотя уже в нескольких сотнях метров от побережья располагаются естественные таежные ландшафты.

Наиболее высок уровень антропогенного воздействия на ландшафты вдоль путей сообщения и на побережье. Отсутствие спланированной сети дорог приводит к тому, что появляются все новые и новые дороги. Вдоль них происходит активная дорожная эрозия, формируются временные водотоки ([Кузьмин, Данько, 2011](#)). Территория побережья испещрена следами обустройства временных туристических стоянок, установки и обкопки палаток, кострищами, свалками бытовых отходов.

Вместе с тем в связи со снижением основных показателей деятельности сельскохозяйственных, лесопромышленных и горнодобывающих предприятий в настоящий момент для территории Приольхонья в целом отмечается уменьшение сельскохозяйственного и промышленного воздействия на ландшафты и увеличение рекреационного влияния.

Географические закономерности распространения почв.

Согласно почвенно-экологическому районированию (масштаб 1 : 5 000 000) ([Belozertseva et al., 2015](#)) территория исследования входит в предгорный и низкогорный округ о. Ольхон и Приольхо-

нья каштановых, серогумусовых, петроземов, литоземов, карбо-петроземов и карболитоземов, местами серых, дерново-подбуров и подбуров согласно современной классификации и диагностике почв России ([Классификация..., 2004](#)). Округ входит в Прибайкальскую предгорную, высоко-, средне- и низкогорную провинцию преимущественно среднemocных, суглинистых, слабокислых, нейтральных и слабощелочных, умеренно, периодически недостаточно и мало увлажненных, холодных, длительно промерзающих среднего и невысокого естественного плодородия почв.

В наиболее засушливом, более теплообеспеченном предгорном и низкогорном округе Иркутской области – о. Ольхон и Приольхонье – отмечается большое разнообразие почв с преобладанием степного типа почвообразования.

На почвенной карте В.А. Кузьмина ([Кузьмин, 2004](#)), опубликованной в атласе Иркутской области (Масштаб 1 : 2 500 000) на побережье Приольхонья выделены каштановые, дерновые степные, каштановидные, дерновые лесные, степные бескарбонатные, в предгорьях, склонах и водоразделах среднегорья – перегнойно-карбонатные, дерново-карбонатные, дерновые лесные, дерново-подзолистые, подзолистые, подзолы и подбуры.

На почвенной карте Иркутской области (масштаб 1 : 500 000), составленной группой ученых под редакцией В.Т. Колесниченко и К.А. Уфимцевой ([Колесниченко, Уфимцева, 1988](#)), Приольхонье и о. Ольхон представлен каштановыми, дерново-карбонатными выщелоченными, дерново-перегнойно-карбонатными, дерновыми лесными, подзолистыми, подбурами, подзолами.

На той же широте равнинной Европейской территории России, по почвенно-географическому районированию Г.В. Добровольского и И.С. Урусевской ([Добровольский, Урусевская, 2006](#)), выделяется зона черноземов и серых лесных почв. Согласно данному районированию почв России и сопредельных территорий исследуемая территория Приольхонья входит в Северо-Прибайкальскую горную провинцию. Однако, несмотря на сибирские горные условия в Байкальском регионе, при благоприятных орографических условиях широтная зональность имеет существенное влияние на локальных территориях. На противополож-

ном более выровненном восточном берегу оз. Байкал почвы степных и сухостепных ландшафтов уже имеют широкое распространение. В Прибайкалье почвы лесостепей, по Г.В. Добровольскому и И.С. Урусовой ([Добровольский, Урусовская, 2006](#)), выделены западнее на территории Иркутско-Черемховской равнины. Приольхонье и о. Ольхон из-за малых размеров в отдельный округ на почвенных картах России не выделяют, обычно они присоединены к горным провинциям соседних территорий.

В предгорных сухих степях Приольхонья сформировались каштановые и так называемые “каштановидные” почвы ([Кузьмин, 2004](#); [Воробьева, 2009](#); [Кузьмин, Данько, 2011](#)), которые имеют небольшое распространение в целом по Иркутской области (менее 1 %). Разнообразие и специфичность экологических условий почвообразования в бассейне определяет самобытность почв. Формирование сухостепных ландшафтов с каштановыми почвами связано с аридной горной зональностью (положением в дождевой тени). Современные почвы имеют преимущественно слаборазвитый и маломощный сильно- и среднекаменистый профиль. На склонах и водоразделах часто отмечаются выходы скальных пород. В условиях большего увлажнения, в падах и долинах временных водотоков Приольхонского плато формируются гумусово-гидрометаморфические и каштановые гидрометаморфизованные и глееватые почвы. В пределах менее увлажненных понижений сформировались черноземы глинисто-иллювиальные гидрометаморфизованные. Встречаются темногумусовые и черноземовидные почвы. В целом в структуре почвенного покрова предгорий Приморского хребта и Приольхонского плато доминируют органико-аккумулятивные серогумусовые почвы. Почвы речных долин в основном представлены аллювиальными перегнойно-глеевыми, аллювиальными торфяно-глеевыми, аллювиальными темногумусовыми, аллювиальными серогумусовыми почвами. В среднегорных таежных лесах Приморского хребта широко распространены подбуры и дерново-подбуры, встречаются подзолы. В широких заболоченных ложбинах с близким расположением многолетнемерзлотных пород сформировались торфяные олиготрофные почвы. В присклоновой поверхности встречаются серые почвы.

Большая часть почв расположена на склонах различной крутизны, поэтому имеет маломощный профиль, облегченный гранулометрический состав и различную степень защебененности. Характерной чертой почв исследуемой территории является высокое содержание гумуса в верхних горизонтах и резкое убывание его с глубиной.

Морфологические и физико-химические свойства почв.

Приведем краткое описание некоторых специфических ключевых площадок и морфологическое описание почв наиболее посещаемой туристами территории побережья оз. Байкал, а также на территории древнего городища.

Площадка № 3 расположена в долине ручья Ланинский у выхода из гор ниже центральной зоны Приморского разлома. Координаты: N 53°05'48.01", E 106°47'46.03", 657 м над уровнем моря. Площадка расположена на территории древней железоплавильни и городища (2180 и 2050 лет назад) ([Харинский, 2003](#)), где также пережигали древесину на древесный уголь для выплавки железа.

Почва: агро-урбокаштановая сильнокаменистая AJ-U/ВМК-ВМ-U/P/ВМ-САТ. Растительность: полынно-разнотравная степь. Во фрагментах горизонта урбик (U) почв видны включения обожженной глины и древесины. На глубине 20 см видны фрагменты четкой границы бывшего пахотного горизонта.

Морфологическое строение профиля почв разреза № 3:

AJ, 0–11 см – буровато-серый, легкосуглинистый, комковато-порошистой структуры, слабое вскипание от 10 %-ной HCl, пронизан корнями, с включениями разнoзернистой дресвы 2–9 мм до 15 %.

U/ВМК, 11–14 см – буровато-коричневый и каштановый, с фрагментами обожженной глины и древесины, легкосуглинистый, ореховато-призмoвидно-комковатый, слабое вскипание от 10 %-ной HCl, свежий с включениями щебенисто-дресвянистых фракций.

ВМ, 13–14 см – коричневатo-бурый, легкосуглинистый, ореховато-мелкопризматический, вскипает от 10 %-ной HCl, свежий, фрагментарный в виде линз.

U/P/ВМ, 14–20 см – буровато-темно-серый, супесчаный и легкосуглинистый с включениями угля и темной обожженной древеси-

ны, сверху залегают плотные хрупкие фрагменты, снизу более рыхлые супесчано-суглинистые отложения, вскипает от 10 %-ной HCl.

САТ, 20–42 см – светло-коричневый, призмовидно-крупнокомковатый, супесчаный, плотный, с включениями мелкозернистой дресвы и продуктов разрушения вышележащего углистого горизонта, вскипает от 10 %-ной HCl.

Площадка № 5 расположена на предгорном склоне Приморского хребта в центральной зоне Приморского разлома. Координаты: N 53°05'56.70", E 106°48'00.04", 589 м над уровнем моря. Правый берег руч. Ланинский, туристическая стоянка по тропе “Ланинская”. Рядом грунтовая автомобильная дорога. Почва: темно-гумусовая с погребенными гумусовыми горизонтами AUd-AU-AUC-[RU1]-[RU2]-C. Растительность: полынно-разнотравный остепненный луг, в понижениях с кустарниками и осокой. Погребенные горизонты могли образоваться в результате осыпей и оползней со склона крутизной более 15° на присклоновую поверхность, на которой заложен разрез. В районе исследования зафиксированы землетрясения и сдвиги земной поверхности. По данным Г.А. Воробьевой ([Воробьева, 2010](#)), самыми значительными были сейсмотектонические события в познесартанское время 14–12 тыс. лет назад и на рубеже позднего плейстоцена и голоцена 11–9 тыс. лет назад. По данным исследований ([Кузьмин, Данько, 2011](#)), в суббореальный период голоцена (4500–2500 лет назад) вновь наступила эпоха активизации геодинамических процессов, но степень этой активности была гораздо ниже, чем в раннем голоцене. В последние 2500 лет наметилась тенденция стабилизации геодинамических процессов.

Морфологическое строение профиля почв разреза № 5:

AUd, 0–9 см – темно-бурый, влажный, супесчаный тонкодисперсный, пылевато-мелкозернистый, пронизан корнями, задернован, с небольшой примесью среднезернистого песка, не вскипает от 10 %-ной HCl.

AU, 9–19 см – от темно-бурого до темно-серого, влажный, зернистой структуры, супесчано-суглинистый, с включениями среднезернистого песка и мелкозернистой дресвы до 5 %, не вскипает от 10 %-ной HCl, граница ясная и слегка волнистая.

AUC, 19–24(28) см – серый до темно-серого, сухой, супесчано-суглинистый, с включениями крупного песка до 20 % и разнотельной дресвы до 5 %, зернисто-пылеватый, не вскипает от 10 %-ной HCl, граница сильно волнистая с клинообразными вторжениями в нижележащий горизонт, размер клиньев до 5 см в глубину и до 7 см в ширину у основания.

[RU1], 24–31(34) см – от темно-серого до черного, супесчано-суглинистый, плотный, спрессован, супесчаная фракция пылеватая, включения в виде мелко- и среднетельной дресвы до 10 %, не вскипает от 10 %-ной HCl, граница сильно волнистая.

[RU2], 31–45 см – серовато-бурий слегка желтоватый, сухой, супесчано-суглинистый, пылеватый, плотнее вышележащего, с включениями мелкой дресвы до 1 %, не вскипает от 10 %-ной HCl, граница хорошо выраженная и ровная.

C, 45–64 см – желтовато-светло-коричневый, супесчаный, пылеватый, сухой, с включениями среднетельной дресвы около 1 %, среднетельной и крупнетельной щебня до 35–40 %, не вскипает от 10 %-ной HCl.

Площадка № 61 расположена в дельте р. Сарма с левого борта в 40 м от уреза воды в оз. Байкал. Прибрежная рекреационная зона оз. Байкал. Координаты: N 53°06'18.87", E 106°50'56.24", 477 м над уровнем моря. Торфяники, выведенные из пойменного режима р. Сарма, но подверженные подтоплению водами Байкала. В результате этого в торфянистых горизонтах наблюдается примесь аллювиальных отложений. Почва: аллювиальная торфяно-минерально-глеевая T-Tmr₁-Tmr₂-Tmr, g-CG-[Tmr]-[Tmr₁]. Растительность: осоковый луг.

Морфологическое строение профиля почв разреза № 61:

T, 0–15 см – коричнево-темно-серый, с примесью суглинистых включений, влажный, не вскипает от 10 %-ной HCl.

Tmr₁, 15–22 см – коричнево-серый, фрагментами коричнево-черный с примесью коричневой и серовато-коричневой супеси и суглинка, влажный, не вскипает от 10 % HCl.

Tmr₂, 22–34 см – от темно-серого до черного, с суглинистыми включениями, от влажного до сырого, при нажатии сочится вода, обладает специфическим сероводородным запахом, не вскипает от 10 %-ной HCl.

Tmr,g, 34–38 см – темно-серый с сизоватыми пятнами, суглинисто-супесчаный, сырой, с включениями мелко- и среднезернистого песка, не вскипает от 10 %-ной HCl.

CG, 38–44 см – сизо-темно-бурый, супесчано-суглинистый, сырой, с включениями небольшого количества мелкозернистого песка до 2–3 %, слабое вскипание от 10 %-ной HCl.

[Tmr], 43–50 см – бурый и буро-черный цвет дает смесь растительных остатков и мелкозема, а темно-серый – супесчано-суглинистые фракции (до 30 %), включения: растительные остатки до 70 %, выраженный специфический сероводородный запах, слабое вскипание от 10 %-ной HCl.

[Tmr_г], 50–60 см и глубже – то же, что и вышележащий горизонт, но промерзший (наблюдается сезонная мерзлота в виде смерзшегося торфа).

Площадка № 19 расположена в прибрежной рекреационной зоне, во внутренних частях дельты р. Сармы в 1 км от дороги и 200 м от уреза воды в оз. Байкал. Координаты: N 53°06'04.06", E 106°52'06.18", 487 м над уровнем моря. Выведена из пойменного режима. Почва: аллювиальная перегнойно-минерально-глеевая Tmr-THmr-Hmr₁-Hmr₂-Hmr,g-G-[THmr]-CG-[Hmr]-C. Растительность: осоково-разнотравный луг.

Морфологическое строение профиля почв разреза № 19:

Tmr, 0–4 см – темно-бурый, свежий, супесчано-суглинистые минеральные включения, вскипает от 10 %-ной HCl.

THmr, 4–10 см – темно-бурый с сероватым оттенком, минеральные включения суглинисто-супесчаные, увлажнен, вскипает от 10 %-ной HCl.

Hmr₁, 10–24 см – серовато-черный, минеральные включения супесчано-суглинистые, вскипает от 10 %-ной HCl.

Hmr₂, 24–28 см – черный, суглинисто-супесчаный, свежий, вскипает от 10 %-ной HCl.

Hmr,g, 28–31 см – сизовато-бурый, свежий, супесчано-суглинистый с включениями разнотравного песка до 10 % и мелкой дресвы до 5 %, вскипает от 10 %-ной HCl.

G, 31–35 см – сизо-темно-бурый, супесчано-суглинистый, с включениями разнотравного песка до 5 %, много неразложившихся растительных остатков, вскипает от 10 %-ной HCl.

[THmr], 35–44 см – темно-серый, супесчано-суглинистый, с большим количеством крупнозернистого песка и мелкой дресвы, чем выше лежащий, слабое вскипание от 10 %-ной HCl.

CG, 44–46 см – сизовато-темно-бурый, супесчано-суглинистый, увлажненный, включения растительных остатков, не вскипает от 10 %-ной HCl.

[Hmr], 46–52 см – темно-серый, с суглинистыми включениями, увлажненный, с включениями разнородного песка до 10 % и мелкой дресвы до 5–7 %, не вскипает от 10 %-ной HCl.

C, 52–70 см – аллювиально-пролювиальные отложения от разнородной гальки до мелких валунов, неокатанные или слабоокатанные обломки от среднего и крупного щебня до мелких глыб, не вскипает от 10 %-ной HCl.

Площадка № 50 расположена в 2 км к северо-востоку от Сарминского ущелья на структурной террасе присклоновой части Приморского хребта. Координаты: N 53°07'08.58", E 106°51'04.22", 573 м над уровнем моря. Прибрежная территория оз. Байкал ("условный" фон), испытывающая наименьшее рекреационное воздействие. Почва: серая со вторым гумусовым горизонтом АУ-АЕL-BEL-BEL[hh]-BTC. Растительность: участок остепненного луга с зарослями спиреи, вокруг травянистый листовенник разреженный.

Морфологическое строение профиля почв разреза № 50:

АУ, 0–10 см – коричневый, супесчано-суглинистый, пылевато-зернистый, сухой, пронизан корнями, задернован, с включениями небольшого количества разнородного песка и мелкой дресвы, не вскипает от 10 %-ной HCl.

АЕL, 10–20 см – серовато-коричневый, суглинистый, зернисто-комковатый, свежий, рыхлый, вскипает от 10 %-ной HCl.

BEL, 20–34 см – бурый, супесчано-суглинистый, комковатый, включения: разнородный песок до 10 % и мелкая дресва до 5 %, отдельные включения щебня, его обломки изоморфные, не уплотненные, слабое вскипание от 10 %-ной HCl, нижняя граница волнистая.

BEL[hh], 34–47 см – светло-бурый с фрагментами погребенного коричневатого, свежий, легкосуглинистый, комковатый, включения: разнородный песок до 10 % и дресва до 10–12 %, вскипает от 10 %-ной HCl.

BTC, 47–55 см – желто-серый, супесчаный, ореховато-комковатый, увлажненный, включения: мелкозернистый песок до 2 %, вскипает от 10 %-ной HCl.

Площадка № 52 располагается на уступе предгорного делювиального склона Приморского хребта, в 500 м к северо-западу от п. Сарма. Координаты: N 53°07'28.20", E 106°51'42.00", 518 м над уровнем моря. Территория побережья оз. Байкал с малой антропогенной нагрузкой, редко посещаемой туристами. Почва: темногумусовая с погребенным гумусовым горизонтом AUd-AU-AUC-[RU~]-C. Растительность: остепненный луг.

Морфологическое строение профиля почв разреза № 52:

AUd, 0–6 см – темно-серый, супесчано-суглинистый, пылеватый, сухой, пронизан корнями, задернован, граница отчетливая и ровная, вскипает от 10 %-ной HCl.

AU, 6–13 см – буровато-темно-серый, суглинок, пылевато-мелко-зернистый, сухой, включения – мелкозернистый песок до 2–3 %, вскипает от 10 %-ной HCl, граница постепенная.

AUC, 13–20 см – буро-темно-серый, суглинок, сухой, пылевато-мелкозернистый, небольшие включения песка и мелкой дресвы, вскипает от 10 %-ной HCl.

[RU~], 20–32 см – единый слой с двумя несколько отличающимися генерациями: 1) 20–25 см – серый, супесчаный, с большим количеством разнотонного песка до 40 %; 2) 25–32 см – чередование тонких слоев (0.5–0.7 см) темных с высоким содержанием гумуса, а между ними материал из вышележащей генерации, поэтому общий цвет этой генерации более темный. Граница между генерациями очень четкая, подчеркнута ярко выраженным черным гумусовым тонким прослоем. Нижняя граница всего слоя также очень четкая и также подчеркивается гумусовым тонким прослоем. Во второй генерации единично встречается мелкий щебень, легкосуглинистый, не вскипает от 10 %-ной HCl.

C, 32–43 см – желтовато-бурый, свежий, супесь, с включениями средне- и крупнозернистого песка до 10 % и мелкой дресвы до 30 %, не вскипает от 10 %-ной HCl.

Площадка № 55 располагается на побережье оз. Байкал по маршруту от Сарминского гольца на Приморском хребте до оз. Байкал. Координаты: N 53°05'19.12", E 106°48'07.54", 595 м над уровнем моря. Территория побережья оз. Байкал с большой антропогенной нагрузкой. Комплекс турбаз на берегу озера. Угол наклона поверхности 3°–5°. Почва: темногумусовая AU-AUC-Cca. Растительность: типчаково-тимьяновая степь.

Морфологическое строение профиля почв разреза № 55:

АУ, 0–23 см – буровато-темно-серый, суглинок, пылевато-зернистый, сухой, включения: мелкозернистый песок до 2–3 % и щебень до 5 %, вскипает от 10 %-ной HCl, граница ясная.

АУС, 23–30 см – буровато-серый, суглинок, сухой, мелко-зернисто-пылеватый, включения песка и щебня до 30 %, вскипает от 10 %-ной HCl.

С, 30–42 см – желтовато-светло-бурый, пылевато-комковатый, свежий, супесь с включениями песка до 10 % и щебня до 40 %, вскипает от 10 %-ной HCl.

Почвы некоторых участков по морфологическим признакам трудно диагностируются, т.к. находятся в переходной зоне от лесостепи к степи (например, разрез пл. № 50). В регионе наблюдается очень близкое соседство различных природных зон. Они оказывают влияние друг на друга. В некоторых почвах, в том числе и сухостепных ландшафтов, наблюдается высокое содержание органического углерода в верхних горизонтах.

В таблицах 1 и 2 приведены результаты некоторых физико-химических свойств почв ключевых участков побережья оз. Байкал. В результате проведенных исследований выявлено, что для темногоумусовой почвы (пл. 5) характерна нейтральная реакция среды по всему профилю. Остальные исследованные почвы имеют слабощелочную и щелочную реакцию. Верхние горизонты аллювиальной торфяно-минерально-глеевой, серой со вторым гумусовым горизонтом, а также нижние горизонты аллювиальной перегнойно-минерально-глеевой и темногоумусовой имеют близкую к нейтральной реакцию среды. Все изученные почвы степных и луговых ландшафтов имеют высокое содержание органического углерода, которое в темногоумусовой почве достигает 29 % (пл. 52). Повышенное содержание углерода отмечено в пирогенном горизонте агро-урбокаштановой почвы на месте древнего городища. Погребенные горизонты отличаются более высоким содержанием гумуса, чем вышележащие горизонты. Торфянистые и перегнойные горизонты аллювиальных почв имеют включения аллювиальных отложений, которые их подщелачивают.

Содержание углерода по отношению к азоту в исследуемых почвах – от среднего до низкого уровня. В среднем соотношение С : N колеблется от 20 : 1 до 5 : 1. В торфянистых почвах данное соотношение достигает 64 : 1, а в нижних минеральных горизон-

тах составляет от 14 : 1 до 2 : 1. В торфянистых почвах имеется недостаток азота, в связи с этим и с другими факторами органические остатки разлагаются медленно. Разложение торфа осуществляется микроорганизмами, а пищей для них является азот.

По гранулометрическому составу минеральные горизонты исследуемых почв в основном супесчаные и легкосуглинистые. В основном преобладают фракции песка (1–0.25 мм). Сумма фракций физической глины колеблется в пределах от 16 % до 26 %. Минеральные горизонты почв часто рыхлые из-за большого количества включений дресвы и щебня почвообразующих пород.

Верхние горизонты почв рекреационной зоны, как правило, задернованы.

Высокое содержание органического вещества, слабощелочная и щелочная среда почв являются геохимическими барьерами, на которых закрепляются ТМ.

В таблице 3 приведены результаты анализов на содержание макро- и микроэлементов в почвах исследуемой территории. Выявлено высокое содержание Cu и Ni во всех горизонтах агро-урбокаштановой (пл. 3) и темногумусовой (пл. 5) почв на месте туристических стоянок вдоль Ланинского ручья и древнего городища. Концентрации Cu в почвах превышают ОДК в 1.1–2 раза, Ni – от 2.5 до 4 раз. На тех же площадках обнаружено высокое содержание Mn в горизонтах агро-урбокаштановой и погребенных гумусовых горизонтах темногумусовой почвы, превышающее ПДК в 1.7 раза. Повышенные содержания K, Na и Ba зафиксированы в тех же почвах на месте туристических стоянок.

Повышенные содержания Ca и Mg коррелируют со щелочной реакцией среды почв. Повышенные содержания Ca и K обнаружены в горизонтах агро-урбокаштановой почвы.

В аллювиальных перегнойно-минерально-глеевой и торфяно-минерально-глеевой почвах (пл. 61, 19) побережья оз. Байкал в долине р. Сарма, а также в темногумусовой (пл. 52) и серой со вторым гумусовым горизонтом (пл. 50) почвах в присклоновой поверхности на территории с низкой антропогенной нагрузкой высоких значений содержания макро- и микроэлементов, превышающих ПДК и ОДК, не обнаружено, что говорит об их удовлетворительном экологическом состоянии.

Таблица 1. Содержание углерода и азота в исследуемых почвах
Table 1. Carbon and nitrogen content in the studied soils

№ площадки. Почва	Горизонт	Глубина, см	pH	Гумус, ППП*, %	C _{орг.} , %	N _{общ.} , %	C : N
3 Агро- урбокаштановая	AJ	0–11	7.5	8.24	4.78	0.24	19.9
	U/BMK	11–14	7.6	10.78	6.25	0.31	20.2
	BM	13–14	8.0	6.01	3.48	0.25	13.9
	U/P/BM	14–20	6.2	3.13	1.82	0.09	20.2
5 Темногумусовая с погребенными гумусовыми горизонтами	AUd	2–9	6.1	11.00	6.38	0.33	19.3
	AU	9–19	6.4	6.57	3.81	0.20	19.1
	AUC	19–24	6.4	6.14	3.56	0.22	16.2
	[RU ₁]	24–31	6.5	6.92	4.02	0.21	19.1
	[RU ₂]	31–45	6.3	5.19	3.01	0.16	18.8
	C	45–64	6.8	2.37	1.37	0.10	13.7
61 Аллювиальная торфяно- минерально-глеевая	T	0–15	5.4	88.2*	-	-	-
	Tmr ₁	15–22	5.4	69.6*	7.71	0.12	64.3
	Tmr ₂	22–34	6.8	68.2*	2.33	0.29	8.0
	Tmr,g	34–38	6.2	39.4*	3.36	2.09	1.6
	CG	38–43	8.3	-	-	-	-

Продолжение таблицы 1 (table 1)

19 Аллювиальная перегнойно- минерально-глеевая	Tmr	0–4	8.4	59.2*	19.01	1.72	11.1
	THmr	4–10	8.1	71.4*	12.85	0.64	20.1
	Hmr ₁	10–24	7.9	82.8*	7.23	0.25	28.9
	Hmr ₂	24–28	7.6	69.6*	14.86	0.70	21.2
	Hmr.g	28–31	8.4	56.2*	14.53	1.54	9.4
	G	31–35	7.8	6.34	3.68	0.35	10.5
19 Аллювиальная перегнойно- минерально-глеевая	[THmr]	35–44	7.5	65.3*	22.83	1.39	16.4
	CG	44–46	7.2	7.34	4.26	0.38	11.2
	[Hmr]	46–52	6.7	69.2*	12.93	1.38	9.4
	C	52–55	6.1	6.15	3.57	0.29	12.3
50 Серая со вторым гумусовым горизонтом пирогенная	AY	0–10	5.6	15.35	8.90	1.02	8.7
	AEL	10–20	7.8	7.65	4.44	0.50	8.8
	BEL	20–34	7.5	2.67	1.55	0.20	7.8
	BEL[hh]	34–47	7.6	3.79	2.20	0.10	22.0
	BTC	47–55	7.9	1.45	0.84	0.06	14.0
52 Темногумусовая с погребенным гумусовым горизонтом	AUd	0–6	7.8	29.34	17.02	1.69	10.1
	AU	6–13	8.2	9.75	5.65	0.66	8.6
	AUC	13–20	8.4	2.43	4.50	0.55	8.2
	[RU [~]]	20–32	7.0	7.75	1.43	0.08	17.9
	C	32–43	7.3	1.25	0.72	0.07	10.3
55 Темногумусовая	AU	0–23	7.5	9.80	5.63	0.70	8.04
	AUC	23–30	8.0	3.10	1.78	0.10	17.8

Таблица 2. Гранулометрический состав почв луговых и степных ландшафтов Приольхонья
Table 2. Texture of wet meadow and steppe soils in Priol'khonye

Почва	Горизонт	Содержание фракций в % от мелкозема (размер частиц, мм)						Сумма фракций < 0.01	Краткое название по гранулометрическому составу
		1–0.25	0.25– 0.05	0.05– 0.01	0.01– 0.005	0.005– 0.001	<0.001		
Темногумусовая с погребенными гумусовыми горизонтами	AU	56.78	15.1	9.8	3.4	3.7	11.2	18	Супесь
	AUC	61.58	9.7	11.4	3.3	3.3	10.7	17	Супесь
	[RU ₁]	45.00	23.6	8.5	3.1	4.0	15.8	23	Легкий суглинок
	[RU ₂]	61.36	11.0	10.3	3.0	3.8	10.5	17	Супесь
	C	56.82	21.5	3.9	3.1	3.6	11.1	18	Супесь
Аллювиальная торфяно- минерально- глеевая	Tmr, g	64.58	6.7	7.6	4.8	5.8	10.4	21	Легкий суглинок
	CG	55.12	6.0	17.7	5.2	5.6	10.4	21	Легкий суглинок
Аллювиальная перегнойно- минерально- глеевая	G	45.74	27.1	5.7	5.5	5.6	10.3	21	Легкий суглинок
	CG	54.12	18.0	6.8	4.8	5.6	10.6	21	Легкий суглинок
	C	55.54	16.7	9.2	2.8	3.8	11.9	18	Супесь
	AY	49.26	12.7	14.2	3.8	3.4	16.7	23	Легкий суглинок
Серая со вторым гумусовым горизонтом	AEL	54.80	6.4	14.9	3.6	3.7	16.6	24	Легкий суглинок
	BEL[hh]	52.06	15.7	9.6	2.7	4.6	15.4	23	Легкий суглинок
	BTC	50.64	11.0	12.0	4.4	1.1	10.0	16	Супесь
	AUd	48.98	12.9	17.2	4.8	5.8	10.4	21	Легкий суглинок
Темногумусовая с погребенным гумусовым горизонтом	AU	53.92	18.0	8.2	2.5	7.2	10.3	20	Супесь / легкий суглинок
	AUC	55.50	16.3	7.9	2.3	7.3	10.7	21	Легкий суглинок
	[RU ₁]	61.76	9.6	8.1	2.3	7.8	10.4	21	Легкий суглинок
	C	54.50	17.5	9.8	2.4	9.9	6.0	18	Супесь

Таблица 3. Содержание химических элементов в почвах луговых и степных ландшафтов Приольхонья
Table 3. Chemical elements content in wet meadow and steppe soils of Priol'khonye

Площадка, почва	Горизонт	Al	Ca	Mg	K	Na	Fe	Mn	Sr	Ba
		%			мг/кг		%	мг/кг		
3 Агро-урбокаштановая	AJ	1.82	1.04	0.34	4749	355	1.81	1499	103	255
	U/BMK	1.75	3.22	0.37	4831	408	1.74	2608	51	430
	BM	1.98	2.87	0.33	6470	252	1.87	2623	95	490
	U/P/BM	2.08	3.93	0.38	8048	1363	1.70	2564	40	394
5 Темногумусовая с погребенными гумусовыми горизонтами	AUd	1.99	0.86	0.28	5889	167	1.80	1508	45	285
	AU	1.93	0.57	0.27	4927	160	1.83	1172	33	212
	AUC	2.57	0.53	0.34	5087	222	2.11	1207	37	255
	[RU ₁]	2.27	0.61	0.30	5527	195	1.97	1556	39	316
	[RU ₂]	2.41	0.65	0.32	5826	217	2.08	1546	40	338
	C	2.69	0.60	0.34	5927	225	2.13	1310	40	312
	T	2.79	0.63	0.58	5139	231	2.32	936	4.4	579
61 Аллювиальная торфяно-минерально- глеевая	Tmr ₁	1.09	0.86	0.64	1047	208	4.56	204	49	41
	Tmr ₂	1.10	0.53	0.59	455	138	4.65	160	36	37
	Tmr.g	0.73	1.32	0.27	204	65	4.48	191	50	55
	CG	0.22	0.88	0.12	73	50	1.54	54	25	23
19 Аллювиальная перегнойно- минерально-глеевая	Tmr	0.39	8.27	1.23	559	265	3.09	824	135	91
	THmr	0.64	5.30	0.89	278	82	4.87	764	87	92
	Hmr ₁	0.77	0.99	0.52	208	36	4.13	164	26	35
	Hmr ₂	0.79	0.94	0.51	186	27	4.12	150	27	40

Продолжение таблицы 3 (table 3)

19 Аллювиальная перегнойно-минерально-глеевая	Hmr.g	0.63	1.08	0.44	191	41	3.47	131	31	37
	G	0.86	0.36	0.50	270	29	4.00	120	18	22
	[THmr]	0.70	1.13	0.44	225	47	3.35	196	32	32
	CG	0.87	0.32	0.46	294	30	3.26	118	17	16
	[Hmr]	0.81	0.71	0.44	338	51	3.15	180	25	25
	C	1.19	0.25	0.61	413	36	4.75	155	18	21
50 Серая со вторым гумусовым горизонтом	AY	1.28	2.72	1.12	866	207	4.61	385	95	77
	AEL	1.62	1.56	1.23	1012	99	5.41	405	65	67
	BEL	1.84	1.15	1.29	850	55	5.69	407	43	54
	BEL[hh]	1.61	2.84	1.23	726	59	5.24	318	56	56
	BTC	1.88	2.27	1.51	1175	56	6.15	459	54	61
52 Темногумусовая с погребенным гумусовым горизонтом	AUd	0.64	4.62	0.57	891	50	2.25	532	91	86
	AU	1.12	2.96	0.59	738	40	3.70	596	64	98
	AUC	1.07	0.62	0.46	615	35	3.44	189	32	72
	[RU [~]]	1.01	0.29	0.49	579	25	2.66	161	20	65
	C	1.39	0.37	0.52	788	35	3.02	245	22	96
55 Темногумусовая	AU	1.10	2.51	0.51	730	43	3.40	310	180	338
	C	0.90	2.10	0.46	890	50	2.86	621	265	478
ОДК (Ориентировочно..., 2006)		-	-	-	-	-	-	-	-	-
ПДК (Предельно..., 2006)		-	-	-	-	-	-	1500	265	-

Таблица 3. Содержание химических элементов в почвах луговых и степных ландшафтов Приольхонья
Table 3. Chemical elements content in wet meadow and steppe soils of Priol'khonye

Площадка, почва	Горизонт	Zn	Cu	Ni	Pb	Co	Cr	V	Ti	Cd
		мг/кг								
3 Агро-урбокаштановая	AJ	88	220	286	7	6	38	45	784	<0.05
	U/BMK	109	284	270	10	5	33	42	743	<0.05
	BM	102	214	278	11	6	44	48	793	<0.05
	U/P/BM	106	187	209	3	7	31	41	641	<0.05
5 Темногумусовая с погребенными гумусовыми горизонтами	AUd	91	169	242	14	4	37	41	625	<0.05
	AU	68	148	240	14	5	37	42	627	<0.05
	AUC	59	162	299	13	6	46	58	822	<0.05
	[RU ₁]	66	183	259	13	6	41	50	728	<0.05
	[RU ₂]	67	194	277	13	6	42	53	780	<0.05
	C	62	200	311	14	6	46	61	799	<0.05
	T	58	174	351	13	6	53	67	964	<0.05
61 Аллювиальная торфяно-минерально- глеевая	Tmr ₁	53	17	22	15	9	31	29	6277	<0.05
	Tmr ₂	42	14	19	12	8	29	29	6692	<0.05
	Tmr.g	17	16	20	13	9	18	13	1829	<0.05
	CG	8.7	6.3	7	5	3	6.2	2	768	<0.05
19 Аллювиальная перегнойно- минерально-глеевая	Tmr	50	12	9	9	12	9.3	4	1497	<0.05
	THmr	46	12	16	11	9	16	10	2399	<0.05
	Hmr ₁	36	11	17	11	7	19	12	3263	<0.05
	Hmr ₂	39	17	18	11	15	18	14	2538	<0.05

Продолжение таблицы 3 (table 3)

19 Аллювиальная перегнойно-минерально-глеевая	Hmr.g	35	20	17	9	7	16	12	2020	<0.05
	G	37	11	17	12	13	21	14	3614	<0.05
	[THmr]	24	17	16	9	6	16	12	2550	<0.05
	CG	29	6.9	16	7	4	19	12	3024	<0.05
	[Hmr]	23	18	16	10	5	19	12	3178	<0.05
	C	40	9	22	15	14	28	18	3915	<0.05
50 Серая со вторым гумусовым горизонтом	AY	46	28	20	10	11	39	29	8464	<0.05
	AEL	51	31	27	13	13	54	40	11589	<0.05
	BEL	49	35	29	14	15	60	46	13707	<0.05
	BEL[hh]	46	34	28	13	12	55	42	11837	<0.05
	BTC	50	40	35	13	17	77	53	15723	<0.05
52 Темногумусовая с погребенным гумусовым горизонтом	AUd	27	19	9	11	4	15	10	2820	<0.05
	AU	26	19	16	16	8	27	21	4853	<0.05
	AUC	25	17	14	16	6	27	21	4426	<0.05
	[RU [~]]	23	9	12	14	5	25	16	4570	<0.05
	C	28	15	16	18	7	34	18	6166	<0.05
55 Темногумусовая	AU	40	62	107	61	27	64	46	5248	<0.05
	C	46	79	128	25	59	137	78	7124	<0.05
ОДК (Ориентировочно..., 2006)		220–110	132–66	80–40	130–65	-	-	-	-	0.5–1.0
ПДК (Предельно..., 2006)		91	51	44	10	17	100	114	-	-

По результатам химического анализа почв по профилю от Сарминского гольца на Приморском хребте до оз. Байкал ([Belozertseva et al., 2014](#)) выявлено, что содержание Ni (128 мг/кг), Co (59 мг/кг), Cr (137 мг/кг) в почвах около туристических баз на берегу оз. Байкал превышает предельно допустимые нормы в 2, 1.2, 1.4 раза соответственно. Повышенное содержание Pb (61 мг/кг) выявлено на месте туристических стоянок (с подъездом автотранспорта) около Ланинского ручья, превышающее ПДК в 2 раза (пл. 55).

Обнаружено высокое содержание ТМ в почвах на остепненной территории вблизи береговой зоны, а также на более удаленных остепненных участках рекреационной зоны в предгорьях, по сравнению с почвами среднегорных таежных лесов, которые редко посещаются туристами.

Однако следует иметь в виду, что почвы побережья на карбонатных породах иногда могут иметь высокое природное содержание макро и микроэлементов ([Гребенщикова и др., 2008](#)). Присклоновая поверхность и побережье сложены кристаллическими сланцами, гнейсами, аллювиальными отложениями, встречаются мраморы. В районе исследования могут встречаться почвы с повышенным содержанием Fe, а также сопутствующих металлов, так как в Приольхонье зафиксированы месторождения Fe и Cu ([Атлас..., 2004](#)).

По данным за 2016 г., содержание ТМ в почвах луговых и заболоченных ландшафтов на побережье оз. Байкал не превышает санитарно-гигиенические нормативы, т. к. эти территории являются менее доступными для автотранспорта.

Результаты снегогеохимической съемки акватории оз. Байкал и прилегающей территории ([Belozertseva et al., 2017](#)) показывают локальное высокое содержание ТМ в снеговой воде побережья вблизи населенных пунктов в Приольхонье, что может подтверждать антропогенное воздействие. Однако на побережье Байкала в Приольхонье наблюдается малая мощность снегового покрова или его отсутствие, а также сильные ветры, что способствует попаданию частиц почв и пород в снеговой покров.

В связи с загрязнением основных компонентов ландшафтов побережья в Приольхонье в дальнейшем не рекомендуется увели-

чивать рекреационную нагрузку в данном регионе. Неорганизованный и организованный туризм необходимо регламентировать. В будущем туристическую деятельность лучше развивать в экологически более чистых районах, например, в п. Большое Голоустное.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Современный этап освоения земель Приольхонья можно охарактеризовать как этап их среднего антропогенного нарушения. Наиболее интенсивное воздействие на почвы происходило в советское время в связи с развитием в районе сельского и лесного хозяйства, добычей полезных ископаемых. Основные антропогенные факторы трансформации ландшафтов восточного Приольхонья в настоящее время – это туризм и рекреация. Современное состояние почв региона можно оценить как удовлетворительное со средней степенью загрязнения локального характера.

Исследуемые почвы степных ландшафтов восточного Приольхонья имеют преимущественно маломощный сильно- и среднекаменистый профиль. Почвы, сформированные под степной и луговой растительностью, характеризуются высоким содержанием гумуса, преимущественно нейтральной и слабощелочной реакцией. Почвы луговых ландшафтов имеют низкое содержание азота по отношению к углероду, что создает благоприятные условия для консервации растительных остатков. Исследуемые почвы рекреационной зоны в основном характеризуются легким гранулометрическим составом.

Почвы вблизи туристических стоянок, а также на месте древнего городища загрязнены ТМ, содержание которых превышает санитарно-гигиенические нормы более чем в 2 раза. Высокое содержание органического вещества, слабощелочная и щелочная реакция среды способствуют накоплению ТМ в почвах рекреационной зоны, т. е. являются депонирующей средой – “геохимическим барьером” для поступления загрязняющих веществ в оз. Байкал.

В результате проведенных работ в 2014–2016 гг. выявлено, что наиболее высокое содержание ТМ зафиксировано в почвах рекреационной зоны на берегу оз. Байкал и на территории бывше-

Бюллетень Почвенного института им. В.В. Докучаева. 2019. Вып. 97.
Dokuchaev Soil Bulletin, 2019, 97

го городища. Установлено, что почвы степных ландшафтов береговой зоны характеризуются более высокой концентрацией ТМ, чем почвы луговых и заболоченных ландшафтов, которые являются менее удобными для неорганизованных туристических автомобильных стоянок.

В связи с нарастающим нерегулируемым туризмом в Приольхонье требуется постоянный мониторинг экологического состояния ландшафтов в целях дальнейшего нормирования рекреационной нагрузки.

БЛАГОДАРНОСТЬ

Работы проведены за счет гранта РФФИ № 17-05-00400, проекта НИР № АААА-А17-117041910169-4 (0347-2016-0002).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Атлас Иркутской области /Антипов А.Н. Москва, Иркутск: Институт географии СО РАН, Роскартография, 2004.
2. Аринушкина Е.В. Руководство по химическому анализу почв. М.: МГУ, 1970. 487 с.
3. Вадюнина А.Ф., Корчагина З.А. Методы исследования физических свойств почв. М.: Агропромиздат, 1986. 416 с.
4. Воробьева Г.А. Почва как летопись природных событий Прибайкалья: проблемы эволюции и классификации почв. Иркутск: ИГУ, 2010. 205 с.
5. Гребенищикова В.И., Лустенберг Э.Е., Китаев Н.А., Ломоносов И.С. Геохимия окружающей среды Прибайкалья (Байкальский геоэкологический полигон). Новосибирск: "Гео", 2008. 234 с.
6. ГОСТ 26107 – 84. Почвы. Методы определения общего азота. М.: Госком. СССР по стандартам, 1984. 12 с.
7. Гутарева О.С. Кайнозойский карст в Приольхонье (юго-западное побережье оз. Байкал) // Спелеология и карстология. 2009. № 2. С. 77–82.
8. Добровольский Г.В., Урусевская И.С. География почв. М.: МГУ, 2006. 460 с.
9. Касьянова Л.Н., Азовский М.Г. Степная растительность выровненных пространств острова Ольхон (озеро Байкал) // Успехи современного естествознания. 2016. № 3. С. 153–162.
10. Классификация и диагностика почв России /Шишов Л.Л., Тонконогов В.Д., Лебедева И.И., Герасимова М.И. Смоленск: Ойкумена, 2004. 342 с.
11. Кузьмин В.А. Почвенный покров. Почвенно-географическое районирование // Атлас Иркутской области. Иркутск: Институт географии СО РАН, Роскартография, 2004. С. 40–41.

Бюллетень Почвенного института им. В.В. Докучаева. 2019. Вып. 97.
Dokuchaev Soil Bulletin, 2019, 97

12. Кузьмин С.Б., Данько Л.В. Палеоэкологические модели этноприродных взаимодействий. Новосибирск: “Гео”, 2011. 187 с.

13. Ориентировочно допустимые концентрации (ОДК) химических веществ в почве. Гигиенические нормативы ГН 2.1.7.2042-06, 2006. 4 с.

14. Почвенная карта Иркутской области /В.Т. Колесниченко, К.А. Уфимцева. М.: ГУГК, 1988.

15. ПНДФ 16.1:2.3:3.11-98. Количественный химический анализ почв. М.: Государственный комитет Российской Федерации по охране окружающей среды. URL: <http://lawru.info/dok/1998/06/25/n421537.htm>.

16. Предельно допустимые концентрации (ПДК) химических веществ в почве: гигиенические нормативы ГН 2.1.7.2041-06, 2006. 8 с.

17. Харинский А.В. Металлургические центры Приольхонья конца I тысячелетия до н.э., начала I тысячелетия н.э. // Забайкалье в геополитике России. Улан-Удэ: БНЦ СО РАН, 2003. С. 84–86.

18. Экологически ориентированное планирование землепользования в Байкальском регионе. Ольхонский район / А.Н. Антипов. Иркутск: Институт географии СО РАН, 2004. 147 с.

19. Belozertseva I.A., Dorygotov D., Sorokovoy A.A. Soils of pool of lake Baikal and soil-ecological zoning in territory of Russia and Mongolia // SYLWAN. 2015. Vol.159. No. 8. P. 319–332.

20. Belozertseva I.A., Kichigina N.V., Abalakov A.D., Drovkov V.V., Maryshkin D.I. Modern condition of landscapes in vicinities of the river Sarma at coast of lake of Baikal // European Journal of Natural History. 2014. No. 2. P. 4–7.

21. Belozertseva I.A., Vorobjeva I.B., Vlasova N.V., Lopatina D.N., Janchuk M.S. Snow pollution in Lake Baikal water area in nearby land areas // Water Resources. 2017. Vol. 44. No. 3. P. 471–484. DOI: [10.1134/S0097807817030046](https://doi.org/10.1134/S0097807817030046).

22. Znamenskaya T.I., Vanteeva J.V., Solodyankina S.V. Factors of the development of water erosion in the zone of recreation activity in the Ol'khon region // Eurasian Soil Science. 2018. Vol. 51. No. 2. P. 221–228. DOI: [10.1134/S1064229318020151](https://doi.org/10.1134/S1064229318020151).

SOILS OF THE EASTERN PRIOL'KHONYE ON THE COAST OF THE LAKE BAIKAL: CURRENT STATE AND USE

I. A. Belozertseva^{1,2*}, D. N. Lopatina^{1}, N. A. Zvereva¹**

¹V.B. Sochava Institute of Geography SB RAS,
Russia, 664033, Irkutsk, Ulan-Batorskaya str., 1,

In summer periods of 2015–2017 within the framework of complex expeditions in the eastern Priol'khonye soil geochemical researches were performed. More than 120 soil samples were collected for subsequent physical and chemical analyses. Ecological, chemical and physical properties of meadow and steppe soils of Ol'khon district were studied and the results are presented in the article. The research was conducted on the east coast of the Lake Baikal in its central basin, which is most visited by tourists. Several soil types can be found along the coast line and on gently sloped surface nearby, they are: castanozems, umbrisols, cambisols, gray soils, histic fluvisols gleyic, humic fluvisols gleyic, chernozems, umbric fluvisols, cambic fluvisols and other. Owing to a specific environmental conditions some original soil types (for example “chestnut soils”, “castanozems”) can be found nowhere else in the Irkutsk region but only here. The explored soil profiles are mainly thick and stony to various extent (from high to medium), these soils are sandy or sandy loams, rich in humus, predominantly with neutral and weakly alkaline reaction (pH), low content of nitrogen in relation to carbon content (C : N), that creates favorable conditions for preservation of the vegetable remains in meadow landscapes. The conducted research results revealed that soils near touristic tracks and also on the territory of the ancient settlement are polluted by heavy metals, and their content exceeds sanitary and hygienic standards. The ecological condition of soils at the present stage can be characterized as average degree of disturbance resulting from recreational activity. Geochemical barriers are represented by organic and alkaline ones. However, due to the sandy and sandy-loamy soil texture waters of the lake coastal zone can be polluted by heavy metals as well. Soils of meadow-boggy landscapes of the coastal area are not polluted by heavy metals as far as it is a hard-to-reach region for tourists using automobile transport.

Keywords: castanozems, umbrisols, fluvisols, recreation, pollution, western coast of the Lake Baikal.

REFERENCES

1. Antipov A.N., *Atlas Irkutskoi oblasti* (Atlas of the Irkutsk region), Moscow, Irkutsk: Institut geografii SO RAN, Roskartografiya, 2004.
2. Arinushkina E.V., *Rukovodstvo po khimicheskomu analizu pochv* (Guide to the chemical analysis of soils), Moscow: MGU, 1970. 487 p.

Бюллетень Почвенного института им. В.В. Докучаева. 2019. Вып. 97.
Dokuchaev Soil Bulletin, 2019, 97

3. Vadyunina A.F., Korchagina Z.A., *Metody issledovaniya fizicheskikh svoystv pochv* (Methods for studying the physical properties of soil), Moscow: Agropromizdat, 1986. 416 p.
4. Vorob'yeva G.A., *Pochva kak letopis' prirodnikh sobytiy Pribaykal'ya: problemy evolyutsii i klassifikatsii pochv* (Soil as a chronicle of natural events in the Baikal region: problems of soil evolution and classification.), Irkutsk: IGU, 2010. 205 p.
5. Grebenshchikova V.I., Lustenberg E.E., Kitayev N.A., Lomonosov I.S., *Geokhimiya okruzhayushchey sredy Pribaykal'ya (Baykal'skiy geoekologicheskoy poligon)* (Environmental Geochemistry of the Baikal Region (Baikal Geoecological test site)), Novosibirsk: "Geo", 2008, 234 p.
6. GOST 26107 – 84 (USSR standard), Moscow: Gos. kom. SSSR po standartam, 1984, 12 p.
7. Gutareva O.S., Kaynozoiyskiy karst v Priol'khon'ye (yugo-zapadnoye poberezh'ye oz. Baykal) (Cenozoic karst in the Olkhon region (south-western coast of Lake Baikal)), *Speleologiya i karstologiya*, 2009, No. 2, pp. 77–82.
8. Dobrovolskii G.V., Urusevskaya I.S., *Geografiya pochv* (Soil geography), Moscow: MGU, 2006, 460 p.
9. Kas'yanova L.N., Azovskii M.G., Stepnaya rastitel'nost' vyrovnennoykh prostranstv ostrova Ol'khon (ozero Baikal) (Steppe vegetation of the leveled spaces of the Olkhon Island (the Lake Baikal)), *Uspekhi sovremennogo yestestvoznaniya*, 2016, No. 3, pp. 153–162.
10. Shishov L.L., Tonkonogov V.D., Lebedeva I.I., Gerasimova M.I., *Klassifikatsiya i diagnostika pochv Rossii* (Classification and diagnosis of soils of Russia), Smolensk: Oykumena, 2004, 342 p.
11. Kuz'min V.A., Pochvennyy pokrov. Pochvenno-geograficheskoye rayonirovaniye (Soil cover. Soil-geographical zoning), In: *Atlas Irkutskoy oblasti* (Atlas of the Irkutsk region), Irkutsk: IG SO RAN, Roskartografiya, 2004, pp. 40–41.
12. Kuz'min S.B., Dan'ko L.V., *Paleoekologicheskiye modeli etnoprirodnikh vzaimodeystviy* (Paleoecological models of ethnic interactions), Novosibirsk: "Geo", 2011, pp. 39–66.
13. GN 2.1.7.2042-06 (Hygienic standards of the Russian Federation), 2006, 4 p.
14. PNDF 16.1:2.3:3.11-98 (State committee of the Russian Federation on environmental protection), Moscow, 1998, URL: <http://lawru.info/dok/1998/06/25/n421537.htm>.
15. Kolesnichenko V.T., Ufimtseva K.A., *Pochvennaya karta Irkutskoy oblasti* (Soil map of the Irkutsk region), Moscow: GUGK, 1988.
16. GN 2.1.7.2041-06 (Hygienic standards of the Russian Federation), 2006, 8 p.

Бюллетень Почвенного института им. В.В. Докучаева. 2019. Вып. 97.
Dokuchaev Soil Bulletin, 2019, 97

17. Kharinskii A.V., Metallurgicheskie tsentry Priol'khon'ya kontsa I tysyacheletiya do n.e., nachala I tysyacheletiya n.e. (Metallurgical centers of the Olkhon region at the end of the 1st millennium BC, the beginning of the 1st millennium AD), *Zabaykal'ye v geopolitike Rossii*, Ulan-Ude: BNTS SO RAN, 2003, pp. 84–86.

18. Antipov A.N., *Ekologicheski oriyentirovannoye planirovaniye zemlepol'zovaniya v Baykal'skom regione. Ol'khonskiy rayon* (Ecologically focused planning of land use in the Baikal region. Olkhon district), Irkutsk: Institut geografii SO RAN, 2004, 147 p.

19. Belozertseva I.A., Dorygotov D., Sorokovoy A.A., Soils of pool of lake Baikal and soil-ecological zoning in territory of Russia and Mongolia, *SYLWAN*, 2015, Vol. 159, No. 8, pp. 319–332.

20. Belozertseva I.A., Kichigina N.V., Abalakov A.D., Drokov V.V., Maryshkin D.I., Modern condition of landscapes in vicinities of the river Sarma at coast of lake of Baikal, *European Journal of Natural History*, 2014, No. 2, pp. 4–7.

21. Belozertseva I.A., Vorobjeva I.B., Vlasova N.V., Lopatina D.N., Janchuk M.S., Snow Pollution in Lake Baikal Water Area in Nearby Land Areas, *Water Resources*, 2017, Vol. 44, No. 3, pp. 471–484,

DOI: [10.1134/S0097807817030046](https://doi.org/10.1134/S0097807817030046).

22. Znamenskaya T.I., Vanteeva J.V., Solodyankina S.V., Factors of the development of water erosion in the zone of recreation activity in the Ol'khon region, *Eurasian soil science*, 2018, Vol. 51, No. 2, pp. 221–228,

DOI: [10.1134/S1064229318020151](https://doi.org/10.1134/S1064229318020151).

Ссылки для цитирования:

Белозерцева И.А., Лопатина Д.Н., Зверева Н.А. Почвы восточного Приольхонья на побережье озера Байкал: современное состояние и использование // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2019. Вып. 97. С. 21-51. DOI: 10.19047/0136-1694-2019-97-21-51

For citation:

Belozertseva I.A., Lopatina D.N., Zvereva N.A., Soils of the eastern Priol'khonye on the coast of the Lake Baikal: current state and use, *Dokuchaev Soil Bulletin*, 2019, V. 97, pp. 21-51. DOI: 10.19047/0136-1694-2019-97-21-51

КОМБИНАЦИЯ ЗАСОЛЕННЫХ ПОЧВ СЕВЕРНОГО СКЛОНА ВОЗВЫШЕННОСТИ ЕРГЕНИ ПОСЛЕ ПРЕКРАЩЕНИЯ ОРОШЕНИЯ

© 2019 г. Н. Б. Хитров*, И. Н. Горохова, Е. И. Кравченко

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

**<https://orcid.org/000-0001-5151-5109>, e-mail: khitrovnb@gmail.com*

*Поступила в редакцию 04.04.2019, после доработки 18.04.2019,
принята к публикации 28.05.2019*

Исследован почвенный покров и засоленность почв на поле с чередующимися более темными и более светлыми широкими полосами, заметными на космическом снимке, в пределах орошаемого участка Червленое Светлоярской оросительной системы (юг Волгоградской обл.). Поле орошалось до середины 1990-х годов и было подвержено вторичному засолению, с тех пор используется в богаре. Почвенная комбинация представляет собой бывший степной светло-каштановый солонцовый комплекс, преобразованный в ходе планировки поверхности и орошения в агроземы аккумулятивно-карбонатные сегрегационные солончаковатые (Sodic Endoprotosalic Cambisol (Loamic, Aric, Protocalcic, Ochric, Bathygypsic) and Cambic Calcisols (Loamic, Aric)) и глубокосолончаковатые, и агросветлогумусовую аккумулятивно-карбонатную стратифицированную почву. Светлые полосы на поле маркируют сильнокарбонатные (12–13 % CaCO_3) с поверхности почвы (Calcaric Cambisol (Loamic, Aric)) среди других почв, имеющих с поверхности в 5–10 раз меньше карбонатов. Все почвы засоленные, но содержание солей меняется в пространстве волнообразно несогласно с изображением на снимке. Обсуждаются двумерные распределения содержания карбонатов и солей в почвенной комбинации. Отмечается наличие остаточных признаков вторичного засоления в виде хлоридов кальция и магния через два десятилетия после прекращения орошения и снижения уровня грунтовых вод глубже 7 м.

Ключевые слова: карбонаты, засоленные почвы, водная вытяжка, ионоселективные электроды, активности ионов.

DOI: 10.19047/0136-1694-2019-97-52-90

ВВЕДЕНИЕ

Во второй половине XX в. в СССР было построено и введено в эксплуатацию много оросительных и оросительно-обводнительных систем в регионах с выраженным дефицитом влаги в течение вегетационного периода: степной, сухостепной, полупустынной и пустынной зонах. На территории России к 1989 г. общая площадь орошаемых земель достигла своего максимума – 6.1 млн га, две трети которых считались в хорошем мелиоративном состоянии, 12 % – в удовлетворительном и 22 % – в неудовлетворительном состоянии ([Зимовец, 1991](#); [Экологические требования..., 1996](#)).

Одним из наиболее крупных регионов ирригационного земледелия в России в то время и сейчас была и остается Волгоградская область. К 1989 г. здесь орошение осуществлялось на 345.2 тыс. га или 4.6 % площади сельскохозяйственных земель области ([Панкова, Новикова, 2004](#)). Большие нормы поливов, отсутствие дренажа и гидроизоляции на оросительных каналах на большинстве оросительных системах привели в 90-х годах к подъему уровня грунтовых вод (УГВ), возникновению очагов вторичного засоления, осолонцеванию почв, подтоплению, ирригационной эрозии и другим явлениям. Последовавший далее в стране экономический кризис привел к сокращению площадей орошаемых земель, который сказывается до сих пор, и на 1 января 2016 г. в области орошалось 180.7 тыс. га ([Государственный доклад, 2016](#)). В настоящее время, в связи с решением государственной задачи обеспечения продовольственной безопасности страны, проводится реконструкция оросительных систем и становится крайне важным изучить современное состояние орошаемых почв и процессы, ограничивающие их плодородие, такие как окарбоначивание, засоление и осолонцевание почв.

Аридные и семиаридные почвы обычно содержат карбонаты кальция. Когда их содержание превышает 15-20%, почвы отличаются низким содержанием органического вещества и доступного азота. В карбонатных почвах часто образуется поверхностная корка, иногда происходит цементация горизонтов, для них характерна низкая доступность фосфора и нарушение

Бюллетень Почвенного института им. В.В. Докучаева. 2019. Вып. 97.
Dokuchaev Soil Bulletin, 2019, 97

калиевого и магниевого питания растений, нередко возникает проблема водообеспеченности¹.

Процесс ирригационного окарбоначивания в Северном Прикаспии был выявлен целым рядом отечественных авторов ([Барановская, Азовцев, 1981](#); [Сиземская, 2013](#)), когда дополнительное увлажнение при поливах приводит к мобилизации кальция срединных горизонтов почв и подтягиванию растворов в верхние горизонты в межполивной период. Аналогичный процесс отмечался и в орошаемых, и в богарных мелиорированных пахотных почвах Волгоградской области ([Любимова, 2002](#); [Любимова, Дегтярева, 2000](#); [Любимова, Новикова, 2016](#); [Горохова и др., 2018б](#)).

Поскольку большое количество карбонатов кальция (> 15 %) ведет к снижению плодородия почв и образованию корки на поверхности, важно определить местонахождение таких почв на орошаемых полях. Встала задача о возможности выявления окарбоначенных почв с привлечением дистанционных материалов.

Другим широко развитым свойством аридных территорий является засоленность почв. Среди орошаемых почв площадь засоленных почв на государственных системах Волгоградской обл. в 2001 г. составила 16.5 тыс. га (11.9 %) ([Панкова, Новикова, 2004](#)), а в 2015 г. – 12.7 тыс. га (7 %)². Некоторое уменьшение вызвано общим сокращением площадей орошения и частично понижением уровня грунтовых вод на орошаемых массивах.

Засоление почв является глобальной проблемой. Анализ литературы за последние пять лет показывает, что изучение засоленности почв ведут разными методами, включая наземное опробование, неконтактные грунтомеры и дистанционную информацию ([Scudiero et al., 2015](#); [Chen et al., 2016](#); [Jiang, Shu, 2019](#)), геостатистические и статистические методы обработки данных ([Pla Sentis, 2014](#); [Горохова и др., 2018б](#); [Кравченко и др., 2018](#)), путем установления связи между засоленностью почв и природными элемен-

¹ Kadry L.T., 1972, Duty Trip Report on Sudan, October 10–24, 1971, 16 pages plus Appendices, FAO, RNEA, Cairo.

² Кадастр мелиоративного состояния орошаемых земель Волгоградской области. Волгоград. 2016. 12 с.

тами ([Ren et al., 2015](#)). При этом отмечается, что современные дистанционные материалы и усовершенствованные методы обработки данных в ГИС хоть и повысили возможности идентификации и диагностики засоленности почв и грунтовых вод, их следует дополнять наземным обоснованием и лабораторным анализом для достижения приемлемой точности ([Sethi et al., 2016](#)).

В разных регионах мира предлагают технологии орошения, минимизирующие засоление почв (salinity), накопление обменного натрия (sodicity) и ощелачивание (alkalinity) на фоне максимизации урожая и минимизации затрат на его получение ([Russo et al., 2015](#)). Эти технологии дифференцированы с учетом местных условий в зависимости от способа и режима орошения, минерализации и качественного состава поливной воды, создания локальных противодиффузионных экранов на некоторой глубине, ограничения испарения с поверхности почвы, возможности опреснения воды или повторного использования дренажных или очищенных сточных вод ([Aragüés et al., 2014](#); [Rahman et al., 2015](#); [Wang et al., 2015](#); [Zhao et al., 2016](#)).

Часто такие задачи обусловлены ограниченным ресурсом пресных вод, что вынуждает фермеров использовать для орошения воды повышенной минерализации: грунтовые, дренажные, очищенные сточные воды ([Rahman et al., 2015](#); [Russo et al., 2015](#); [Wang et al., 2015](#)). Обычно предлагаемые технологии приводят к пульсирующему внутригодовому режиму содержания солей в корнеобитаемом слое почвы: некоторое выщелачивание в зимний период и накопление солей в течение вегетационного периода с максимумом накопления перед уборкой культуры ([Wang et al., 2015](#); [Zhao et al., 2016](#)). Сезонно-годовая динамика солей и пространственная неоднородность засоленности почв характерна не только в условиях орошения ([Ding, Yu, 2014](#); [He et al., 2014, 2015](#); [Gkiougkis et al., 2015](#)), но и в естественных гидроморфных ([Herrero, Castañeda, 2015](#)) или пустынных ландшафтах ([Сиземская, 2013](#); [Sidike et al., 2014](#)). В более редких ситуациях наблюдается рассоление в ходе орошения ранее засоленных почв ([Кутькина, 2008](#); [Хитров и др., 2016](#)).

В 2018 г. в журнале Бюллетень Почвенного института им. В.В. Докучаева (Кравченко и др., 2018) рассматривалось совре-

менное состояние засоленности почв на ОУ Червлёное Светлоярской ОС в районе старого, засыпанного оросительного канала (рис. 1Б). В 1990-х годах вдоль этого канала в земляном русле сформировалась полоса очень сильного вторичного засоления почв, возникшего из-за инфильтрации вод из канала и подъема уровня грунтовых вод выше критического. Через четверть века после прекращения подачи воды по этому каналу на участке понижалась верхняя граница засоленных горизонтов, почвы из солончаковых превратились в солончаковатые разности со срединно-аккумулятивным распределением солей и максимумом солей на глубине 100–150 см. В пределах первого метра от поверхности горизонты почв имеют слабую и среднюю степень засоления ([Кравченко и др., 2018](#)). Иными словами, произошло рассоление поверхностных горизонтов почв до глубины 30–40 см.

Часть орошаемого участка Червлёное так и продолжает использоваться в пашне в условиях богары, другая вновь орошается. Цель статьи – оценка современного состояния почвенного покрова и засоленности почв в 2017 г. на одном из полей ОУ “Червлёное” после двух десятилетий прекращения орошения на нем.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Объектами исследования являлась почвенная комбинация в пределах одного поля ОУ Червлёное Светлоярской ОС. Орошаемый участок расположен на северных отрогах возвышенности Ергени в 1–4 км к югу от Волго-Донского канала возле села Червлёное Волгоградской обл. Абсолютная высота местности 97–102 м над уровнем моря. Исследуемое поле находится в центре ОУ на очень пологом склоне северной экспозиции. По космическому снимку (рис. 1А, 1Б) следует, что поле устроено в верхней трети водосборной поверхности с древовидным рисунком, состоящим из более темных полос широких ложбин и более светлых полос наклонных водораздельных пространств между ними. Ложбины ниже по склону собираются в балку, впадающую далее в Волго-Донской канал.

Почвообразующими породами являются лёссовидные суглинки. Их мощность составляет более 10 м.

Территория относится к сухостепной зоне. До строительства оросительной системы и на сохранившихся пастбищных участках растительность представлена чередующимися пятнами белой полыни на солонцах, ромашника на светло-каштановых несолонцеватых и солонцеватых почвах, типчака и ковыля на луговато- и лугово-каштановых почвах западин или ложбин.

Почвенный покров ОУ Червленое, в соответствии с почвенной картой, составленной Ленгипроземом перед строительством оросительной системы в 1950-х годах (карта опубликована в источнике ([Новикова и др., 2009](#))), был представлен солонцовыми комплексами с разным соотношением светло-каштановых почв разной степени солонцеватости (К1) и каштановых степных солонцов (СН). Непосредственно на исследуемом поле, в соответствии с почвенной картой, было два комплекса. В одном из них доминировали светло-каштановые почвы при доле солонцов 35–50 %. В другом комплексе доминировали солонцы, а доля светло-каштановых почв составляла 35–50 %. При этом почвенные контуры указанных комплексов на карте вытянуты поперек склона, тогда как полосчатая структура, выявляемая на космическом снимке, длинными осями полос направлена вдоль склона.

ОУ Червленое был построен в конце 1950-х годов и сначала входил в состав Варваровской ОС, позднее переведен в подчинение Райгородской (Светлоярской) ОС. В 1960-х годах полив производили по бороздам, с 2000-х – дождеванием. После начала орошения грунтовые воды, исходно залегавшие на глубине 18–20 м ([Новикова и др., 2009](#)), стали подниматься, и к началу 1980-х на большей части ОУ их зеркало наблюдалось на глубине 1.5–5.0 м, преимущественно 2.0–3.0 м ([Горохова, Панкова, 1997](#); [Новикова и др., 2009](#)). Это способствовало активному вторичному засолению почв ([Горохова, Панкова, 1997](#)). В середине 1990-х ОУ перестали орошать, и до середины 2000-х он использовался преимущественно под севообороты сухого земледелия. С 2010 г. центральную часть ОУ вновь стали использовать в орошаемом земледелии с поливом дождеванием. Исследуемое поле не орошается с середины 1990-х годов по настоящее время.

При отсутствии орошения купол грунтовых вод под ОУ постепенно стал растекаться, так что в 2006 г. на нижней части ОУ

Бюллетень Почвенного института им. В.В. Докучаева. 2019. Вып. 97.
Dokuchaev Soil Bulletin, 2019, 97

уровень грунтовых вод находился на глубине 3–5 м, в верхней – более 5 м (Новикова и др., 2009), а в 2016 г. – уже 7–9 м на всем ОУ, что способствовало постепенному рассолению почв (Новикова и др., 2009). На исследуемом поле грунтовые воды уже в 2006 г. были глубже 5 м.

В 2017 г. по диагонали поля в направлении поперек наблюдаемой неоднородности по данным дистанционного зондирования была заложена трансекта из шести разрезов (Ч-101 ... Ч-106), добуренных до глубины 2 м (рис. 1В). Отбор образцов производили через 10–20 см сплошной колонкой, учитывая генетические горизонты. Дополнительно использованы данные водной вытяжки двух скважин, выполненных Волгоградской гидромелиоративной партией (ВГМП) в 2017 г. на том же поле. Они расположены ближе к углам поля вдоль другой диагонали на темных полосах сравнительно недалеко от широкой светлой полосы, пересекающей исследуемое поле (рис. 1В).

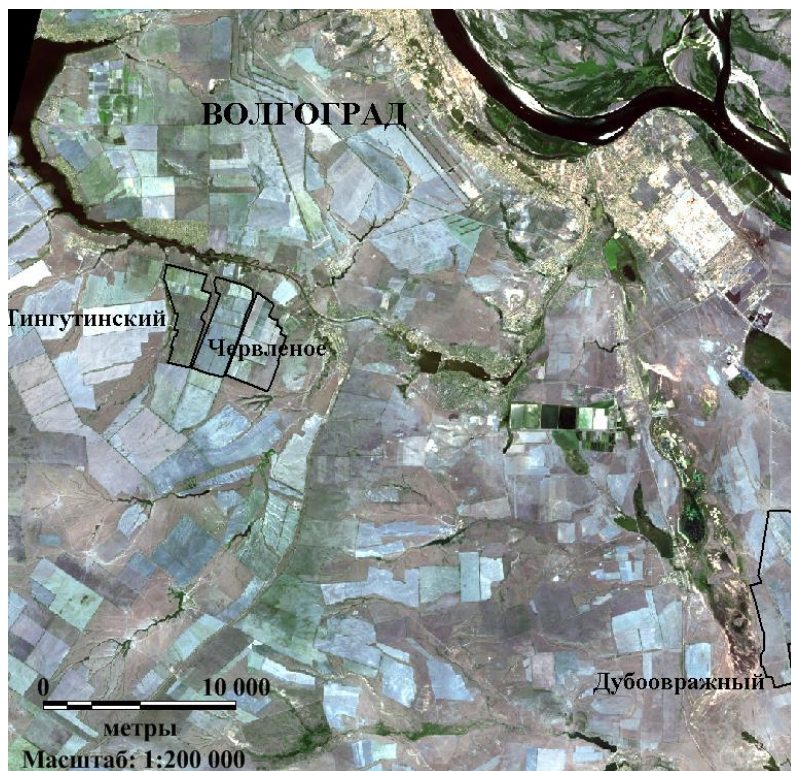
Названия почв даны по трем классификациям: СССР (К-1977) ([Классификация ..., 1977](#)), России (РЛ-2004(8)) ([Классификация ..., 2004](#); [Полевой определитель ..., 2008](#)) и международной WRB-2014 (update 2015) ([IUSS, 2015](#)). Диагностика почв производилась в соответствии с критериями, предусмотренными в каждой классификации, без процедуры корреляции классификаций.

Содержание воднорастворимых солей определяли двумя методами. Первый – стандартная водная вытяжка с соотношением почва : вода 1 : 5. Второй – определение активностей ионов Na^+ , Ca^{2+} , Cl^- (a_{Na} , a_{Ca} , a_{Cl} соответственно) ионоселективными электродами в почвенных пастах с постоянной влажностью 40 % (мас.) ([Руководство ..., 1990](#)). Регистрирующий прибор – иономер Эко-тест-120, измерительные электроды ЭЛИС-112Na, ЭЛИС-121Ca, ЭЛИС-131Cl, вспомогательный электрод ЭСП-10103/3.0 с LiOAc.

Долю обменного натрия в составе почвенного поглощающего комплекса (ESP – exchangeable sodium percentage, % от суммы обменных катионов) оценивали по кусочно-линейной модели, используя отношение $a_{\text{Na}}/\sqrt{a_{\text{Ca}}}$ по данным измерения активностей ионов натрия и кальция в пастах:

$$\begin{cases} \text{если } X \leq 10, & \text{то } Y = 1.1485 + 1.0197 X, \\ \text{если } 10 < X < 50, & \text{то } Y = 3.8404 + 0.8989 X - 0.0072 X^2, \\ \text{если } 50 \leq X < 100, & \text{то } Y = 15.375 + 0.3176 X, \\ \text{если } X > 100, & \text{то } Y = 37 + 0.1068 X, \end{cases}$$

где X – отношение $a_{Na}/\sqrt{a_{Ca}}$ активности ионов натрия и кальция
выражены в ммоль/л; Y – доля обменного натрия, %.



А

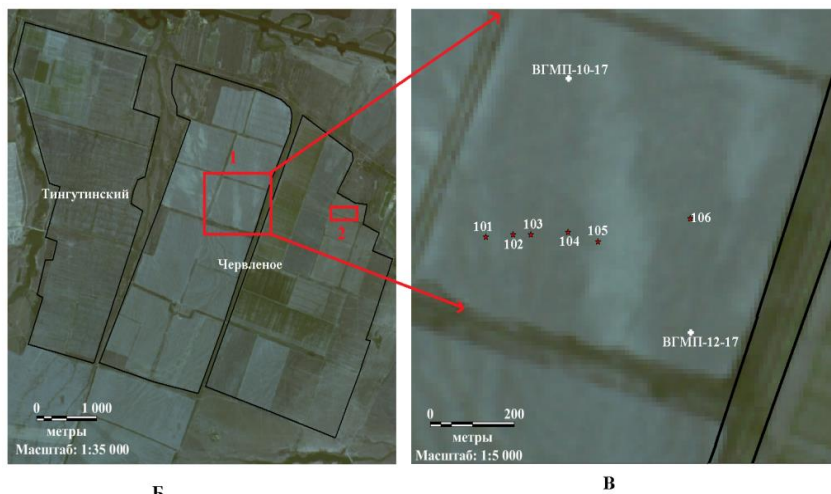


Рис. 1. Схема расположения точек отбора почвенных образцов на территории ОУ Червлёное Светлоярской ОС: А – на фоне фрагмента снимка Landsat-8 (июнь, 2015); Б, В – на фоне спутника Канопус (август, 2015). Обозначения на рис. Б: 1 – поле, на котором закладывали трансекту разрезов Ч-101 ... Ч-106; 2 – участок вдоль оросительного канала ([Кравченко и др., 2018](#)).

Fig. 1. Location of soil sampling points on the territory of the Experimental Plot Chervlyonoye (irrigation system Svetloyarskaya): А – a fragment of the Landsat-8 image (June, 2015) as the background; Б, В – the satellite Canopus data (August, 2015) as the background. Designations in fig. 1Б: 1 – the field on which the transect with soil profiles Ч-101 ... Ч-106 was laid; 2 – the plot along the irrigation canal ([Kravchenko et al., 2018](#)).

Содержание карбонатов определяли ацидометрически по Козловскому с пересчетом CO_2 карбонатов в CaCO_3 ([Руководство..., 1990](#)).

Двумерные графики распределения активности ионов и карбонатов в координатах (расстояние вдоль трансекты, глубина) строили методом интерполяции кригинг, учитывая анизотропию расположения точек по вертикали и горизонтали, в пакете программ Surfer.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Классификационное положение и морфологическое строение почв. Трансекта, включавшая шесть точек опробования, продемонстрировала, что в 2017 г. на исследуемом поле ОУ Червлёное не были обнаружены солонцы. Согласно классификации К-1977, на участке вскрыты светло-каштановые пахотные карбонатные солончаковатые и глубокосолончаковатые среднесуглинистые почвы на лёссовидных суглинках.

По субстантивным классификациям почв те же объекты представляются немного более разнообразными.

В терминах РК-2004(8) почвы имеют следующие формулы профиля (рис. 2). Разр. Ч-101 (расстояние 0–50 м) имеет профиль $P_{ca} - B_{Mca} - B_{CAdc} - B_{Cca} - C_{ca,cs}$ – агрозем аккумулятивно-карбонатный дисперсно-карбонатный солончаковатый глубоко гипс-содержащий. Разр. Ч-102 (расстояние 50–120 м) – $P_{ca} - B_{Mca} - B_{CAdc} - B_{CAnc} - B_{Cca} - C_{ca,cs}$ – агрозем аккумулятивно-карбонатный сегрегационный солончаковатый глубоко гипс-содержащий. Разр. Ч-103 (расстояние 120–170 м) – $P_{ca,r} - A_J(ca) - B_{Mca} - B_{CAnc} - B_{Cca} - C_{ca,cs}$ – агросветлогумусовая аккумулятивно-карбонатная сегрегационная стратифицированная глубоко-солончаковатая глубоко гипс-содержащая почва. Разр. Ч-104 (расстояние 170–230 м) – $P(ca),r - A_J(ca) - B_{Mca} - B_{CAnc} - B_{Cca} - C_{ca,cs}$ – агросветлогумусовая аккумулятивно-карбонатная сегрегационная стратифицированная солончаковатая глубоко гипс-содержащая почва. Разр. Ч-105 (расстояние 250–350 м) – $P_{ca,r} - B_{Cca} - C_{ca,cs}$ – агрозем карбонатный глубокосолончаковатый глубоко гипс-содержащий. Разр. Ч-106 (расстояние 400–520 м) – $P_{ca} - B_{Mca} - B_{CAnc} - B_{Cca} - C_{ca,cs}$ – агрозем аккумулятивно-карбонатный сегрегационный солончаковатый глубоко гипс-содержащий.

Основные различия между почвами наблюдаются в верхней части почвенного профиля. Во-первых, агрогумусовый (пахотный) гор. Р в пяти из шести разрезов имел сплошное бурное вскипание от HCl (индекс са), а в одном – локальное (индекс са в круглых скобках). Во-вторых, этот же гор. Р в трех разрезах (Ч-103 ... Ч-105) имел признаки частично или полностью насыпанного материала (индекс r – стратифицированный), подвергавшегося ежегод-

ному перемешиванию вспашкой в течение почти 60 лет. Это следует из соотнесения свойств самого гор. Р с нижележащими гор. АJ(ca) или ВСса.

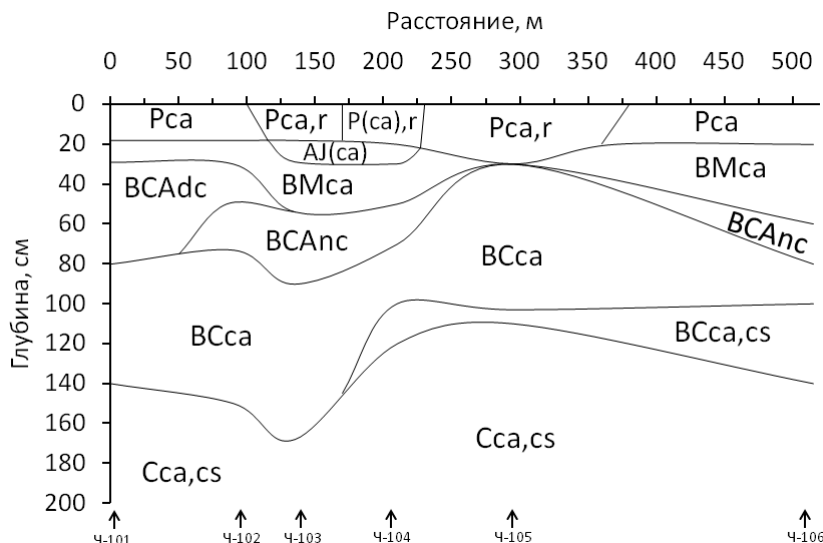


Рис. 2. Строение почвенных комбинаций вдоль транскеты. Индексация горизонтов по [ПК-2004\(8\)](#).

Fig. 2. The soil cover pattern along the transect. Indexation of horizons was performed according to [PK-2004\(8\)](#).

В-третьих, в разр. Ч-105, заложенном на широкой светлой полосе, наблюдаемой как непосредственно в поле, так и на космическом снимке, сразу под гор. Рса,г обнаружен переходный к почвообразующей породе гор. ВСса. Это означает, что почвенный профиль был довольно сильно срезан при строительной планировке. Наиболее вероятно, что отмеченная светлая полоса до строительства оросительной системы была представлена ареалами солонцов или, по крайней мере, комплексом почв с очень высокой долей солонцов. Для более определенного суждения недостаточно имеющейся архивной информации.

В-четвертых, два разреза (Ч-103 и Ч-104) вскрыли бывшую луговато-каштановую почву ложбины, засыпанную сверху при строительной планировке поверхности поля. Под гор. Рса,г или

P(са),г найден светлогумусовый гор. АJ(са), имеющий не сплошное, а локальное вскипание от HCl, ниже которого расположены структурно-метаморфический гор. ВМса с пропиткой дисперсными карбонатами и аккумулятивно-карбонатный гор. ВСАпс с белоглазкой (индекс пс – сегрегационные карбонаты).

В-пятых, в разр. Ч-101, Ч-102 и Ч-106 в средней части почвенного профиля наблюдались вариации карбонатных новообразований. В разр. Ч-106 под структурно-метаморфическим гор. ВМса сразу начинался аккумулятивно-карбонатный гор. ВСАпс с белоглазкой. В разр. Ч-102 между ними вклинился гор. ВСАдс – аккумулятивно-карбонатный горизонт с диффузными пятнами карбонатов при отсутствии более компактно сегрегированных форм. А в разр. Ч-101 совсем не обнаружена сегрегация карбонатов в виде белоглазки, но ближе к поверхности в гор. ВМса наблюдались несколько прерывистых горизонтальных вытянутых на 10–15 см и узких (0.5–1.5 см) неровных светлых полосок карбонатов. Очевидно, это результат гидрогенного накопления карбонатов при высоком уровне стояния грунтовых вод.

Нижняя часть профиля постепенного перехода к почвообразующей породе (лёссовидным суглинкам) всех точек опробования имеет общие черты: гор. ВСса и Сса,сs. Наблюдалась лишь вариация глубины проявления признаков и обилия скоплений мелкокристаллического гипса. В частности глубина верхней границы появления гипсовых скоплений изменялась от 100 до 168 см, что в названии почв отмечено, как “глубоко гипс-содержащие”. Карбонатные новообразования в этих горизонтах не зафиксированы.

Согласно международной классификации WRB-2014 (update 2015), все почвы имеют гор. cambic – срединный горизонт, в котором наблюдаются признаки почвенного преобразования, прежде всего, структуры и ряда других свойств по сравнению с почвообразующей породой. В данных почвах он соответствует структурно-метаморфическому гор. ВМса в пяти разрезах и верхней части гор. ВСса в разр. Ч-105, расположенной непосредственно ниже насыпанного пахотного гор. Рса,г. Наличие пахотного гор. Р во всех почвах является критерием использования квалификатора Agric. Все почвы средне- и тяжелосуглинистые, что соответствует квалификатору Loamic. Наличие насыпанного материала в трех

разрезах позволяет применить квалификатор Novic. Содержание обменного натрия более 15 % от емкости катионного обмена в засоленных горизонтах в пределах первого метра является основанием для использования квалификатора Sodic в пяти разрезах. В одном из них (Ч-103) обменного натрия меньше в первом метре (5–14 %) – используется квалификатор Protosodic. Солончаковатые почвы с засоленными горизонтами на глубине 30–100 см имеют признаки, удовлетворяющие квалификатору Endoprotosalic, а глубокосолончаковатые с засоленными горизонтами на глубине 100–150 см – Bathyprotosalic. Наличие белоглазки в аккумулятивно-карбонатном гор. ВСАnc соответствует квалификатору Protocalcic. Содержание CaCO_3 более 15 % в гор. ВМСa и ВСАnc в разрезах Ч-104 и Ч-106 на глубине от 30 до 80 см является признаком гор. calcic. Полностью карбонатный почвенный профиль при отсутствии свойств protocalcic или гор. calcic позволяет применить квалификатор Calcaric. Присутствие гипсовых новообразований только глубже 100 см соответствует квалификатору Bathygypsic.

Учитывая последовательность диагностики реферативных почвенных групп (РПГ) в соответствии с ключом-определителем, принятым в WRB-2014, два разреза (Ч-104 и Ч-106), имеющие гор. calcic, относятся к РПГ Calcisols, а остальные четыре – к РПГ Cambisols. Полные названия почв по WRB-2014 (update 2015): разр. Ч-101 – Calcaric Sodic Endoprotosalic Cambisol (Loamic, Aric, Ochric, Bathygypsic); разр. Ч-102 – Sodic Endoprotosalic Cambisol (Loamic, Aric, Protocalcic, Ochric, Bathygypsic); разр. Ч-103 – Protosodic Bathyprotosalic Cambisol (Loamic, Aric, Protocalcic, Ochric, Novic); разр. Ч-104 – Cambic Calcisol (Loamic, Aric, Hypocalcic, Novic, Ochric, Bathyprotosalic, Sodic, Bathygypsic); разр. Ч-105 – Calcaric Protosodic Bathyprotosalic Cambisol (Loamic, Aric, Ochric, Bathygypsic); разр. Ч-106 – Cambic Calcisol (Loamic, Aric, Hypocalcic, Ochric, Endoprotosalic, Sodic, Bathygypsic).

Распределение карбонатов.

Как отмечалось выше, большинство почв исследуемого поля имеют сплошное бурное вскипание от HCl , обусловленное наличием дисперсных карбонатов в пахотном горизонте. Исключение составляют почвы с локальным вскипанием. Они приурочены к срединной части более темной полосы на космическом снимке, в

которой обнаружена частично засыпанная при планировке лугова-то-каштановая почва ложбины. На рисунке 3 представлено двумерное распределение содержания CaCO_3 вдоль трансекты, пересекающей полосчатый рисунок поверхности в поперечном направлении. Полученные результаты свидетельствуют, что наиболее высокое содержание CaCO_3 (12–13 %) в поверхностном горизонте приурочено к светлой полосе (разр. Ч-105). Сильное осветление поверхности отчетливо проявлялось и в полевых условиях при визуальном наблюдении. Почвы более темных участков поля (и на снимке) характеризовались содержанием CaCO_3 в пределах от 1.0 до 2.4 %. Контраст по содержанию карбонатов между темными и светлой полосами представлен 5–10-кратным увеличением показателя в пахотном слое светлой полосы.

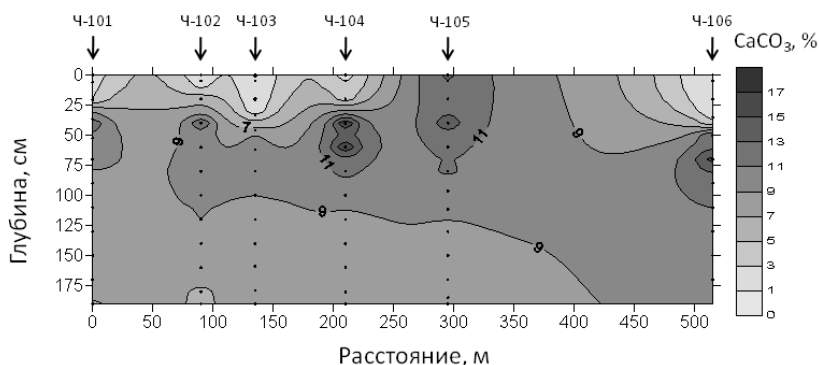


Рис. 3. Двумерное распределение содержания CaCO_3 в почвах трансекты.
Fig. 3. Two-dimensional distribution of CaCO_3 in soils of the transect.

В срединных и нижних горизонтах различие в содержании карбонатов существенно меньше. В гор. ВМСа и особенно ВСАнс или ВСАdc рассматриваемый показатель имеет наибольшие значения, изменяясь от 9.0 до 16.4 %. Самые высокие значения CaCO_3 (15.6–16.4 %) отмечены в гор. ВСАнс в разр. Ч-104 и Ч-106, что позволило отнести эти аккумулятивно-карбонатные горизонты с белоглазкой к гор. calcic, а почвы – к РПГ Calcisols по WRB. Глубже в гор. ВСса и Сса,cs содержание CaCO_3 на 4–5 % меньше, составляя 6.5–9.5 %.

Заметная карбонатность бывших орошаемых почв, используемых последние 20 лет под пашню в системах сухого земледелия, может быть обусловлена несколькими причинами. Первая из них – планировка поля при строительстве оросительной системы. Выпуклые участки поверхности были срезаны, обнажив срединные или даже нижние (как в разр. Ч-105) карбонатные горизонты, а вогнутые (разр. Ч-103 и Ч-104) – частично засыпаны смешанным материалом разных горизонтов, среди которых были и срезанные карбонатные. Раньше такая практика была обычной ([Зимовец, 1991](#)). Вторая причина – изменение водного режима орошаемых почв в сторону дополнительного увлажнения в жаркий период года, в результате которого увеличилась длительность периодов восходящих потоков влаги к поверхности почвы между поливами. Более высокая биологическая активность орошаемых почв способствовала растворению и миграционной подвижности карбонатов кальция. Все вместе часто приводило к подтягиванию карбонатов кальция в ранее некарбонатные пахотные горизонты. На такой механизм обращали внимание многие авторы ([Барановская, Азовцев, 1981](#); [Любимова, Дегтярева, 2000](#), [Любимова, 2002](#); [Любимова, Новикова, 2016](#); [Горохова и др., 2018а, 2018б](#)).

Профильное распределение солей по данным водной вытяжки.

По содержанию воднорастворимых солей верхние горизонты до глубины 30 см формально являлись незасоленными во всех разрезах и скважинах, заложенных в 2017 г. на исследуемом поле. Верхняя граница первого от поверхности засоленного горизонта в большинстве точек опробования залегала на глубине от 30 до 100 см. Иными словами, большая часть почв исследуемого поля в 2017 г. относилась к солончаковатым разностям (рис. 4). Более глубокое расположение верхней границы первого от поверхности засоленного горизонта (120 см) наблюдалось в бывшей луговато-каштановой почве ложбины (разр. Ч-103, рис. 5). Эта почва являлась глубокосолончаковатой.

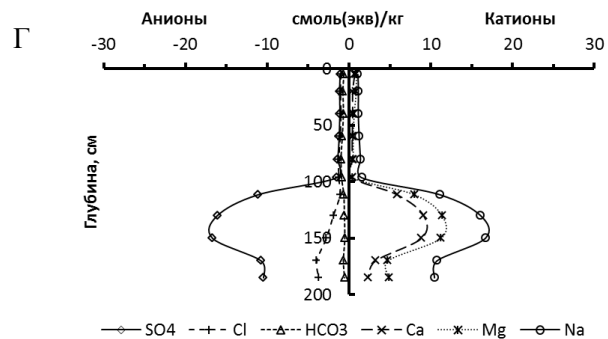
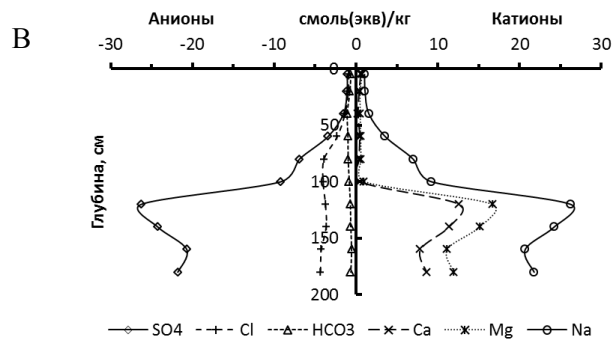
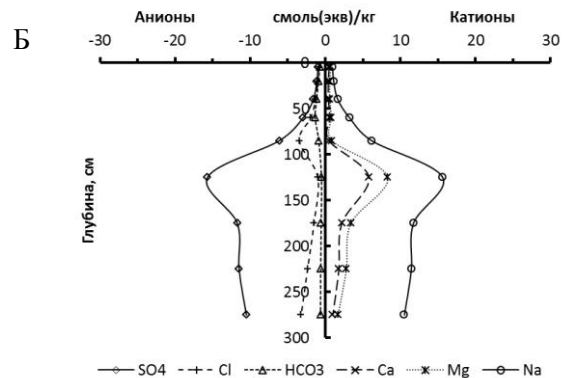
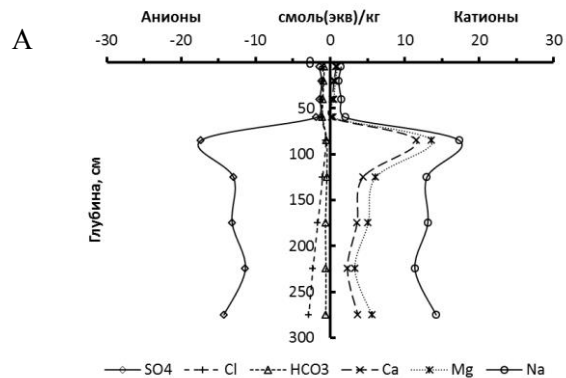
Вертикальный профиль распределения воднорастворимых солей в почвах участка имел срединно-аккумулятивную форму с максимумом содержания солей, соответствующему сильной степени засоления. Положение этого максимума во всех почвах

участка приурочено ко второму метру от поверхности на глубине от 10–120 до 170–200 см. По данным водной вытяжки 1 : 5, химизм этих наиболее засоленных горизонтов относился к сульфатному натриевому с гипсом или хлоридно-сульфатному натриевому или магниевому-натриевому с гипсом.

Верхняя часть солевого профиля представлена поверхностными незасоленными горизонтами, в которых с поверхности или с глубины 10–20 см наблюдалась токсичная щелочность в водной вытяжке 1 : 5 и с глубины 10–30 см токсичный гидрокарбонат натрия в водной вытяжке (рис. 4Ж, 4З). Первый от поверхности засоленный горизонт обычно имел слабую степень засоления. В составе катионов преобладал натрий, а среди анионов – хлориды или сульфаты с токсичной щелочностью. Мощность слабозасоленных горизонтов обычно не превышала 20 см. Глубже степень засоления увеличивалась до средней с непостоянным соотношением хлоридов и токсичных сульфатов, которое соответствовало сульфатному, хлоридно-сульфатному или сульфатно-хлоридному химизму по анионам. Еще глубже располагался горизонт максимального засоления, о котором шла речь выше.

Профильное распределение активностей ионов.

Следует обратить внимание, что измерения активностей ионов Na^+ , Ca^{2+} , Cl^- в почвенных пастах с постоянной влажностью 40 % (мас.), с одной стороны, дают такое же представление о вертикальном распределении солей в почве, как и водная вытяжка (сравните рис. 4Е и рис. 5 для разр. Ч-104 ... Ч-106), с другой стороны, представляют иную информацию о химизме солей. Из рисунка 5 следует, что активности ионов Na^+ (a_{Na}) и Cl^- (a_{Cl}) имеют очень похожие вертикальные профили распределения. В четырех разрезах (Ч-101, Ч-102, Ч-104, Ч-106) эти профили почти накладываются друг на друга: на большей части участка кривой a_{Na} немного больше a_{Cl} , а на других участках кривой, наоборот, a_{Cl} больше a_{Na} . В двух остальных разрезах (Ч-103 и Ч-105) a_{Na} больше a_{Cl} по всему профилю.



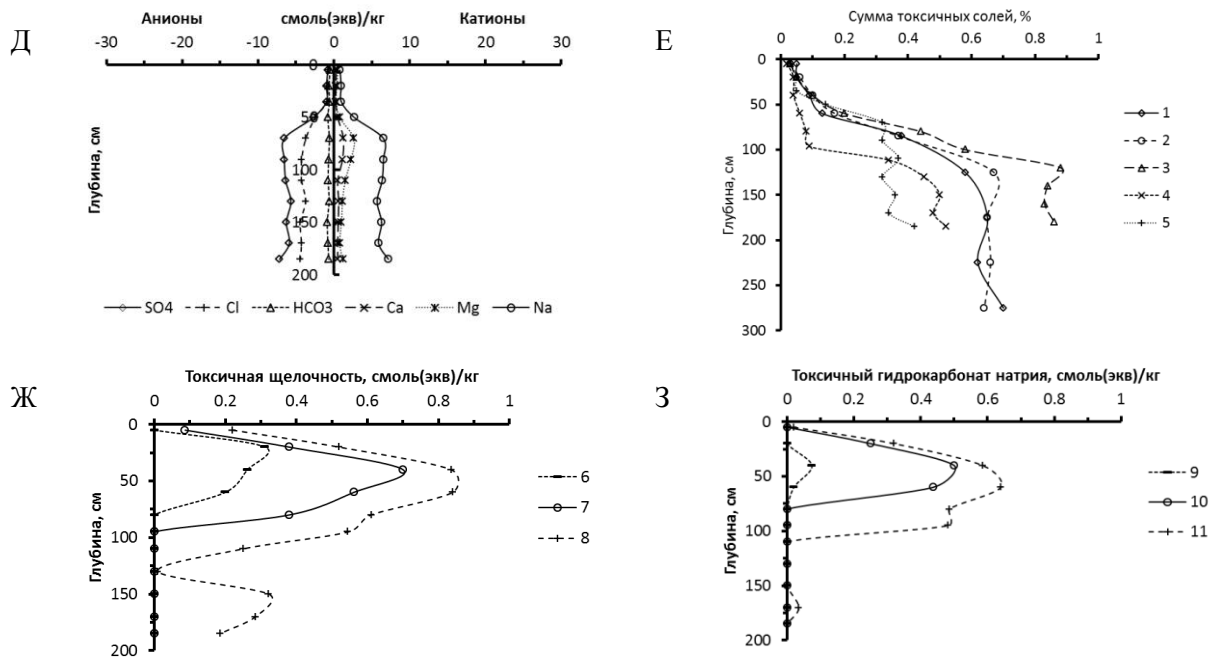
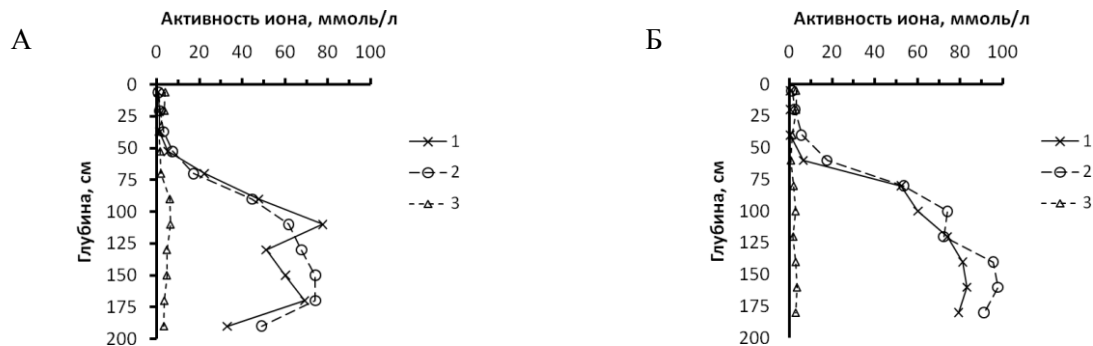


Рис. 4. Засоленность почв по данным водной вытяжки 1 : 5. А – Д – двусторонние графики состава водной вытяжки: А – скв. ВГМП-10-2017; Б – скв. ВГМП-12-2017; В – разр. Ч-104; Г – разр. Ч-105; Д – разр. Ч-106; Е – вертикальное распределение суммы токсичных солей (%) водной вытяжки: 1 – скв. ВГМП-10-2017; 2 – скв. ВГМП-12-2017; 3 – разр. Ч-104; 4 – разр. Ч-105; 5 – разр. Ч-106; Ж – вертикальное распределение минимума (6), медианы

(7) и максимума (8) токсичной щелочности (смоль(экв)/кг); 3 – вертикальное распределение минимума (9), медианы (10) и максимума (11) гидрокарбонатов натрия в водной вытяжке (смоль(экв)/кг).

Fig. 4. Soil salinity according to water extraction (1: 5) data. A – D – two-sided graphs of the composition of water extract: A – bore hole ВГМП-10-2017; B – bore hole ВГМП-12-2017; В – soil profile Ч-104; Г – soil profile Ч-105; Д – soil profile Ч-106; E – the vertical distribution of toxic salts (%) of the aqueous extract: 1 – bore hole ВГМП-10-2017; 2 – bore hole ВГМП-12-2017; 3 – soil profile Ч-104; 4 – soil profile Ч-105; 5 – soil profile Ч-106; Ж – is the vertical distribution of minimum (6), median (7) and maximum (8) of toxic alkalinity, cmol_e/kg ; 3 – the vertical distribution of minimum (9), median (10) and maximum (11) of sodium bicarbonate in the aqueous extract, cmol_e/kg .



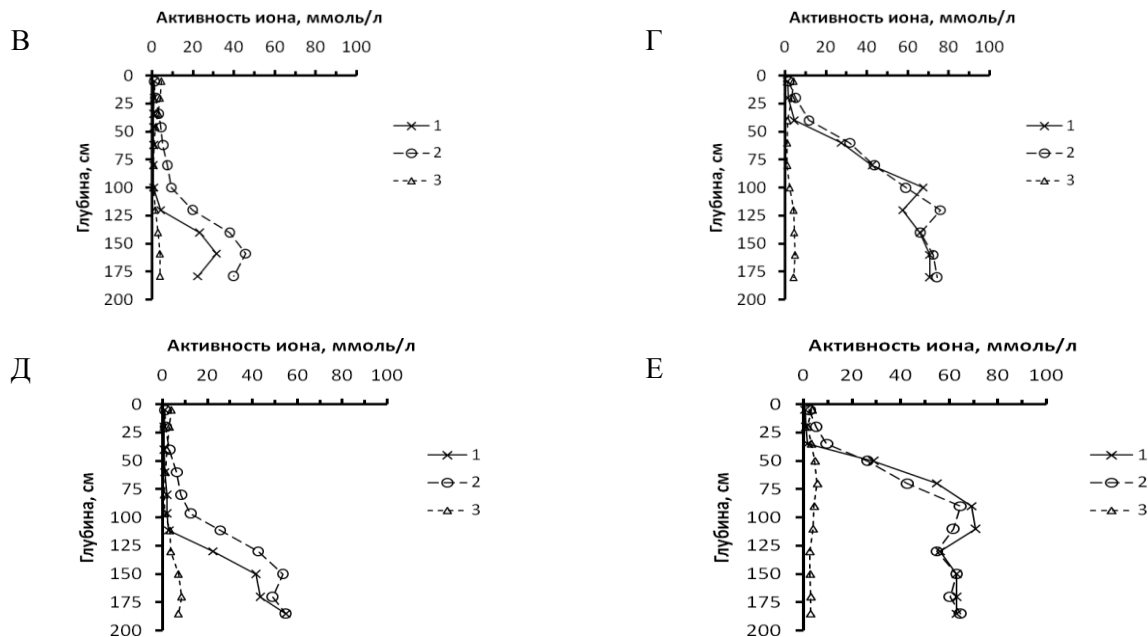


Рис. 5. Вертикальное распределение активности Cl^- (1), Na^+ (2), Ca^{2+} (3) в почвах транsekты (влажность пасты 40 % (мас.)): А – разр. Ч-101; Б – разр. Ч-102; В – разр. Ч-103; Г – разр. Ч-104; Д – разр. Ч-105; Е – разр. Ч-106.
Fig. 5. Vertical distribution of Cl^- (1), Na^+ (2), Ca^{2+} (3) activity in soils of the transect (paste moisture 40 % (wt.)): А – soil profile Ч-101; Б – soil profile Ч-102; В – soil profile Ч-103; Г soil profile Ч-104; Д – soil profile Ч-105; Е – soil profile Ч-106.

Небольшая разница в величинах активности Na^+ и Cl^- , а иногда и более высокие значения для хлоридов, по сравнению с натрием, свидетельствует о том, что при влажности, приблизительно соответствующей полной влагоемкости почвы, в жидкой фазе почвы ионы натрия преимущественно компенсированы хлорид-ионами, а доля сульфатов натрия и гидрокарбонатов натрия невелика. В противоположность этому, по данным водной вытяжки, химизм по анионам преимущественно сульфатный или хлоридно-сульфатный. Такое различие обусловлено присутствием гипса в твердой фазе почвы.

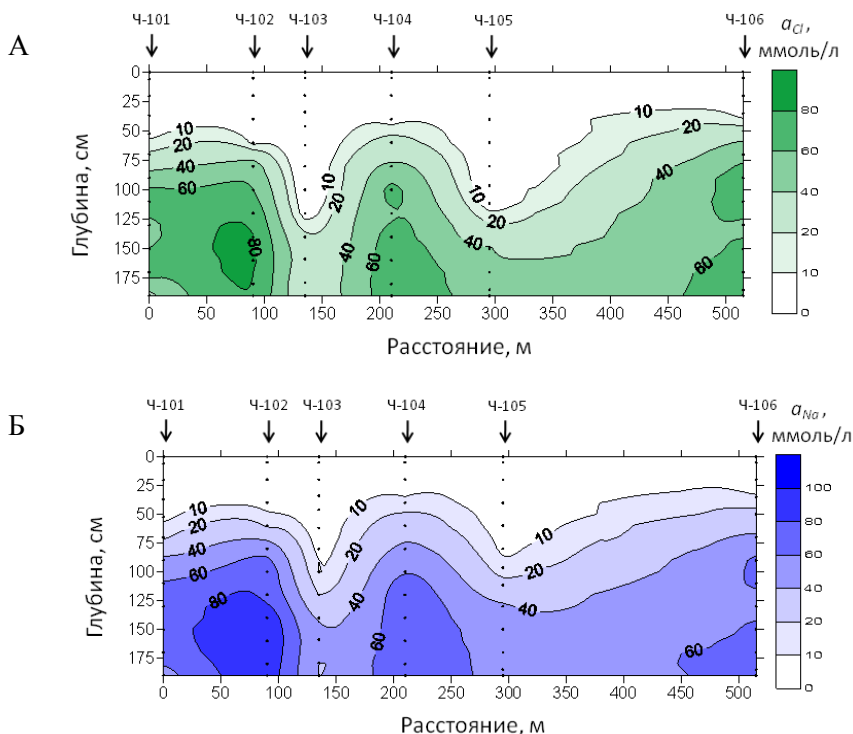
При производстве водной вытяжки 1 : 5 (влажность 500 % (мас.)) гипс твердой фазы растворяется в большем количестве, чем при естественной влажности почвы (в данном случае влажность пасты 40%(мас.)), поскольку его растворимость ограничена 2 г/л – чем больше воды, тем больше гипса из твердой фазы растворяется. Растворение гипса обеспечивает дополнительное поступление кальция в раствор водной вытяжки 1 : 5. В результате соотношение ионов Na^+ и Ca^{2+} в жидкой фазе водной вытяжки 1 : 5 изменяется по сравнению с таковым в почвенном растворе при влажности 40 % в пользу ионов Ca^{2+} , что сопровождается реакциями ионного обмена между раствором и почвенным поглощающим комплексом. Кальций раствора вытесняет часть обменного натрия в раствор. Поскольку кальций в растворе компенсировался сульфат-ионами при растворении гипса, после ионного обмена обменный натрий, вытесненный в раствор, становится сульфатом натрия. В результате, по данным водной вытяжки 1 : 5 из образцов, содержащих гипс, всегда, даже при расчете по токсичным солям, химизм засоления оказывается более сульфатным, по сравнению с данными по почвенным растворам или вытяжкам из паст. На подобный методический эффект раньше обращали внимание при изучении почв Заволжья ([Славный и др., 1970, 1973](#); [Славный, 2003](#); [Зимовец, 1991](#)).

Двумерное распределение солей в почвенной комбинации.

На рисунке 6 представлены двумерные графики распределения активности ионов и производных от них величин вдоль трансекты, пересекающей полосчатую структуру в поперечном направлении. Распределения a_{Na} и a_{Cl} имели похожий волнообраз-

ный характер изменения вдоль трансекты, демонстрируя чередование солончаковых и глубокосолончаковых почв. Наиболее глубокое залегание первого от поверхности засоленного горизонта ($a_{Na} > 20$ ммоль/л) наблюдалось в середине темной полосы в бывшей луговато-каштановой почве ложбины (разр. Ч-103) и, наоборот, в светлой полосе в остаточной части почвы после срезки при строительной планировке поля (разр. Ч-105).

Сравнительно близко расположенные засоленные горизонты на большей части исследуемого поля являются результатом вторичного засоления почв участка в 1980-х и 1990-х годах в условиях поднявшего выше критического уровня грунтовых вод в дополнение к исходному пятнистому засолению почв степных солонцовых комплексов.



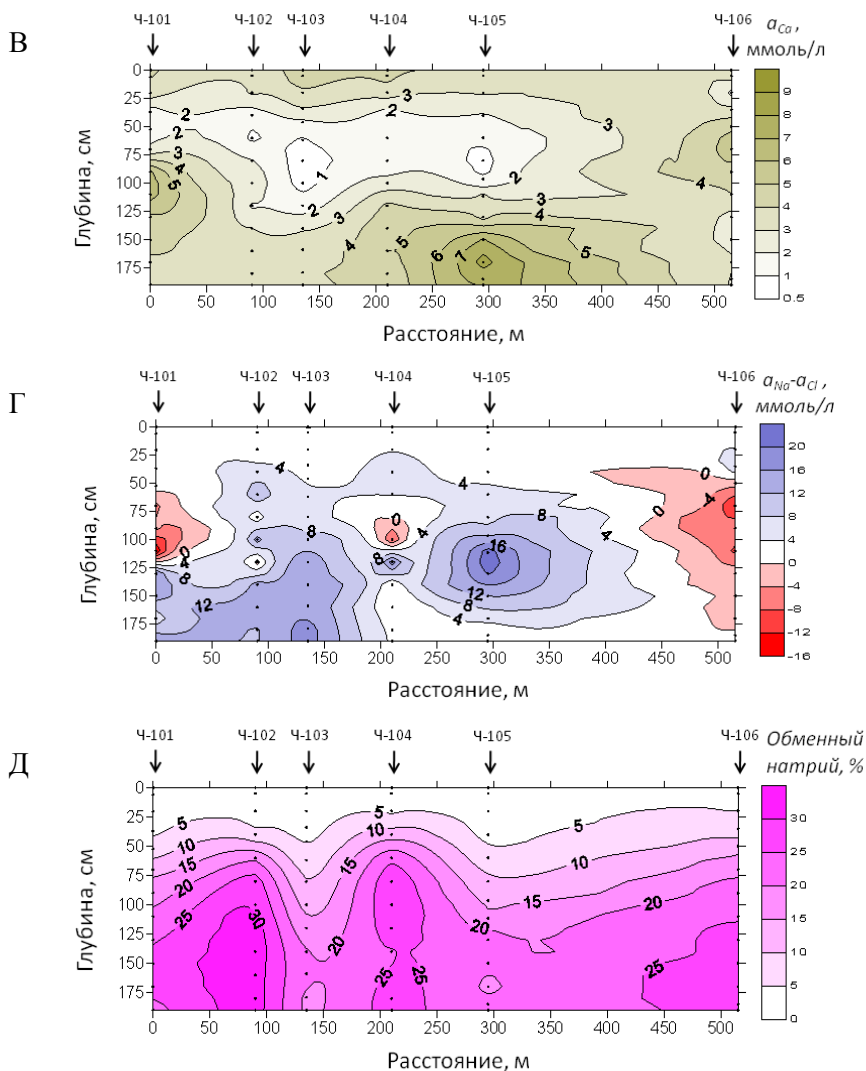


Рис. 6. Двумерное распределение активности Cl^- (А), Na^+ (Б), Ca^{2+} (В), разности активностей Na^+ и Cl^- (Г), содержания обменного натрия (ESP, % от ЕКО) (Д) в почвах транsekты

Fig. 6. Two-dimensional distribution of Cl^- (A), Na^+ (Б), Ca^{2+} (B) ions activity, differences in Na^+ и Cl^- (Г) activities, exchangeable sodium percent

(ESP, % of CEC, – as a percentage of cation-exchange capacity) (Д) in transect soils.

К тому времени на ОУ Червленое преобладали солончаковые разности, т. е. засоленные горизонты начинались в пределах верхних 30 см. За два десятка лет после прекращения орошения на участке произошло растекание купола грунтовых вод, что способствовало медленному рассолению поверхностного горизонта.

Особый интерес представляют разр. Ч-103 и Ч-105, которые в 2017 г. оказались глубокосолончаковыми. Для обоих разрезов характерны существенно более низкие значения a_{Cl} , по сравнению с a_{Na} , по всему профилю (рис. 5В, 5Д, 6А, 6Б), что можно рассматривать как результат более быстрого вымывания несорбирующегося хлорид-иона по сравнению с ионами натрия, которые находятся и в растворе, и в обменном состоянии. Промывание верхних горизонтов от легкорастворимых солей в профиле бывшей луговато-каштановой почвы ложбины (разр. Ч-103) представляется очевидным даже в условиях выравнивания поля планировкой. С другой стороны, профиль Ч-105 представлен гор. ВСса сразу под пахотным слоем. Наиболее вероятно, что гор. ВСса исходно был засоленным и являлся нижней частью профиля солонца до строительной планировки поля, в результате которой верхние горизонты были срезаны и удалены на соседние участки с территории современной светлой полосы на поле. Об этом свидетельствует и верхняя граница обильных гипсовых новообразований, которая в разр. Ч-105 расположена на глубине 100 см – ближе всего к современной поверхности почвы, по сравнению с остальными точками опробования. По этой причине наиболее высоко расположенный горизонт с мелкокристаллическим гипсом можно считать сохранившимся признаком исходного профиля солончакового солонца.

Сейчас трудно определить период времени, когда в действительности произошло рассоление этой почвы. По опыту исследования солевого состояния бывших солонцов Нижнего Поволжья в 1960-х ... 1980-х годах ([Зимовец, 1991](#)), удаление планировкой верхней части профиля с солонцовым горизонтом до засоленного карбонатного горизонта в условиях орошения приводило к рассолению бывших срединных горизонтов солонцов за 5–15 лет. По-

этому для рассматриваемой почвы можно допустить, во-первых, частичное рассоление в период ее орошения, и, во-вторых, дополнительное рассоление атмосферными водами без орошения в последние два десятилетия.

Обратим внимание, что в формально незасоленных верхних горизонтах исследуемых почв активность Na^+ изменяется от 1 до 10–20 ммоль/л, что при влажности 40 % соответствует содержанию воднорастворимого натрия в почве от 0.04 до 0.4–0.8 смоль(экв)/кг. Этот факт важен, прежде всего, в методическом отношении. Измерение активности Na^+ (и других ионов) в пастах с помощью ионоселективных электродов позволяет дифференцированно оценивать солевое состояние незасоленных поверхностных горизонтов. Почвы, не содержащие легкорастворимых солей натрия во всем почвенном профиле, обычно имеют величины активности Na^+ в пастах менее 0.3–0.4 ммоль/л. Увеличение a_{Na} до 1–2 ммоль/л является первым индикатором, что где-то близко находится источник солей натрия в почвах, породах или грунтовых водах. Увеличение a_{Na} до 5–15 ммоль/л в поверхностных горизонтах обычно является индикатором того, что в почвенном профиле с очень высокой вероятностью имеются засоленные горизонты, а в самих поверхностных незасоленных горизонтах может быть повышенная щелочность и накопление обменного натрия в диапазоне до 5–12 % от ЕКО. Поэтому на основе площадного опробования поверхностных горизонтов и определения в образцах активности Na^+ в пастах можно оценить локализацию засоленных почв на участке для последующего планирования целенаправленного опробования почв для оценки параметров засоленности.

Активность ионов Ca^{2+} (a_{Ca}) в жидкой фазе паст при влажности 40 % (мас.) изменяется в диапазоне от 0.7 до 8.5 ммоль/л. Величины a_{Ca} 0.5–3 ммоль/л характерны для большинства почв степной зоны в незасоленных горизонтах. Они контролируются карбонатно-кальциевым равновесием. В пределах исследуемой трансекты этот диапазон является фоновым. На нем выделяются три области с более высокими значениями a_{Ca} : в средних частях профилей Ч-101, Ч-106 и в нижних горизонтах разр. Ч-104 и Ч-105.

Величины $a_{Ca} > 3$ ммоль/л потенциально могут быть связаны с растворением гипса или с наличием еще более растворимой соли – хлорида кальция. Для оценки ситуации в почвах трансекты сначала рассмотрим распределение разницы активностей ионов натрия и хлоридов ($a_{Na} - a_{Cl}$) (рис. 6Г).

Величина ($a_{Na} - a_{Cl}$) в почвах трансекты изменяется от -16 до $+23$ ммоль/л. Положительные значения означают, что катионы натрия в жидкой фазе пасты при влажности 40 % компенсированы не только хлоридами, но и другими анионами – сульфатами и/или гидрокарбонатами. На двумерной диаграмме (рис. 6Г) положительные значения преобладают, причем большая часть из них соответствует диапазону ($a_{Na} - a_{Cl}$) от 0 до 8 ммоль/л. Последнее означает явное доминирование хлоридов среди анионов, компенсирующих катионы натрия. Более высокие значения ($a_{Na} - a_{Cl}$) от 8 до 23 ммоль/л наблюдались в средней части профилей разр. Ч-104 и Ч-105, а также в нижних горизонтах в разр. Ч-101 ... Ч-103. Для этих горизонтов в жидкой фазе паст характерно помимо хлоридов присутствие заметных количеств сульфатов натрия. Доля последних в средне- и сильнозасоленных горизонтах ($a_{Na} > 40$ ммоль/л) составляет от 2–10 до 40–45 % от содержания солей натрия (оценка по соотношению $(a_{Na} - a_{Cl})/a_{Na}$), что соответствует хлоридному или сульфатно-хлоридному химизму по анионам, а в слабозасоленных (a_{Na} 20–40 ммоль/л) горизонтах – увеличивается до 60–90 %, соответствующее хлоридно-сульфатному или даже сульфатному химизму.

Отрицательные значения разницы ($a_{Na} - a_{Cl}$) означают, что хлорид-ионы не полностью компенсируются катионами натрия, в жидкой фазе присутствуют хлориды кальция и/или магния. Области с отрицательной разницей ($a_{Na} - a_{Cl}$), окрашенные на рисунке 6Г в красные тона, приурочены к средней части профиля без гипсовых новообразований в разр. Ч-101, Ч-104 и Ч-106. Сравнивая распределение разницы ($a_{Na} - a_{Cl}$) (рис. 6Г) с распределением a_{Ca} (рис. 6В), можно сделать вывод о совпадении отрицательных значений ($a_{Na} - a_{Cl}$) с повышенными значениями a_{Ca} в разр. Ч-101 и Ч-106, означающем присутствие хлоридов кальция. В разр. Ч-104 в небольшой области разницы ($a_{Na} - a_{Cl}$), равной -14.8 ммоль/л, величина a_{Ca} составляет 2.4 ммоль/л, что затруднительно связать с

присутствием хлорида кальция. В этом горизонте, по-видимому, присутствует хлорид магния.

Наличие в профиле почв хлоридов кальция и магния на фоне чуть глубже расположенных горизонтов с многочисленными скоплениями мелкокристаллического гипса часто является признаком вторичного засоления почвенного профиля от близко расположенных грунтовых вод ([Научные основы..., 2013](#)). В исследованных почвах грунтовые воды были на глубине 1.5–3.0 м в конце 1980-х – начале 1990-х годов. В 2017 г. они залегали глубже 7 м. По этой причине наблюдаемое наличие хлоридов кальция и магния в средней части профиля некоторых почв участка допустимо рассматривать в качестве остаточного признака бывшего вторичного засоления.

Выше отмечали, что повышенные значения $a_{Ca} > 3$ ммоль/л встретились в трех областях двумерного распределения a_{Ca} вдоль трансекты. Две из них оказались обусловленными присутствием хлоридов кальция. В третьей области значения a_{Ca} от 3 до 8 ммоль/л сопряжены с положительными значениями ($a_{Na} - a_{Cl}$) и наличием обильных выделений мелкокристаллического гипса. Сравнительно высокая концентрация хлоридов натрия (40–50 ммоль/л) при низкой доле (около 10–20 %) сульфатов натрия в растворе обеспечила растворение гипса и наблюдавшийся диапазон активности ионов кальция в растворе.

На рисунке 6Д представлено двумерное распределение доли обменного натрия в почвенном поглощающем комплексе почв трансекты. Оно похоже на распределение активности ионов Na^+ в пастах (рис. 6Б) – тоже волнообразное, но чуть более сглаженное изменение вдоль трансекты. Максимальные значения доли обменного натрия наблюдались в наиболее засоленных горизонтах, что является следствием явного доминирования среди катионов почвенных растворов ионов Na^+ . Это общая закономерность для большинства почв, содержащих соли натрия ([Хитров, Зимовец, 1988](#)).

Обратим внимание на верхние и срединные незасоленные горизонты, расположенные на глубине от 20–30 до 70–120 см, в которых доля обменного натрия составляет от 5 до 15 % от суммы обменных катионов (рис. 6Д). Для этих же горизонтов, по данным

водной вытяжки 1 : 5, характерно наличие токсической щелочности и гидрокарбонатов натрия. Подобное сочетание признаков означает наличие физико-химических условий развития солонцового процесса ([Научные основы..., 2013](#)), который на данный момент еще не привел к возникновению морфологических признаков подвижности илистых частиц, по-видимому, за счет сдерживающего агрегирующего влияния дисперсных карбонатов кальция, пропитывающих эти горизонты. Иными словами, почвы не являются солонцеватыми, но являются засоленными. По этой причине они содержат обменный натрий более 5 % не только в засоленных, но и в незасоленных горизонтах, хотя сплошная пропитка карбонатами кальция препятствует реальному осолонцеванию почв даже при актуальных физико-химических условиях начала процесса.

Сравним солевое состояния почв данного поля с опубликованными данными по почвам в приканальной полосе ([Кравченко и др., 2018](#)), расположенным в 1.5 км восточнее на том же ОУ Червленое. Во-первых, почвы обоих полей были ранее вторично засолены в условиях высокого стояния грунтовых вод в 1980-х гг. с той лишь разницей, что почвы вдоль оросительного канала были засолены сильнее ([Горохова, Панкова, 1997](#)). Во-вторых, оба участка не орошаются с середины 1990-х, что привело к понижению грунтовых вод и частичному рассолению почв атмосферными осадками за последние два десятилетия. На обоих участках в 2017 г. почвы из солончаковых стали солончаковатыми, некоторые глубокосолончаковатыми, а солевой профиль приобрел срединно-аккумулятивную форму с максимумом во втором метре. В-третьих, в некоторых почвах обоих участков в средней части профиля сохранились следы остаточного вторичного засоления в виде присутствия хлоридов кальция и магния на фоне доминирующего хлорида натрия.

Проведем также предварительное сравнение представленных данных о солевом состоянии почв на отмеченных выше двух полях ОУ Червленое ([Кравченко и др., 2018](#); материалы данной статьи) с опубликованными данными по почвам Светлоярского ОУ ([Горохова и др., 2018б](#)). Исследованные почвы ОУ Червленое, развитые на лёссовидных суглинках склонов возвышенности Ергени, отличаются более сильной степенью засоления и более

близким залеганием засоленных горизонтов к поверхности по сравнению с почвами Светлоярского ОУ, развитыми на более легких по гранулометрическому составу хвалыньских суглинках Северной Сарпинской низменности при относительно глубоком залегании (более 5 м) шоколадных глин. Помимо отмеченной разницы гранулометрического состава, следует отметить, что почвы ОУ Червленое в силу сложившихся гидрогеологических условий при орошении во второй половине XX в. оказались подвержены более сильному вторичному засолению в 1980-х, что отмечалось ранее Гороховой ([Горохова, Панкова, 1997](#)).

ВЫВОДЫ

1. Неоднородное изображение спектральной яркости на космическом снимке в виде чередующихся более темных и более светлых широких полос, ориентированных по уклону местности, на исследуемом поле ОУ Червленое обусловлено разным содержанием карбонатов кальция в пахотном горизонте. В светлой полосе в поверхностном горизонте содержание CaCO_3 в 5–10 раз больше, чем в темных полосах. Рисунок изображения на космическом снимке не отражает засоленность почв участка. Светлые полосы соответствуют почвам, верхняя часть профиля которых была срезана во время планировки поля при строительстве оросительной системы, а солевое состояние изменилось за полвека. На более темных участках засоленность почв сильно варьирует.

2. Почвы участка, вторично засоленные к середине 1990-х в условиях орошения и подъема грунтовых вод выше критического уровня, в 2017 г. после двух десятилетий прекращения орошения частично рассолены с поверхности до глубины 40–120 см. В возникших незасоленных верхних горизонтах сохраняется токсическая щелочность и содержание обменного натрия составляет 5–15 % от суммы обменных катионов, но морфологических признаков солонцеватости (подвижности ила) не наблюдается из-за сплошной пропитки почвенной массы дисперсными карбонатами. В отдельных почвах в срединных слабо- и средnezасоленных горизонтах присутствуют хлориды кальция и магния, свидетельствующие о сохранившихся остаточных признаках прежнего вторичного засоления почв.

Бюллетень Почвенного института им. В.В. Докучаева. 2019. Вып. 97.
Dokuchaev Soil Bulletin, 2019, 97

3. Субстантивные классификации почв России (2004) и WRB (IUSS, 2015) позволяют более дифференцированно выявлять причины наблюдаемых изменений почвенного покрова оросительных систем Поволжья по сравнению с классификацией почв СССР (1977).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Барановская В.А., Азовцев В.И. Влияние орошения на миграцию карбонатов в почвах Поволжья // Почвоведение. 1981. № 10. С. 17–27.
2. Горохова И.Н., Панкова Е.И. Метод дистанционного контроля за состоянием орошаемых земель юга России // Аридные экосистемы. 1997. Т. 3. № 5. С. 26–34.
3. Горохова И.Н., Хитров Н.Б., Панкова Е.И., Прокопьева К.О. Засоленность почв Светлоярского орошаемого массива в Волгоградской области в 2010-х годах // Бюллетень Почвенного института имени В. В. Докучаева. 2018 (а). Вып. 93. С. 75–93. DOI: [10.19047/0136-1694-2018-93-75-93](https://doi.org/10.19047/0136-1694-2018-93-75-93).
4. Горохова И.Н., Хитров Н.Б., Прокопьева К.О., Харланов В.А. Почвенный покров Светлоярской оросительной системы через полвека мелиоративных воздействий // Почвоведение. 2018 б. № 8. С. 1–12. DOI: [10.1134/S0032180X18080130](https://doi.org/10.1134/S0032180X18080130).
5. Государственный (национальный) доклад о состоянии и использовании земель в Российской Федерации в 2015 г. Министерство эконом. развития, Федеральная служба гос. регистрации, кадастра и картографии. М. 2016. 202 с.
6. Дегтярева Е.Т., Жулидова А.Н. Почвы Волгоградской области. Волгоград: Нижне-Волжское книжное изд-во, 1970. 319 с.
7. Засоленные почвы России / Отв. редакторы Л.Л. Шишов, Е.И. Панкова. М.: ИКЦ “Академкнига”, 2006. 853 с.
8. Зимовец Б.А. Экология и мелиорация почв сухостепной зоны. М.: Почвенный институт имени В.В. Докучаева, 1991. 249 с.
9. Классификация и диагностика почв России. Смоленск: Ойкумена, 2004. 342 с.
10. Классификация и диагностика почв СССР. М.: Колос, 1977. 223 с.
11. 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: [10.19047/0136-1694-2018-94-19-37](https://doi.org/10.19047/0136-1694-2018-94-19-37).

Бюллетень Почвенного института им. В.В. Докучаева. 2019. Вып. 97.
Dokuchaev Soil Bulletin, 2019, 97

12. *Кутькина Н.В.* Влияние длительного орошения на степные почвы Хакасии. Абакан: ООО “Фирма Март”, 2008. 152 с.

13. *Любимова И.Н.* Агрогенная эволюция почв солонцовых комплексов сухостепной зоны // Почвоведение. 2002. № 7. С. 892–903.

14. *Любимова И.Н., Дегтярева Е.Т.* Изменение карбонатного профиля почв солонцовых комплексов при агрогенном воздействии // Почвоведение. 2000. № 7. С. 855–860.

15. *Любимова И.Н., Новикова А.Ф.* Влияние различных антропогенных воздействий на изменение почв солонцовых комплексов сухостепной зоны // Почвоведение. 2016. № 5. С. 633–643. DOI: [10.7868/S0032180X16050129](https://doi.org/10.7868/S0032180X16050129).

16. *Научные основы предотвращения деградации почв (земель) сельскохозяйственных угодий России и формирования систем воспроизводства их плодородия в адаптивно-ландшафтном земледелии: Т. 1. Теоретические и методические основы предотвращения деградации почв (земель) сельскохозяйственных угодий.* Коллективная монография. М.: Почвенный институт имени В.В. Докучаева Россельхозакадемии, 2013. 756 с.

17. *Новикова А.Ф., Гэтин Ло, Конюшкова М.В.* Динамика процессов засоления – рассоления почв участка “Червленое” Светлоярской оросительной системы в ирригационный и постирригационный периоды // Бюллетень Почвенного института имени В. В. Докучаева. 2009. № 63. С.16–24.

18. *Панкова Е.И., Новикова А.Ф.* Мелиоративное состояние и вторичное засоление почв орошаемых земель Волгоградской области // Почвоведение. 2004. № 6. С. 731–744.

19. *Полевой определитель почв России.* М.: Почвенный институт имени В.В. Докучаева, 2008. 182 с.

20. *Приходько В.Е.* Орошаемые степные почвы: функционирование, экология, продуктивность. М.: “Интеллект”, 1996. 179 с.

21. *Руководство по лабораторным методам исследования ионно-солевого состава нейтральных и щелочных минеральных почв* / Под ред. Н.Б. Хитрова и А.А. Понизовского. М.: Почвенный институт имени В.В. Докучаева, 1990. 236 с.

22. *Сиземская М.Л.* Современная природно-антропогенная трансформация почв полупустыни Северного Прикаспия. М.: Товарищество научных изданий КМК, 2013. 276 с.

23. *Славный Ю.А.* Галогенез почв Нижнего Поволжья // Почвоведение, 2003. № 1. С. 3–12.

24. *Славный Ю.А., Мельникова И.Б., Орлова Е.М.* Изменение солевого состава жидкой фазы почвогрунтов в степных солонцовых комплексах

Бюллетень Почвенного института им. В.В. Докучаева. 2019. Вып. 97.
Dokuchaev Soil Bulletin, 2019, 97

Прикаспийского Заволжья при орошении // Почвоведение. 1973. № 11. С. 92–100.

25. *Славный Ю.А., Турсина Т.В., Кауричева З.Н.* К вопросу о генезисе засоленных почв в Прикаспии // Почвоведение. 1970. № 10. С. 19–25.

26. *Хитров Н.Б., Зимовец Б.А.* Обменные катионы в нейтральных и щелочных почвах // В сб. Физико-химия почв и их плодородие / Научные труды Почвенного института имени В.В. Докучаева. М. 1988. С. 82–87.

27. *Хитров Н.Б., Rogovneva Л.В., Добрицкая Е.Ю., Дунаева Е.А., Кириленко Н.Г., Попович В.Ф.* Солевое состояние рисовой системы севера Крыма после прекращения подачи воды // Таврический вестник аграрной науки. 2016. № 3(7). С. 140–154.

28. *Экологические требования к орошению почв России* / общ. ред. Б.А. Зимовца и Н.Б. Хитрова. Составители: Б.А. Зимовец, А.Г. Бондарев, И.П. Айдаров, В.Я. Григорьев, И.И. Судницын, Н.П. Чижикова, Н.Б. Хитров, А.И. Корольков, Т.И. Королькова. М.: Почвенный институт имени В.В. Докучаева, 1996. 72 с.

29. *Aragüés R., Medina E.T., Martínez-Cob A., Faci J.* Effects of deficit irrigation strategies on soil salinization and sodification in a semiarid drip-irrigated peach orchard // Agricultural Water Management. 2014. Vol. 142. P. 1–9. DOI: [10.1016/j.agwat.2014.04.004](https://doi.org/10.1016/j.agwat.2014.04.004).

30. *Chen J.-g., Chen J., Wang Q.-i., Zhang Y., Ding H., Huang Z.* Retrieval of soil dispersion using hyperspectral remote sensing // Indian Society of Remote Sensing. 2016. Vol. 44. Issue 4. P. 563–572. DOI: [10.1007/s12524-015-0530-9](https://doi.org/10.1007/s12524-015-0530-9).

31. *Ding J., Yu D.* Monitoring and evaluating spatial variability of soil salinity in dry and wet seasons in the Werigan–Kuqa Oasis, China, using remote sensing and electromagnetic induction instruments // Geoderma. 2014. Vol. 235–236. P. 316–322. DOI: [10.1016/j.geoderma.2014.07.028](https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2014.07.028).

32. *Gkiougkis I., Kallioras A., Pliakas F., Pechtelidis A., Diamantis V., Diamantis I., Ziogas A., Dafnis I.* Assessment of soil salinization at the eastern Nestos River Delta, N.E. Greece // Catena. 2015. Vol. 128. P. 238–251. DOI: [10.1016/j.catena.2014.06.024](https://doi.org/10.1016/j.catena.2014.06.024).

33. *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).

34. *He B., Cai Y., Ran W., Zhao X., Jiang H.* Spatiotemporal heterogeneity of soil salinity after the establishment of vegetation on a coastal saline field // Catena. 2015. Vol. 127. P. 129–134. DOI: [10.1016/j.catena.2014.12.028](https://doi.org/10.1016/j.catena.2014.12.028).

35. *Herrero J., Castañeda C.* Temporal changes in soil salinity at four saline wetlands in NE Spain // Catena. 2015. Vol. 133. P. 145–156. DOI: [10.1016/j.catena.2015.04.017](https://doi.org/10.1016/j.catena.2015.04.017).

Бюллетень Почвенного института им. В.В. Докучаева. 2019. Вып. 97.
Dokuchaev Soil Bulletin, 2019, 97

36. *IUSS Working Group WRB 2015*. World Reference Base for Soil Resources 2014, update 2015. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. World Soil Resources Reports No. 106. FAO, Rome. 192 p.

37. *Jiang H., Shu H.* Optical remote-sensing data based research on detecting soil salinity at different depth in an arid-area oasis, Xinjiang, China // *Earth Science Informatics*. 2019. Vol. 12. P. 1–14. DOI: [10.1007/s12145-018-0358-2](https://doi.org/10.1007/s12145-018-0358-2).

38. *Pla Sentis I.* Advances in the prognosis of soil sodicity under dryland and irrigated condition // *International Soil and Water Conservation Research*. 2014. Vol. 2. No. 4. P. 50–63.

39. *Rahman M.M., Hagare D., Maheshwari B.* Framework to assess sources controlling soil salinity resulting from irrigation using recycled water: an application of Bayesian Belief Network // *Journal of Cleaner Production*. 2015. Vol. 105. P. 406–419. DOI: [10.1016/j.jclepro.2014.04.068](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.04.068).

40. *Ren J., Li X., Zhao K.* Quantitative Analysis of Relationships Between Crack Characteristics and Properties of Soda-saline Soils in Songnen Plain, China // *Chinese Geographical Science*. 2015. Vol. 25. No. 5. P. 591–601. DOI: [10.1007/s11769-015-0779-5](https://doi.org/10.1007/s11769-015-0779-5).

41. *Russo D., Laufer A., Bardhan G., Levy G.J.* Salinity control in a clay soil beneath an orchard irrigated with treated waste water in the presence of a high water table: A numerical study // *Journal of Hydrology*. 2015. Vol. 531. P. 198–213. DOI: [10.1016/j.jhydrol.2015.04.013](https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.04.013).

42. *Scudiero E., Skaggs T.H., Corwin D.L.* Regional-scale soil salinity assessment using Landsat ETM+ canopy reflectance // *Remote Sensing of Environment*. 2015. Vol. 169. P. 335–343. DOI: [10.1016/j.rse.2015.08.026](https://doi.org/10.1016/j.rse.2015.08.026).

43. *Sethi M., Bundela D. S., Rajkumar.* Diagnosis and prognosis of salt-affected soils and poor-quality waters using remote sensing and proximal techniques / In: J.C. Dagar, P.C. Sharma, D.K. Sharma, A.K. Singh (eds.) // *Innovative Saline Agriculture*, Springer India. 2016. P. 55–82. DOI: [10.1007/978-81-322-2770-0_3](https://doi.org/10.1007/978-81-322-2770-0_3).

44. *Sidike A., Zhao S., Wen Y.* Estimating soil salinity in Pingluo County of China using QuickBird data and soil reflectance spectra // *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. 2014. Vol. 26. P. 156–175. DOI: [10.1016/j.jag.2013.06.002](https://doi.org/10.1016/j.jag.2013.06.002).

45. *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).

46. *Zhao Y., Li Y., Wang J., Pang H., Li Y.* Buried straw layer plus plastic mulching reduces soil salinity and increases sunflower yield in saline soils //

Бюллетень Почвенного института им. В.В. Докучаева. 2019. Вып. 97.
Dokuchaev Soil Bulletin, 2019, 97

Soil & Tillage Research. 2016. Vol. 155. P. 363–370. DOI:
[10.1016/j.still.2015.08.019](https://doi.org/10.1016/j.still.2015.08.019).

COMBINATION OF SALINE SOILS OF THE NORTHERN SLOPE OF THE ERGENI UPLAND AFTER IRRIGATION CESSATION

N. B. Khitrov^{*}, I. N. Gorokhova, E. I. Kravchenko

*V.V. Dokuchaev Soil Science Institute,
Russia, 119017, Moscow, Pizhevskiy per., 7, build. 2*

^{}<https://orcid.org/000-0001-5151-5109>, e-mail: khitrovn@gmail.com*

Received 04.04.2019, Revised 18.04.2019, Accepted 28.05.2019

The soil cover and soil salinity of the field were studied and the results are given in the article, the explored field is located within the Chervlenoye irrigated area belonging to Svetloyarskaya irrigation system (south of the Volgograd region). It was characterized by alternating dark and light wide strips visible on the satellite image. The field was irrigated until the mid-1990s and was subject to secondary salinization, since that time it has been used in dry-farming system. The soil combination is performed by steppe light chestnut solonchic complex that was transformed due to the surface leveling and irrigation into agrozem accumulative-carbonate segregation saline (Sodic Endoprosalic Cambisol (Loamic, Aric, Protocalcic, Ochric, Bathygypsic) and Cambic Calcisols (Loamic, Aric)) and deep saline, and agro-light-humus accumulative-carbonate stratified soil. The bright bands on the field mark soils rich in carbonates on the surface (12–13 % CaCO_3) (Calcaric Cambisol (Loamic, Aric)) among the other soils that contain less carbonates on the surface by 5–10 times. All the soils are saline, but the salt content varies in space in a wave-like manner, which disagrees with the satellite image. Two-dimensional distributions of carbonates and salts in the soil combination are discussed. The residual signs of secondary salinization are revealed in the form of calcium and magnesium chlorides two decades after the cessation of irrigation and drawdown of the groundwater curve deeper than 7 m.

Keywords: carbonates, saline soils, water extraction, ion-selective electrodes, ions activity.

REFERENCES

1. Baranovskaya V.A., Azovtsev V.I., Vliyanie orosheniya na migratsiyu karbonatov v pochvakh Povolzh'ya (Influence of irrigation on carbonate migration in the Volga soils), *Pochvovedenie*, 1981, No. 10, pp. 17–27.

Бюллетень Почвенного института им. В.В. Докучаева. 2019. Вып. 97.
Dokuchaev Soil Bulletin, 2019, 97

2. Gorokhova I.N., Pankova E.I., Metod dstantsionnogo kontrolya za sostoyaniem oroshaemykh zemel' yuga Rossii (The method of remote control over the state of irrigated land in the South of Russia), *Aridnye ekosistemy*, 1997, Vol. 3, No. 5, pp. 26–34.
3. Gorokhova I.N., Khitrov N.B., Pankova E.I., Prokopyeva K.O., Zasolennost' pochv Svetloyarskogo oroshaemogo massiva v Volgogradskoi oblasti v 2010-kh godakh (Soil salinity of the Svetloyar irrigated massif in the Volgograd region in 2010s years), *Dokuchaev Soil Bulletin*, 2018, Vol. 93, pp. 75–93, DOI: [10.19047/0136-1694-2018-93-75-93](https://doi.org/10.19047/0136-1694-2018-93-75-93).
4. Gorokhova I.N., Khitrov N.B., Prokop'eva K.O., Kharlanov V.A., Soil cover of the Svetloyarsk Irrigation System after 50 years of reclamation practices, *Eurasian Soil Science*, 2018, Vol. 51, No. 8, pp. 1–11. DOI: [10.1134/S1064229318060078](https://doi.org/10.1134/S1064229318060078).
5. Gosudarstvennyi (natsional'nyi) доклад o sostoyanii i ispol'zovanii zemel' v Rossiiskoi Federatsii v 2015 g. (State (national) report on the state and use of land in the Russian Federation in 2015), Ministry of Economy, Moscow, 2016, 202 p.
6. Degtyareva E.T., Zhulidova A.N., *Pochvy Volgogradskoi oblasti* (Soils of the Volgograd region), Volgograd: Nizhne-Volzhskoe knizhnoe izd-vo, 1970, 319 p.
7. Shishov L.L., Pankova E.I., *Zasolennye pochvy Rossii* (Saline soils of Russia), Moscow: IKTs “Akademkniga”, 2006, 853 p.
8. Zimovets B.A., *Ekologiya i melioratsiya pochv sukhostepnoi zony* (Ecology and soil reclamation of the dry steppe zone), Moscow: Pochvennyi institut imeni V.V. Dokuchaeva, 1991, 249 p.
9. *Klassifikatsiya i diagnostika pochv Rossii* (Classification and diagnosis of soils of Russia), Smolensk: Oikumena, 2004, 342 p.
10. *Klassifikatsiya i diagnostika pochv SSSR* (Classification and diagnosis of the soil of the USSR), M.: Kolos, 1977, 223 p.
11. Kravchenko E.I., Khitrov N.B., Gorokhova I.N., Dvumernoe raspredelenie zasoleniya oroshaemykh pochv ryadom s orositel'nykh kanalom na uchastke “Chervlenoe” Svetloyarskoi orositel'noi sistemy (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).
12. Kut'kina N.V., Vliyanie dlitel'nogo orosheniya na stepnye pochvy Khakasii (The effect of long-term irrigation on the steppe soils of Khakassia), Abakan: OOO “Firma Mart”, 2008, 152 p.
13. Lyubimova I. N., Agrogenic evolution of soils in the solonetzic complexes of the dry steppe zone, *Eurasian Soil Science*, 2002, Vol. 35, No. 7, pp. 792–802.

Бюллетень Почвенного института им. В.В. Докучаева. 2019. Вып. 97.
Dokuchaev Soil Bulletin, 2019, 97

14. Lyubimova I.N., Degtyareva E.T., Changes in the carbonate distribution in the soils of solonchic complexes at agrogenic impact, *Eurasian Soil Science*, 2000, Vol. 33, No. 7, pp. 746–751.

15. Lyubimova I.N., Novikova A.F., Changes in the properties of solonchic soil complexes in the dry steppe zone under anthropogenic impacts, *Eurasian Soil Science*, 2016, Vol. 49, No. 5, pp. 581–590, DOI: [10.1134/S1064229316050112](https://doi.org/10.1134/S1064229316050112).

16. Nauchnye osnovy predotvrashcheniya degradatsii pochv (zemel') sel'skokhozyaistvennykh ugodii Rossii i formirovaniya sistem vosпроизводства ikh plodorodiya v adaptivno-landshaftnom zemledelii: T. 1, (Scientific basis for the prevention of soil degradation (land) of agricultural land in Russia and the formation of systems of reproduction of their fertility in adaptive landscape agriculture: Vol. 1.), In: *Teoreticheskie i metodicheskie osnovy predotvrashcheniya degradatsii pochv (zemel') sel'skokhozyaistvennykh ugodii* (Theoretical and methodological basis for preventing soil degradation (land) of agricultural land), Moscow: Pochvennyi institut imeni V.V. Dokuchaeva Rossel'khozakademii, 2013, 756 p.

17. Novikova A.F., Gepin Lo, Konyushkova M.V., Dinamika protsessov zasoleniya – rassoleniya pochv uchastka “Chervlenoe” Svetloyarskoi orositel'noi sistemy v irrigatsionnyi i postirrigatsionnyi periody (The dynamics of salinization processes - soil desalinization of the Chervlenoe site of the Svetloyarsk irrigation system during the irrigation and post-irrigation periods), *Dokuchaev Soil Bulletin*, 2009, Vol. 63, pp.16–24.

18. Pankova E.I., Novikova A.F., Ameliorative status and secondary salinization of irrigated soils in Volgograd oblast, *Eurasian Soil Science*, 2004, Vol. 37, No. 6, pp. 634–645.

19. *Polevoi opredelitel' pochv Rossii* (Field determinant of the soil of Russia), Moscow: Pochvennyi institut imeni V.V. Dokuchaeva, 2008, 182 p.

20. Prikhod'ko V.E., *Oroshaemye stepnye pochvy: funktsionirovanie, ekologiya, produktivnost'* (Irrigated steppe soils: functioning, ecology, productivity), Moscow: “Intellekt”, 1996, 179 p.

21. Khitrov N.B., Ponizovskii A.A., *Rukovodstvo po laboratornym metodam issledovaniya ionno-solevogo sostava neutral'nykh i shchelochnykh mineral'nykh pochv* (Guide to laboratory methods for studying the ion-salt composition of neutral and alkaline mineral soils), Moscow: Pochvennyi institut imeni V.V. Dokuchaeva, 1990, 236 p.

22. Sizemskaya M.L., *Sovremennaya prirodno-antropogennaya transformatsiya pochv polupustyni Severnogo Prikaspiya* (Modern natural-anthropogenic transformation of the soils of the semi-desert of the Northern Caspian), Moscow: Tovarishestvo nauchnykh izdaniy KMK, 2013, 276 p.

Бюллетень Почвенного института им. В.В. Докучаева. 2019. Вып. 97.
Dokuchaev Soil Bulletin, 2019, 97

23. Slavyi Yu. A., Halogenesis in soils of the lower Volga region, *Eurasian Soil Science*, 2003, Vol. 36, No. 1, pp. 1–10.

24. Slavyi Yu.A., Mel'nikova I.B., Orlova E.M., *Izmenenie solevogo sostava zhidkoi fazy pochvogruntov v stepnykh solontsovykh kompleksakh Prikaspiiskogo Zavolzh'ya pri oroshenii* (Changes in the salt composition of the liquid phase of soil and soil in steppe solonets complexes of the Caspian Trans-Volga region during irrigation), *Pochvovedenie*, 1973, No. 11, pp. 92–100.

25. Slavyi Yu.A., Tursina T.V., Kauricheva Z.N., *K voprosu o genezise zasolennykh pochv v Prikaspii* (To the question of the genesis of saline soils in the Caspian Sea), *Pochvovedenie*, 1970, No. 10, pp. 19–25.

26. Khitrov N.B., Zimovets B.A., *Obmennye kationy v neutral'nykh i shchelochnykh pochvakh* (Exchange cations in neutral and alkaline soils), In: *Fiziko-khimiya pochv i ikh plodorodie* (Physics and chemistry of soils and their fertility), Moscow, 1988, pp. 82–87.

27. Khitrov N.B., Rogovneva L.V., Dobritskaya E.Yu., Dunaeva E.A., Kirilenko N.G., Popovich V.F., *Solevoe sostoyanie risovoi sistemy severa Kryma posle prekrashcheniya podachi vody* (The salt state of the rice system of the north of Crimea after the cessation of water supply), *Tavricheskii vestnik agrarnoi nauki*, 2016, No. 3(7), pp. 140–154.

28. Zimovets B.A., Bondarev A.G., Aidarov I.P., Grigor'ev V.Ya., Sudnitsyn I.I., Chizhikova N.P., Khitrov N.B., Korol'kov A.I., Korol'kova T.I., *Ekologicheskie trebovaniya k orosheniyu pochv Rossii* (Ecological requirements for soil irrigation in Russia), Moscow: Pochvennyi institut imeni V.V. Dokuchaeva, 1996, 72 p.

29. Aragüés R., Medina E.T., Martínez-Cob A., Faci J., Effects of deficit irrigation strategies on soil salinization and sodification in a semiarid drip-irrigated peach orchard, *Agricultural Water Management*, 2014, Vol. 142, pp. 1–9, DOI: [10.1016/j.agwat.2014.04.004](https://doi.org/10.1016/j.agwat.2014.04.004).

30. Chen J.-g., Chen J., Wang Q.-i., Zhang Y., Ding H., Huang Z., Retrieval of soil dispersion using hyperspectral remote sensing, *Indian Society of Remote Sensing*, 2016, Vol. 44, Issue 4, pp. 563–572, DOI: [10.1007/s12524-015-0530-9](https://doi.org/10.1007/s12524-015-0530-9).

31. Ding J., Yu D., Monitoring and evaluating spatial variability of soil salinity in dry and wet seasons in the Werigan–Kuqa Oasis, China, using remote sensing and electromagnetic induction instruments, *Geoderma*, 2014, Vol. 235–236, pp. 316–322, DOI: [10.1016/j.geoderma.2014.07.028](https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2014.07.028).

32. Gkioukakis I., Kallioras A., Pliakas F., Pechtelidis A., Diamantis V., Diamantis I., Ziogas A., Dafnis I., Assessment of soil salinization at the eastern Nestos River Delta, N.E. Greece, *Catena*, 2015, Vol. 128, pp. 238–251, DOI: [10.1016/j.catena.2014.06.024](https://doi.org/10.1016/j.catena.2014.06.024).

Бюллетень Почвенного института им. В.В. Докучаева. 2019. Вып. 97.
Dokuchaev Soil Bulletin, 2019, 97

33. 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).

34. He B., Cai Y., Ran W., Zhao X., Jiang H., Spatiotemporal heterogeneity of soil salinity after the establishment of vegetation on a coastal saline field, *Catena*, 2015, Vol. 127, pp. 129–134, DOI: [10.1016/j.catena.2014.12.028](https://doi.org/10.1016/j.catena.2014.12.028).

35. Herrero J., Castañeda C., Temporal changes in soil salinity at four saline wetlands in NE Spain, *Catena*, 2015, Vol. 133, pp. 145–156, DOI: [10.1016/j.catena.2015.04.017](https://doi.org/10.1016/j.catena.2015.04.017).

36. *IUSS Working Group WRB*, 2015, World Reference Base for Soil Resources 2014, update 2015, International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps, World Soil Resources Reports No. 106, FAO, Rome, 192 p.

37. Jiang H., Shu H., Optical remote-sensing data based research on detecting soil salinity at different depth in an arid-area oasis, Xinjiang, China, *Earth Science Informatics*, 2019, Vol. 12, pp. 1–14, DOI: [10.1007/s12145-018-0358-2](https://doi.org/10.1007/s12145-018-0358-2).

38. Pla Sentis I., Advances in the prognosis of soil sodicity under dryland and irrigated condition, *International Soil and Water Conservation Research*, 2014, Vol. 2, No. 4, pp. 50–63.

39. Rahman M.M., Hagare D., Maheshwari B., Framework to assess sources controlling soil salinity resulting from irrigation using recycled water: an application of Bayesian Belief Network, *Journal of Cleaner Production*, 2015, Vol. 105, pp. 406–419, DOI: [10.1016/j.jclepro.2014.04.068](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.04.068).

40. Ren J., Li X., Zhao K., Quantitative analysis of relationships between crack characteristics and properties of soda-saline soils in Songnen Plain, China, *Chinese Geographical Science*, 2015, Vol. 25, No. 5, pp. 591–601, DOI: [10.1007/s11769-015-0779-5](https://doi.org/10.1007/s11769-015-0779-5).

41. Russo D., Laufer A., Bardhan G., Levy G.J., Salinity control in a clay soil beneath an orchard irrigated with treated waste water in the presence of a high water table: A numerical study, *Journal of Hydrology*, 2015, Vol. 531, pp. 198–213, DOI: [10.1016/j.jhydrol.2015.04.013](https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.04.013).

42. Scudiero E., Skaggs T.H., Corwin D.L., Regional-scale soil salinity assessment using Landsat ETM+ canopy reflectance, *Remote Sensing of Environment*, 2015, Vol. 169, pp. 335–343, DOI: [10.1016/j.rse.2015.08.026](https://doi.org/10.1016/j.rse.2015.08.026).

43. Sethi M., Bundela D. S., Rajkumar., Diagnosis and prognosis of salt-affected soils and poor-quality waters using remote sensing and proximal techniques, In: *Innovative Saline Agriculture*, Springer India, 2016, pp. 55–82, DOI: [10.1007/978-81-322-2770-0_3](https://doi.org/10.1007/978-81-322-2770-0_3).

Бюллетень Почвенного института им. В.В. Докучаева. 2019. Вып. 97.
Dokuchaev Soil Bulletin, 2019, 97

44. Sidike A., Zhao S., Wen Y., Estimating soil salinity in Pingluo County of China using QuickBird data and soil reflectance spectra, *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2014, Vol. 26, pp. 156–175, DOI: [10.1016/j.jag.2013.06.002](https://doi.org/10.1016/j.jag.2013.06.002).

45. 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).

46. Zhao Y., Li Y., Wang J., Pang H., Li Y., Buried straw layer plus plastic mulching reduces soil salinity and increases sunflower yield in saline soils, *Soil & Tillage Research*, 2016, Vol. 155, pp. 363–370, DOI: [10.1016/j.still.2015.08.019](https://doi.org/10.1016/j.still.2015.08.019).

Ссылки для цитирования:

Хитров Н.Б., Горохова И.Н., Кравченко Е.И. Комбинация засоленных почв северного склона возвышенности Ергени после прекращения орошения // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2019. Вып. 97. С. 52-90. DOI: 10.19047/0136-1694-2019-97-52-90

For citation:

Khitrov N.B., Gorokhova I.N., Kravchenko E.I. Combination of saline soils of the Northern slope of the Ergeni upland after irrigation cessation, Dokuchaev Soil Bulletin, 2019, V. 97, pp. 52-90, DOI: 10.19047/0136-1694-2019-97-52-90

СПОСОБ ПОДГОТОВКИ ОБРАЗЦОВ ПОЧВ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОНТАКТНОГО УГЛА СМАЧИВАНИЯ МЕТОДОМ СИДЯЧЕЙ КАПЛИ

**© 2019 г. Н. В. Матвеева^{1,2*}, Е. Ю. Милановский^{1,2},
О. Б. Рогова¹**

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

^{*}*e-mail: Nataliy_Matveeva@list.ru*

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

*Поступила в редакцию 06.03.2019, после доработки 01.04.2019,
принята к публикации 28.05.2019*

Предложена методика подготовки образцов почв для измерения контактного угла смачивания (КУ) поверхности твердой фазы почв с использованием мембранных фильтров. На образцах каолинита, стандартном образце чернозема (СП-1) и образцах агрокаштановой почвы проведено сравнение результатов определения КУ при использовании двух видов подготовки исследуемых образцов к анализу. Первый способ заключался в нанесении образца на двухстороннюю клейкую ленту; второй способ подразумевал осаждение суспензий исследуемых образцов определенных концентраций на мембранные фильтры. Описаны преимущества и недостатки каждого способа подготовки проб. Выявлено существенное различие получаемых величин КУ в зависимости от подготовки пробы к измерению. Разработанная методика пробоподготовки образцов с использованием мембранных фильтров позволила более чем в два раза уменьшить погрешность измерения определения КУ. Снижение варьирования величины КУ единичного образца позволит сравнивать близкие по свойствам почвенные образцы, в том числе почвы одного типа, но различных систем землепользования.

Ключевые слова: смачиваемость, гидрофильность, гидрофобность, контактный угол смачивания, пробоподготовка.

DOI: 10.19047/0136-1694-2019-97-91-112

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время исследователи уделяют большое внимание работам, направленным на выявление функционально значимых маркеров, групп соединений, фракций и пулов, с помощью

которых можно прогнозировать устойчивость почвенного органического вещества и почв в целом к антропогенному влиянию и климатическим изменениям. Это приводит к поиску методов и технологий, позволяющих определять интегральные показатели изменения свойств органоминеральной системы почв при минимальном изменении ее химического состава и микроагрегатной структуры. Изменение вещественного состава почв, особенно свойств органического вещества, находит отражение в изменении физических свойств, а именно свойств поверхности твердой фазы – гидрофильности и гидрофобности частиц, что обуславливает смачиваемость и влияет на агрономическую ценность почвенной структуры в целом ([Милановский и др., 2005](#)). Таким образом, свойства поверхности твердой фазы почв связаны с процессами инфильтрации, испарения, устойчивости к водной эрозии, в целом с гидрологическим балансом почв. Водоотталкивающие свойства почвы зависят главным образом от органических компонентов различного происхождения и структуры ([Doerr et al., 2000](#)). Смачиваемость возрастает с увеличением плотности и количества полярных функциональных групп на поверхности твердой фазы почв, наличие же на поверхности твердой фазы неполярных функциональных групп способствует формированию несмачивающейся поверхности ([Ellerbrock et al., 2005](#)). Также на способность почвы смачиваться водой могут влиять корневые выделения ([Moradi et al., 2012](#)), продукты разложения растительного опада, продукты жизнедеятельности бактерий и грибов в почве ([Doerr et al., 2000](#)). Все перечисленные выше показатели находятся в прямой взаимосвязи со способом обработки и использования почв.

Для определения степени смачивания почвы используется несколько методов. Эти методы, как правило, выбираются на основе их пригодности для полевых или лабораторных работ, а также времени и ресурсов ([Papierowska et al., 2018](#)). В полевых условиях способность почвы смачиваться часто оценивают по времени инфильтрации (water drop penetration time, WDPT) ([Bahrani et al., 1973](#); [Doerr, 1998](#)), в лаборатории определяют измерением контактного угла смачивания (КУ) одним из двух способов – методом подъема капиллярной каймы (capillary rise, CRM) ([Adamson, 1990](#);

[Liu et al., 2016](#)) или же методом сидячей капли (sessile drop method, SDM) ([Ryley and Khoshaim, 1977](#)).

Измерение контактного угла смачивания (КУ) является пространственным методом измерения гидрофобности почв ([Burghardt, 1985](#); [Шеин, 2014](#); [Kholodov et al., 2015](#)), однако универсальных методик применения его, подходящих для всех видов почвенных образцов, нет ([Bachmann, 2001](#)). Так, в работе ([Shang et al., 2008](#)) было проведено сравнение разных методов измерения КУ, разброс величины КУ составлял от 10 до 40°. Авторы отметили наибольшую воспроизводимость измерений для тонкодисперстных минералов – каолинита и иллита, при этом на точность, в случае метода сидячей капли, влияла толщина слоя исследуемого образца. Таким образом, способ подготовки проб к измерению играет решающую роль для получения воспроизводимых результатов. При подготовке проб необходимо учитывать следующие требования: толщина слоя образца должна быть минимальной для того, чтобы исключить впитывание и расплывание капли. При этом частицы образца должны образовывать максимально плотную поверхность. В 2000 г. Bachmann ([Bachmann et al., 2000a](#)), предложил наносить порошкообразный образец на двустороннюю клейкую ленту, закрепленную на предметном стекле. В работе ([Lamparter et al., 2010](#)), было предложено помещать клейкую ленту на гибкую ткань, а не на твердую поверхность, для более полного охвата образцом поверхности клейкой ленты. Однако этот способ также не гарантирует равномерности и необходимой плотности распределения частиц по поверхности ленты. При этом на результаты могут влиять свойства самой клейкой ленты, применяющейся в качестве подложки, из-за недостаточно плотной упаковки частиц на ее поверхности ([Goebel et al., 2004](#)).

Цель данной работы – улучшение существующей методики подготовки проб почв к определению контактного угла смачивания для получения более достоверных результатов измерения. Для получения однородной поверхности образца и исключения влияния клейкой ленты на результаты измерения мы предлагаем осаждать водную суспензию на мембранный фильтр. Снижение варьирования величины КУ единичного образца позволит сравнивать

близкие по свойствам почвенные образцы, в том числе почвы одного типа, но различных систем землепользования.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Эксперименты проводились на глинистом минерале каолинит Просяновского месторождения, стандартном образце чернозема ([Свидетельство СП-1 № 901-90](#)), а также на образцах агрокаштановой почвы, которые были отобраны в 2013 г. на полях ФГБНУ ВНИИОЗ, Волгоградской области, из верхнего слоя 0–25 см. Воздушно-сухие образцы почв растирались пестиком с резиновым наконечником, просеивались через сито 1 мм.

Определение КУ проводили методом статической сидячей капли ([Ryley, Khoshaim, 1977](#)), на цифровом гониометре (Система Анализа Формы Капли, DSA100, Kruss, Германия), оснащенном видеокамерой и программным обеспечением. Метод позволяет получать показания КУ напрямую, путем построения касательной в точке раздела трех фаз – вода, почва, воздух, – в отличие от метода подъема капиллярной каймы, в котором КУ рассчитывают по кривым изменения веса почвы при насыщении ее водой.

Метод сидячей капли заключается в помещении на ровную поверхность образца капли воды и измерении угла раздела фаз вода – поверхность. Эксперимент осуществляется по следующей схеме: из вертикально расположенной иглы выдавливается капля дистиллированной воды объемом 1.5 мкл, игла опускается вниз таким образом, что капля садится на образец, затем игла поднимается. Весь процесс регистрируется видеосъемкой. Программное обеспечение позволяет анализировать форму капли на поверхности образца и вычислять значения КУ. Так как почва обладает высокой впитывающей способностью ([Shang et al., 2008](#)), то КУ определяют по первому четкому кадру в момент посадки капли на образец и удаления иглы (рис. 1).

Для выбора оптимальных условий измерения КУ нами были протестированы две различные методики подготовки образцов к измерению.

В качестве основы для нанесения образца были использованы: двухсторонняя клейкая лента на полипропиленовой основе с акриловой клеевой системой, толщина ленты составляла 1000

мкм; мембранные фильтры Владипор типа МФАС-ОС-2 – микропористый пленочный материал, изготовленный на основе смеси ацетатов целлюлозы с размером пор 0.45 мкм и общей пористостью 80–85 %. Диаметр фильтра составлял 47мм.

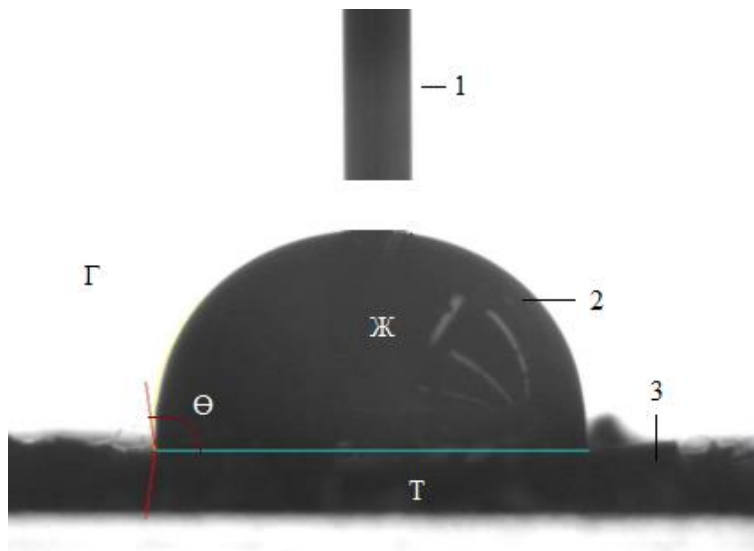


Рис. 1. Определение контактного угла смачивания. 1 – подающая жидкость игла; 2 – капля жидкости; 3 – исследуемый образец; Θ – контактный угол смачивания.

Fig. 1. Determination of contact angle. 1 – needle for drop delivery; 2 – a drop of liquid; 3 – the test sample; Θ – contact (wetting) angle.

Нанесение образцов на двухстороннюю клейкую ленту осуществлялось по методике, описанной в литературе ([Bachmann et al. 2000b](#); [Beatty, Smith, 2010](#)). На предметное стекло размером (2.5 × 7 см) приклеивали 7 одинаковых квадратов двухсторонней клейкой ленты. Разделение участков скотча необходимо для предотвращения излишнего растекания жидкости при проведении эксперимента, данный способ позволил фиксировать число повторностей измерения КУ для каждого образца. Растертый образец равномерно распределяли на предметном стекле, покрытом двухсторонним скотчем, и уплотняли другим предметным стеклом в течение одной минуты с усилием около 100 г. Аккуратно стра-

хивали не приклеившиеся частички и вновь прижимали образец предметным стеклом.

Для получения пленки образца, на мембранном фильтре использовали установку вакуумной фильтрации с пористым стеклянным основанием для мембранного фильтра. Установка состояла из воронки емкостью 250 мл и колбы Бунзена объемом 1 л. Площадь фильтрации через данную установку составляла 12.5 см². Фильтрационная установка использовалась совместно с водоструйным вакуумным насосом, подключенным к системе водоснабжения. Мембранные фильтры перед экспериментом выдерживали сутки в дистиллированной воде, чтобы их поверхность была смочена равномерно, что обеспечит одинаковую фильтрацию по всей поверхности фильтра. После проверки горизонтальности фильтрационной поверхности при отключенном разряжении аккуратно помещали на нее мембранный фильтр, избегая образования пузырей воздуха под фильтром, прижимали фильтр воронкой и фиксировали специальным зажимом. Включали водоструйный насос и сначала пропускали через фильтр несколько аликвот дистиллированной воды. Воду и суспензии образцов наносили дозатором по 5 мл. После фильтрации воды отключали разряжение так, чтобы на фильтре оставался небольшой слой жидкости, аккуратно по каплям наносили суспензию образца, после чего включали насос. Влажные фильтры с образцом размещали на предметном стекле, на которое предварительно была наклеена двухсторонняя клейкая лента; сушили при 40° в сушильной шкафу.

Методика измерения КУ на клейкой ленте описана в работе ([Bachmann et al., 2000b](#)) и предполагала измерение КУ исследуемых образцов при их нанесении на двухстороннюю клейкую ленту. Перед измерением исследуемые образцы выдерживали сутки в сушильном шкафу при температуре 40°, затем растирали в агатовой ступке и просеивали через сито 100 мкм. Как известно, температура сушки влияет на водоотталкивающие свойства почв, поэтому больше повышать ее не следует ([Dekker et al., 1998](#)). Эксперимент был проведен на воздушно-сухих образцах.

Методика измерения КУ на мембранных фильтрах. В работе ([Wu, 2001](#)) была описана методика подготовки образцов путем

высаживания водных суспензий на предметные стекла. Способ предлагался для снижения влияния на величину КУ свойств поверхности, на которую наносится образец, а также позволял уменьшить количество образца, по сравнению с методом, описанным выше. Однако таким образом сложно обеспечить необходимую толщину слоя анализируемого образца и избежать появления неоднородности при высыхании.

Наша модификация методики заключается в равномерном нанесении суспензии почв не на предметное стекло, а на мембранные фильтры. Для этого навеска высушенного, растертого и просеянного через сито $d = 0.25$ мм образца помещали в пробирку и заливали 25 мл дистиллированной воды. Суспензии исследуемых образцов с 8 различными концентрациями от 0 до 5 мг/мл, подвергались воздействию ультразвука Branson Digital Sonifier при мощности 40 % в течение 5 мин. Затем всю суспензию переносили обратно в пробирку с одновременной фильтрацией через сито с отверстиями $d = 0.1$ мм для обеспечения большей гомогенности. Остаточное незначительное количество крупнопесчаного минерального материала собиралось отдельно и при анализе не использовалось.

Статистическая обработка результатов проводилась в программе STATISTICA10 (StatSoft, RU). Нормальность распределения величин КУ для каждого образца проверяли по критерию нормальности Колмогорова – Смирнова ([Lilliefors, 1967](#)). Значимость попарных отличий проверяли по t-критерию. Проверка наличия взаимосвязи величины КУ и концентрации осаждаемой суспензии на мембранный фильтр осуществлялась с помощью критерия ДА Крускала–Уоллиса (K–W) ([Kruskal, Wallis, 1952](#)).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Проверка методики пробоподготовки с использованием клейкой ленты проведена на минерале каолинит и 16 образцах агрокаштановой почвы различных систем землепользования. Измерения КУ каолинита проведены в трех опытных повторностях, каждая из которых предполагала семь аналитических повторностей. Среднее значение КУ каолината было 27° , варьирование величины КУ для одной опытной повторности составило от 1.5° до

Бюллетень Почвенного института им. В.В. Докучаева. 2019. Вып. 97.
Dokuchaev Soil Bulletin, 2019, 97

8°, что составляет 28 % от среднего значения (рис. 2).

Варьирование величины КУ с использованием измерений на клейкой ленте соответствует варьированию, полученному другими авторами, при исследовании КУ минералов и почвенных образцов, подготовленных к анализу таким же способом ([Bachmann et al., 2013](#); [Sofinskaya et al., 2016](#); [Bachmann et al., 2009](#)).

В таблице 1 приведены пределы колебаний значения КУ, измеренного для единичного образца, по данным ряда исследователей, иллюстрирующие реально получаемые результаты. Полученные нами пределы колебаний показателя согласуются с представленными в таблице.

Таблица 1. Варьирование КУ единичного образца почв
Table 1. Variation of the contact angle of a single soil sample

Пределы колебаний, градусы	Источник
4–20	Beatty and Smith, 2010
2–13	Sofinskaya et al., 2016
2–15	Bachmann et al., 2000b
8–23	Bachmann et al., 2013
2–17	Bachmann et al., 2009

Примечание: КУ измерен методом сидячей капли на клейкой ленте.

Полученные нами средние значения КУ каолинита соответствуют литературным данным ([Shang et al., 2008](#); [Leelamanie et al., 2010](#)), однако погрешность измерения для минерала оказалась несколько выше, чем для почвенных образцов по данным ([Beatty, Smith, 2010](#)) и почти вдвое превышала полученную ([Bachmann et al., 2000b](#)) для тонкой фракции почв.

Учитывая однородность вещественного состава чистого минерала и размера его частиц, такие большие различия можно объяснить лишь сложностью равномерного и воспроизводимого нанесения образца на клейкую ленту.

Неоднородность образцов реальной почвы заведомо выше, чем чистого минерала. При анализе величины КУ аналогично подготовленных образцов агрокаштановой почвы оказалось, что средние значения для единичного образца были от 17.1° до 27.6°, при этом варьирование этого показателя для одного образца со-

ставляло от 2.8° до 16.5° (рис. 3).

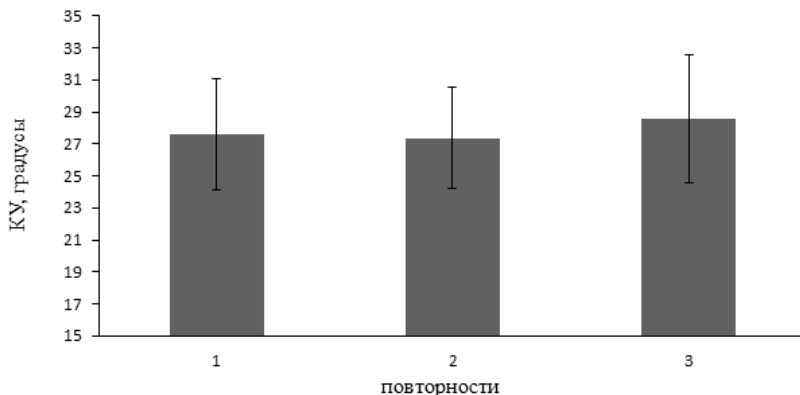


Рис. 2. Контактный угол смачивания минерала каолинит. Стандартное отклонение рассчитано из 7 аналитических повторностей. Измерен на клейкой ленте.

Fig. 2. Contact angle of kaolinite mineral. Standard deviation is calculated for 7 analytical replications. Measured on sticky tape.

Такое варьирование приводит к тому, что доверительные интервалы на графике перекрываются на величину 1/3 и более. Как известно ([Гржибовский, 2008](#)), при столь сильном перекрывании доверительных интервалов констатируется отсутствие значимого различия относительных величин, т. е. столь значительное варьирование значений КУ, измеренных для одного образца, затрудняет сравнение между собой величин, получаемых для разных образцов.

Поэтому мы предлагаем иной способ подготовки образцов, с осаждением их суспензий на мембранные фильтры.

При определении КУ методом сидячей капли необходимо обеспечить однородную ровную плотную поверхность испытуемого образца и достаточную толщину его слоя на подложке, чтобы материал подложки не влиял на получаемые результаты. Эти условия выполняются при осаждении на фильтр количества вещества, не меньше определенного, в зависимости от площади поверхности фильтра.

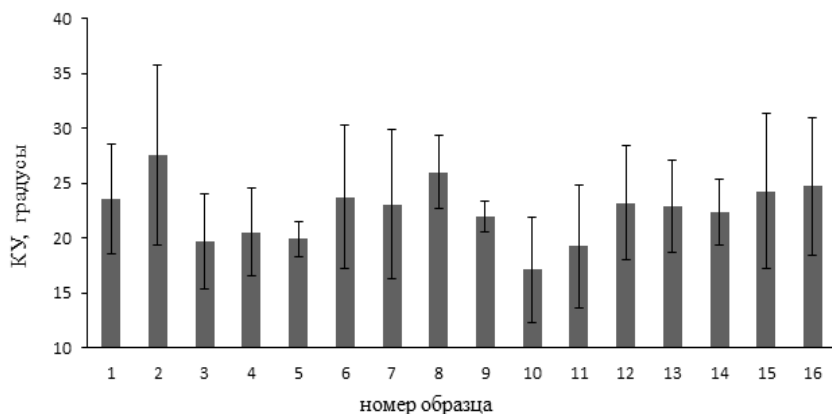


Рис. 3. Контактный угол смачивания агрокаштановой почвы. Стандартное отклонение рассчитано из 7 аналитических повторностей. Измерен на клейкой ленте.

Fig. 3. Contact angle of agro-chestnut soil. Standard deviation is calculated for 7 analytical replications. Measured on sticky tape.

Определение оптимальной концентрации суспензии осаждаемой на мембранный фильтр было проведено с использованием минерала каолинит, стандартного образца чернозема (СП-1) и образца агрокаштановой почвы. Объем аликвоты суспензии осаждаемой на мембранный фильтр был равен 5 мл, таким образом, на фильтре мы получали концентрации – 0, 2, 4, 8, 10, 15, 20 и 25 мг/фильтр соответственно. Площадь фильтрационной части составляла 12.5 мг/см². Таким образом, при пересчете концентрации осаждаемой суспензии на 1 см² получили диапазон от 0 до 2 мг/см².

Для каждой концентрации было подготовлено по три фильтра (для нулевой концентрации – четыре фильтра), при этом на каждом фильтре было по шесть аналитических повторностей измерений КУ. Анализируя каолинит и почвенные образцы, нам удалось определить оптимальную концентрацию вещества, необходимую для исследования. Результаты представлены на рисунке 3. Отчетливо видно, что в случае каолинита вклад свойств поверхности самого фильтра в величину КУ исчезает при меньших концентрациях, по сравнению с образцом почвы. Ввиду однородности и малого размера частиц минерала, даже при низких

концентрациях осаждаемой суспензии на фильтр, мы получили значения, соответствующие литературным данным – 27.8° ([Shang et al., 2008](#); [Leelamanie et al., 2010](#)).

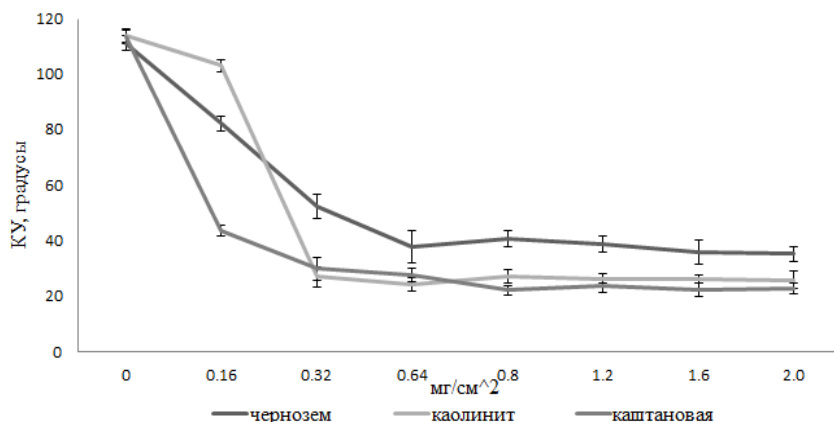


Рис. 4. Контактный угол смачивания для разных концентраций каолинита, чернозема и агрокаштановой почвы. Показаны средние значения со стандартным отклонением. Измерен на мембранных фильтрах.

Fig. 4. Contact angle for different concentrations of kaolinite, chernozem and agro-chestnut soil. The mean values with standard deviations are shown. Measured on membrane filters.

Также из рисунка 4 отчетливо видно и уменьшение стандартного отклонения получаемых значений КУ, по сравнению с первой методикой. Предложенная нами методика пробоподготовки материала позволила уменьшить разброс величины КУ для одного образца до 2°–5° для каолинита и до 2°–8° для почвенных образцов. Сравнение данных, полученных для стандартного образца чернозема, с имеющимися литературными ([Холодов В.А. и др., 2015](#)) обнаружило их сопоставимость. Так, Холодовым с соавторами были определены средние значения КУ для агрегатов черноземов косимой степи 64°–70°, пашни – 14°–26° в зависимости от водоустойчивости. Полученные нами итоговые значения КУ для СП-1, изготовленного из материала Курского чернозема, составляют 33°–38°, что может быть связано с частичным преобразованием органического вещества при хранении.

Оценка зависимости между величинами КУ от концентрации осаждаемых суспензий была определена с помощью критерия ДА Крускала – Уоллиса ([Kruskal, Wallis, 1952](#)). Группирующей переменной выступала концентрация суспензии, зависимой переменной – величина КУ. В таблице 2 приведены уровни значимости p для разных образцов и диапазонов изменения концентрации суспензии.

Таблица 2. Оценка значимости влияния концентрации суспензии на величину КУ по критерию Крускала – Уоллиса

Table 2. Evaluation of the significance of suspension concentration effect on the value of contact angle using the Kruskal – Wallis criterion

Диапазон концентраций, мг/см ²	Уровень значимости, p		
	каолинит	чернозем	каштановая
0–2	0.0147	0.0027	0.0033
0.16–2	0.0372	0.0090	0.0119
0.32–2	0.0907	0.0223	0.0324
0.64–2	0.1507	0.0345	0.1241
0.8–2	0.1207	0.0729	0.8629
0.12–2	0.1184	0.0665	0.8371
0.16–2	0.8273	0.8273	0.8273

Примечание: цветом выделены значения $p > 0.05$.

Результаты показывают, что на всем диапазоне кривых (рис. 3) существует значимая зависимость между концентрацией суспензий и величиной КУ, о чем свидетельствует уровень значимости $p < 0.05$. Зависимость величины КУ от концентрации суспензии исчезает, начиная с концентрации 0.32 мг/см² для каолинита, 0.8 мг/см² для чернозема и 0.64 мг/см² для образца каштановой почвы. Полагаем, что минимальная концентрация суспензии, достаточная для получения однородного слоя на поверхности мембранного фильтра, зависит от размера частиц и от особенностей строения образца. Так, наиболее тонкодисперсным из исследуемых образцов является каолинит, поэтому для получения его однородного тонкого слоя требуется

концентрация суспензии меньше. Строение почвенных образцов более сложное, включающее как минеральную часть, так и органические компоненты. Самая большая концентрация суспензии потребовалась для чернозема – от 0.8 мг/см^2 , что может быть связано с большим содержанием органического вещества.

Оценка значимости влияния концентрации суспензии на величину КУ по критерию Крускала – Уоллиса позволила определить, при какой минимальной концентрации суспензии исследуемого образца исчезает зависимость между КУ и концентрацией. Но данный анализ не позволяет оценить воспроизводимость между опытными повторностями, а также говорить об однородности осажденного на мембранный фильтр тонкого слоя образца.

Поэтому нами было проведена оценка значимости отличий между измерениями для разных концентраций, а также для одной концентрации между опытными повторностями. Поскольку проверка по критерию Колмогорова-Смирнова ([Lilliefors, 1967](#)) подтвердила нормальное распределение признака, попарное сравнение величин КУ было проведено с помощью расчета критерия Стьюдента: для образцов каолинита значимые отличия между повторностями для одной и для разных концентраций исчезают при концентрации 0.8 мг/см^2 и выше.

При меньших концентрациях осаждаемой на мембранный фильтр суспензии есть значимые отличия для разных концентраций, при этом в повторностях для одной концентрации значимых отличий нет. Для образцов почв значимые отличия исчезают при концентрации суспензии $0.8\text{--}1.6 \text{ мг/см}^2$. При меньшей концентрации – 0.32 мг/см^2 – средние значения контактного угла смачивания для чернозема не только значимо отличаются от таковых, соответствующих другим концентрациям, но и между повторностями для этой концентрации. Это связано с тем, что образец почвы при столь низкой концентрации сложнее нанести на мембранный фильтр так, чтобы полученный слой оказался равномерным, по сравнению с более мелкодисперстным минералом каолинитом.

Таким образом, по результатам нашего эксперимента, минимальная концентрация суспензии исследуемого образца,

достаточная для воспроизводимых результатов и подтверждаемая критерием Крускала – Уоллиса составляет 0.8 мг/см^2 . Т-критерий позволил определить диапазон оптимальных концентраций для определения КУ исследуемых образцов – от 0.8 до 1.6 мг/см^2 .

Сравнивая величины КУ каолинита и агрокаштановой почвы при разных способах подготовки образцов (табл. 3), следует отметить, что средние значения величины КУ, полученные на мембранных фильтрах в выбранном диапазоне концентрации суспензии, попадают в диапазон значений КУ, измеренных на двухсторонней клейкой ленте, при этом разброс величин оказался существенно меньше.

Таблица 3. Сравнение величин КУ каолинита и агрокаштановой почвы, измеренных по двум методикам

Table 3. Comparison of the contact angle values of kaolinite and agrochestnut soil, measured by two different methods

КУ каолинита					
На клейкой ленте			На мембранных фильтрах		
Повторности	Среднее	Станд. откл.	Концентрация суспензии, мг/см^2	Среднее	Станд. откл.
1	27.6	3.5	0.8	27.5	2.4
2	27.4	3.2	1.2	27.5	1.5
3	28.6	4.0	1.6	26.6	1.8
КУ агрокаштановой почвы					
1	23.8	6.6	0.8	21.1	1.5
2	24.7	6.2	1.2	22.0	1.4
3	22.9	4.2	1.6	22.4	1.8

Проверка данных выборок по t-критерию значимых отличий не выявила. Из этого следует вывод, что предложенная нами методика пробоподготовки образцов с использованием мембранных фильтров позволяет получать достоверные результаты измерений КУ с меньшим варьированием, что позволит в дальнейшем сравнивать между собой близкие по свойствам или происхождению

образцы почв и их компонентов.

Сравнивая две используемые методики, следует отметить: измерение КУ образцов, нанесенных на двухстороннюю клейкую ленту, имеет более простую пробоподготовку, но при этом дает большее варьирование величины контактного угла, что связано с неоднородностью почвенных частиц и сложностью их равномерного нанесения на клейкую ленту. Такая методика требует большего количества исследуемого материала, что не всегда осуществимо при изучении трудно выделяемых почвенных фракций. Измерение КУ на мембранных фильтрах позволяет в два раза уменьшить варьирование результатов анализа и минимизировать навеску исследуемого образца. Недостатки такого способа подготовки проб связаны со сложностью равномерного нанесения образца на мембранный фильтр: определением оптимальной концентрации суспензии, необходимой для осаждения на мембранный фильтр; соблюдением одинаковой скорости фильтрации во всех частях фильтра.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При анализе и сравнении результатов измерения КУ следует учитывать не только метод измерения ([Bachmann et al., 2003](#); [Papierowska et al., 2018](#)), но и подготовку образцов перед измерением. Предложенная нами методика пробоподготовки с использованием мембранных фильтров позволила в два раза уменьшить варьирование величины КУ для единичного образца. Оптимальной концентрацией почвенной суспензии при исследовании черноземов и каштановой почвы предлагаем считать концентрацию от 0.8 до 1.6 мг/см². Следует учесть, что перед измерением КУ других типов почв предложенным нами методом необходимо удостовериться в правильности выбранной концентрации осаждаемой на мембранный фильтр почвенной суспензии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гржибовский А.М. Анализ количественных данных для двух независимых групп // Экология человека. 2008. № 2. С. 54–60.
2. Милановский Е.Ю., Шеин Е.В., Русанов А.М., Засыпкина Д.И., Николаева Е.И., Анилова Л.В. Почвенная структура и органическое вещество типичных черноземов Предуралья под лесом и многолетней пашней //

Бюллетень Почвенного института им. В.В. Докучаева. 2019. Вып. 97.
Dokuchaev Soil Bulletin, 2019, 97

Вестник Оренбургского государственного университета. 2005. № 2. С. 113–117.

3. Свидетельство на стандартный образец (СО) СП-1 (курский чернозем) № 901-90 (ООКО152) по государственному реестру мер и измерительных приборов СССР (раздел стандартные образцы). 1990.

4. *Шеин Е.В., Милановский Е.Ю., Хайдапова Д.Д., Дембовецкий А.В., Тюгай З.Н.* Новые приборы для изучения физических свойств почв: 3D-томография, реологические параметры, контактный угол // Вестник АГАУ. 2014. № 5 (115). С. 44–48.

5. *Холодов В.А., Ярославцева Н.В., Яшин М.А., Фрид А.С., Лазарев В.И., Тюгай З.Н., Милановский Е.Ю.* Контактные углы смачивания и водостойчивость почвенной структуры // Почвоведение. 2015. № 6. С. 693–693. DOI: [10.7868/S0032180X15060064](https://doi.org/10.7868/S0032180X15060064).

6. *Adamson A.* Physical chemistry of surfaces 5th edn. New York: NY John Wiley & Sons Inc, 1990. 757 p.

7. *Bachmann J.* Contact angle and surface charge of wettable and hydrophobic silt particles // J. Soil Sci. Plant Nutr. 2001. No. 1. P. 26–33.

8. *Bachmann J., Ellies A., Hartge K.H.* Development and application of a new sessile drop contact angle method to assess soil water repellency // Journal of Hydrology. 2000a. No. 231. P. 66–75.

9. *Bachmann J., Goebel M.O., Woche S.K.* Small-scale contact angle mapping on undisturbed soil surfaces // Journal of Hydrology and Hydromechanics. 2013. No. 61 (1). P. 3–8.

10. *Bachmann J., McHale G.* Superhydrophobic surfaces: a model approach to predict contact angle and surface energy of soil particles // European Journal of Soil Science. 2009. No. 60 (3). P. 420–430.

11. *Bachmann J., Horton R., Van Der Ploeg R.R., Woche S.* Modified sessile drop method for assessing initial soil-water contact angle of sandy soil // Soil Science Society of America Journal. 2000b. No. 64 (2). P. 564–567. DOI: [10.2136/sssaj2000.642564x](https://doi.org/10.2136/sssaj2000.642564x).

12. *Bachmann J., Woche S.K., Goebel M.O., Kirkham M.B., Horton R.* Extended methodology for determining wetting properties of porous media // Water Resources Research. 2003. Vol. 39. No. 12. 14 p. DOI: [10.1029/2003WR002143](https://doi.org/10.1029/2003WR002143).

13. *Bahrani B., Mansell R.S., Hammond L.C.* Using infiltrations of heptane and water into soil columns to determine soil-water contact angles // Soil Science Society of America Journal. 1973. No. 37 (4). P. 532–534. DOI: [10.2136/sssaj1973.03615995003700040020x](https://doi.org/10.2136/sssaj1973.03615995003700040020x).

14. *Beatty S.M., Smith J.E.* Fractional wettability and contact angle dynamics in burned water repellent soils // Journal of Hydrology. 2010. Vol. 391. No. 1–2. P. 99–110. DOI: [10.1016/j.jhydrol.2010.07.007](https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2010.07.007).

Бюллетень Почвенного института им. В.В. Докучаева. 2019. Вып. 97.
Dokuchaev Soil Bulletin, 2019, 97

15. *Burghardt W.* Determination of the wetting characteristics of peat soil extracts by contact-angle measurements // *Zeitschrift Fur Pflanzenernahrung Und Bodenkunde*. 1985. Vol. 148. No. 1. P. 66–72. DOI: [10.1002/jpln.19851480108](https://doi.org/10.1002/jpln.19851480108).
16. *Dekker L.W., Ritsema C.J., Oostindie K., Boersma O.H.* Effect of drying temperature on the severity of soil water repellency // *Soil Science*. 1998. No. 163 (10). P. 780–796. DOI: [10.1097/00010694-199810000-00002](https://doi.org/10.1097/00010694-199810000-00002).
17. *Doerr S.H.* On standardizing the 'water drop penetration time' and the 'molarity of an ethanol droplet' techniques to classify soil hydrophobicity: A case study using medium textured soils // *Earth Surface Processes and Landforms*. 1998. Vol. 23. No. 7. P. 663–668.
18. *Doerr S.H., Shakesby R.A., Walsh R.P.D.* Soil water repellency: its causes, characteristics and hydro-geomorphological significance // *Earth-Science Reviews*. 2000. Vol. 51. Issue 1. P. 33–65. DOI: [10.1016/S0012-8252\(00\)00011-8](https://doi.org/10.1016/S0012-8252(00)00011-8).
19. *Ellerbrock R.H., Gerke H.H., Bachmann J., Goebel M.O.* Composition of organic matter fractions for explaining wettability of three forest soils // *Soil Science Society of America Journal*. 2005. Vol. 69. Issue. 1. P. 57–66.
20. *Goebel M.O., Bachmann J., Woche S.K., Fischer W.R., Horton R.* Water potential and aggregate size effects on contact angle and surface energy // *Soil Science Society of America Journal*. 2004. Vol. 68. Issue 2. P. 383–393.
21. *Kholodov V.A., Yaroslavtseva N.V., Yashin M.A., Frid A.S., Lazarev V.I., Tyugai Z.N., Milanovskiy E.Y.* Contact angles of wetting and water stability of soil structure // *Eurasian Soil Science*. 2015. Vol. 48. Issue 6. P. 600–607. DOI: [10.1134/S106422931506006X](https://doi.org/10.1134/S106422931506006X).
22. *Kruskal W.H., Wallis W.A.* Use of ranks in one-criterion variance analysis // *Journal of the American statistical Association*. 1952. Vol. 47. Issue 260. P. 583–621.
23. *Lamparter A., Bachmann J., Woche S.K.* Determination of small-scale spatial heterogeneity of water repellency in sandy soils // *Soil Science Society of America Journal*. 2010. Vol. 74. Issue 6. P. 2010–2012.
24. *Leelamanie D.A.L., Karube J., Yoshida A.* Clay effects on the contact angle and water drop penetration time of model soils // *Soil Science and Plant Nutrition*. 2010. Vol. 56. Issue 3. P. 371–375. DOI: [10.1111/j.1747-0765.2010.00471.x](https://doi.org/10.1111/j.1747-0765.2010.00471.x).
25. *Lilliefors H.W.* On the Kolmogorov-Smirnov test for normality with mean and variance unknown // *Journal of the American statistical Association*. 1967. Vol. 62. Issue 318. P. 399–402.
26. *Liu Z., X. Yu, Wan L.* Capillary rise method for the measurement of the contact angle of soils // *Acta Geotechnica*. 2016. Vol. 11. Issue 1. P. 21–35. DOI: [10.1007/s11440-014-0352-x](https://doi.org/10.1007/s11440-014-0352-x).

Бюллетень Почвенного института им. В.В. Докучаева. 2019. Вып. 97.
Dokuchaev Soil Bulletin, 2019, 97

27. *Moradi A.B., Carminati A., Lamparter A., Woche S.K., Bachmann J., Vetterlein D., Vogel H.J., Oswald S.E.* Is the rhizosphere temporarily water repellent? // *Vadose Zone Journal*. 2012. Vol. 11(3). 8 p.

28. *Papierowska E., Matysiak W., Szatylowicz J., Debaene G., Urbanek E., Kalisz B., Lachacz A.* Compatibility of methods used for soil water repellency determination for organic and organo-mineral soils // *Geoderma*. 2018. Vol. 314. P. 221–231.

29. *Ryley D.J., Khoshaim B.H.* New method of determining contact-angle made by a sessile drop upon a horizontal surface (sessile drop contact-angle) // *Journal of Colloid and Interface Science*. 1977. Vol. 59. Issue 2. P. 243–251.

30. *Shang J., Flury M., Harsh J.B., Zollars R.L.* Comparison of different methods to measure contact angles of soil colloids // *Journal of Colloid and Interface Science*. 2008. Vol. 328. Issue 2. P. 299–307. DOI: [10.1016/j.jcis.2008.09.039](https://doi.org/10.1016/j.jcis.2008.09.039).

31. *Sofinskaya O.A., Kosterin A.V., Kosterina E.A.* Contact angles at the water-air interface of hydrocarbon-contaminated soils and clay minerals // *Eurasian Soil Science*. 2016. Vol. 49. Issue. 12. P. 1375–1381. DOI: [10.1134/S1064229316120115](https://doi.org/10.1134/S1064229316120115).

32. *Wu W.J.* Baseline studies of the clay minerals society source clays: colloid and surface phenomena // *Clays and Clay Minerals*. 2001. Vol. 49. No. 5. P. 446–452.

THE METHOD OF PREPARING SOIL SAMPLES FOR SOIL – WATER CONTACT ANGLE MEASUREMENT USING SESSILE-DROP TECHNIQUE

N. V. Matveeva^{1,2*}, E. Yu. Milanovsky^{1,2}, O. B. Rogova¹

¹*V.V. Dokuchaev Soil Science Institute,
Russia, 119017, Moscow, Pizhevskiy per., 7, build. 2
e-mail: Nataliy_Matveeva@list.ru

²*Lomonosov Moscow State University,
Russia, 119991, Moscow, Leninskie Gory, 1*

Received 06.03.2019, Revised 01.04.2019, Accepted 28.05.2019

The method of soil samples preparation for measuring the (wetting) contact angle (CA) of the soil solid phase surface using membrane filters is proposed. The samples of kaolinite, a standard sample of chernozem and samples of agro-chestnut soil were taken for the experiment. The results of the CA measurements using two types of sample preparation for the analysis were compared. The first method of sample preparation was to apply a sample to a double-sided adhesive tape; the second method involved the deposition of suspen-

sions of the studied samples of certain concentrations on membrane filters. The advantages and disadvantages of each sample preparation method are described. The significant difference in the obtained CA values depending on the sample preparation for measurement was revealed. The method of sample preparation with the use of membrane filters developed by the authors made it possible to reduce the CA measurement error by more than 2 times. Reducing the variation of the CA value of a single sample will allow comparing similar soil samples, including soils of the same type, but involved in different land use systems.

Keywords: wettability, hydrophilicity, hydrophobicity, soil – water contact angle.

REFERENCES

1. Grzhibovskii A.M., Analiz kolichestvennykh dannyykh dlya dvukh nezavisimyykh grupp (Analysis of quantitative data for two independent groups), *Ekologiya cheloveka*, 2008, No. 2, pp. 54–60.
2. Milanovskii E.Yu., Shein E.V., Rusanov A.M., Zasyapkina D.I., Nikolaeva E.I., Anilova L.V., Pochvennaya struktura i organicheskoe veshchestvo tipichnykh chernozemov Predural'ya pod lesom i mnogoletnei pashnei (Soil structure and organic matter of typical chernozem of the Pre-Urals under forest and perennial arable land), *Vestnik Orenburgskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2005, No. 2, pp. 113–117.
3. *Svidetel'stvo na standartnyi obrazets (CO) SP-1 (kurskii chernozem) № 901-90 (OOKO152) po gosudarstvennomu reestru mer i izmeritel'nykh priborov SSSR (razdel standartnye obraztsy)*. Certificate for a standard sample (CO) SP-1 (Kursk black soil) No. 901-90 (OOKO152) according to the state register of measures and measuring devices of the USSR (section standard samples).1990.
4. Shein Ye.V., Milanovskiy Ye.Yu., Khaydapova D.D., Dembovetskiy A.V., Tyugay Z.N., *Novye pribory dlya izucheniya fizicheskikh svoistv pochv: 3D-tomografiya, reologicheskie parametry, kontaktnyi ugol* (New instruments for studying soil physical properties: 3D tomography, rheological properties, contact angle), *Vestnik AGAU*, 2014, No. 5 (115), pp. 44–48.
5. Kholodov V.A., Yaroslavtseva N.V., Yashin M.A., Frid A.S., Lazarev V.I., Tyugai Z.N., Milanovskii E.Yu., Kontaktnye ugly smachivaniya i vodoustoichivost' pochvennoi struktury (Contact angles of wetting and water resistance of the soil structure), *Pochvovedenie*, 2015, No. 6, pp. 693–693, DOI: [10.7868/S0032180X15060064](https://doi.org/10.7868/S0032180X15060064).
6. Adamson A., Physical chemistry of surfaces 5th edn, New York: NY John Wiley & Sons Inc, 1990, 757 p.

Бюллетень Почвенного института им. В.В. Докучаева. 2019. Вып. 97.
Dokuchaev Soil Bulletin, 2019, 97

7. Bachmann J., Contact angle and surface charge of wettable and hydrophobic silt particles, *J. Soil Sci. Plant Nutr.*, 2001, No. 1, pp. 26–33.
8. Bachmann J., Ellies A., Hartge K.H., Development and application of a new sessile drop contact angle method to assess soil water repellency, *Journal of Hydrology*, 2000a, No. 231, pp. 66–75.
9. Bachmann J., Goebel M.O., Woche S.K., Small-scale contact angle mapping on undisturbed soil surfaces, *Journal of Hydrology and Hydromechanics*, 2013, No. 61 (1), pp. 3–8.
10. Bachmann J., McHale G. Superhydrophobic surfaces: a model approach to predict contact angle and surface energy of soil particles, *European Journal of Soil Science*, 2009, No. 60 (3), pp. 420–430.
11. Bachmann J., Horton R., Van Der Ploeg R.R., Woche S., Modified sessile drop method for assessing initial soil-water contact angle of sandy soil, *Soil Science Society of America Journal*, 2000b, No. 64 (2), pp. 564–567, DOI: [10.2136/sssaj2000.642564x](https://doi.org/10.2136/sssaj2000.642564x).
12. Bachmann J., Woche S.K., Goebel M.O., Kirkham M.B., Horton R., Extended methodology for determining wetting properties of porous media, *Water Resources Research*, 2003, Vol. 39, No. 12, 14 p., DOI: [10.1029/2003WR002143](https://doi.org/10.1029/2003WR002143).
13. Bahrani B., Mansell R.S., Hammond L.C., Using infiltrations of heptane and water into soil columns to determine soil-water contact angles, *Soil Science Society of America Journal*, 1973, No. 37 (4), pp. 532–534, DOI: [10.2136/sssaj1973.03615995003700040020x](https://doi.org/10.2136/sssaj1973.03615995003700040020x).
14. Beatty S.M., Smith J.E., Fractional wettability and contact angle dynamics in burned water repellent soils, *Journal of Hydrology*, 2010, Vol. 391, No. 1–2, pp. 99–110, DOI: [10.1016/j.jhydrol.2010.07.007](https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2010.07.007).
15. Burghardt W., Determination of the wetting characteristics of peat soil extracts by contact-angle measurements, *Zeitschrift Fur Pflanzenernahrung Und Bodenkunde*, 1985, Vol. 148, No. 1, pp. 66–72, DOI: [10.1002/jpln.19851480108](https://doi.org/10.1002/jpln.19851480108).
16. Dekker L.W., Ritsema C.J., Oostindie K., Boersma O.H., Effect of drying temperature on the severity of soil water repellency, *Soil Science*, 1998, No. 163 (10), pp. 780–796, DOI: [10.1097/00010694-199810000-00002](https://doi.org/10.1097/00010694-199810000-00002).
17. Doerr S.H., On standardizing the 'water drop penetration time' and the 'molarity of an ethanol droplet' techniques to classify soil hydrophobicity: A case study using medium textured soils, *Earth Surface Processes and Landforms*, 1998, Vol. 23, No. 7, pp. 663–668.
18. Doerr S.H., Shakesby R.A., Walsh R.P.D., Soil water repellency: its causes, characteristics and hydro-geomorphological significance, *Earth-Science Reviews*, 2000, Vol. 51, Issue 1, pp. 33–65, DOI: [10.1016/S0012-8252\(00\)00011-8](https://doi.org/10.1016/S0012-8252(00)00011-8).

Бюллетень Почвенного института им. В.В. Докучаева. 2019. Вып. 97.
Dokuchaev Soil Bulletin, 2019, 97

19. Ellerbrock R.H., Gerke H.H., Bachmann J., Goebel M.O., Composition of organic matter fractions for explaining wettability of three forest soils, *Soil Science Society of America Journal*, 2005, Vol. 69, Issue 1, pp. 57–66.
20. Goebel M.O., Bachmann J., Woche S.K., Fischer W.R., Horton R., Water potential and aggregate size effects on contact angle and surface energy, *Soil Science Society of America Journal*, 2004, Vol. 68, Issue 2, pp. 383–393.
21. Kholodov V.A., Yaroslavtseva N.V., Yashin M.A., Frid A.S., Lazarev V.I., Tyugai Z.N., Milanovskiy E.Y., Contact angles of wetting and water stability of soil structure, *Eurasian Soil Science*, 2015, Vol. 48, Issue 6, pp. 600–607, DOI: [10.1134/S106422931506006X](https://doi.org/10.1134/S106422931506006X).
22. Kruskal W.H., Wallis W.A., Use of ranks in one-criterion variance analysis, *Journal of the American statistical Association*, 1952, Vol. 47, Issue 260, pp. 583–621.
23. Lamparter A., Bachmann J., Woche S.K., Determination of small-scale spatial heterogeneity of water repellency in sandy soils, *Soil Science Society of America Journal*, 2010, Vol. 74, Issue 6, pp. 2010–2012.
24. Leelamanie D.A.L., Karube J., Yoshida A., Clay effects on the contact angle and water drop penetration time of model soils, *Soil Science and Plant Nutrition*, 2010, Vol. 56, Issue 3, pp. 371–375, DOI: [10.1111/j.1747-0765.2010.00471.x](https://doi.org/10.1111/j.1747-0765.2010.00471.x).
25. Lilliefors H.W., On the Kolmogorov-Smirnov test for normality with mean and variance unknown, *Journal of the American statistical Association*, 1967, Vol. 62, Issue 318, pp. 399–402.
26. Liu Z., X. Yu, Wan L., Capillary rise method for the measurement of the contact angle of soils, *Acta Geotechnica*, 2016, Vol. 11, Issue 1, pp. 21–35, DOI: [10.1007/s11440-014-0352-x](https://doi.org/10.1007/s11440-014-0352-x).
27. Moradi A.B., Carminati A., Lamparter A., Woche S.K., Bachmann J., Vetterlein D., Vogel H.J., Oswald S.E., Is the rhizosphere temporarily water repellent? *Vadose Zone Journal*, 2012, Vol. 11 (3), 8 p.
28. Papierowska E., Matysiak W., Szatylowicz J., Debaene G., Urbanek E., Kalisz B., Lachacz A., Compatibility of methods used for soil water repellency determination for organic and organo-mineral soils, *Geoderma*, 2018, Vol. 314, pp. 221–231.
29. Ryley D.J., Khoshaim B.H., New method of determining contact-angle made by a sessile drop upon a horizontal surface (sessile drop contact-angle), *Journal of Colloid and Interface Science*, 1977, Vol. 59, Issue 2, pp. 243–251.
30. Shang J., Flury M., Harsh J.B., Zollars R.L., Comparison of different methods to measure contact angles of soil colloids, *Journal of Colloid and Interface Science*, 2008, Vol. 328, Issue 2, pp. 299–307, DOI: [10.1016/j.jcis.2008.09.039](https://doi.org/10.1016/j.jcis.2008.09.039).

Бюллетень Почвенного института им. В.В. Докучаева. 2019. Вып. 97.
Dokuchaev Soil Bulletin, 2019, 97

31. Sofinskaya O.A., Kosterin A.V., Kosterina E.A., Contact angles at the water-air interface of hydrocarbon-contaminated soils and clay minerals, *Eurasian Soil Science*, 2016, Vol. 49, Issue 12, pp. 1375–1381, DOI: [10.1134/S1064229316120115](https://doi.org/10.1134/S1064229316120115).

32. Wu W.J., Baseline studies of the clay minerals society source clays: colloid and surface phenomena, *Clays and Clay Minerals*, 2001, Vol. 49, No. 5, pp. 446–452.

Ссылки для цитирования:

Матвеева Н.В., Милановский Е.Ю., Рогова О.Б. Способ подготовки образцов почв для определения контактного угла смачивания методом сидячей капли // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2019. Вып. 97. С. 91-112. DOI: 10.19047/0136-1694-2019-97-91-112

For citation:

Matveeva N.V, Milanovsky E.Yu., Rogova O.B. The method of preparing soil samples for soil – water contact angle measurement using sessile-drop technique, *Dokuchaev Soil Bulletin*, 2019, V. 97, pp. 91-112, DOI: 10.19047/0136-1694-2019-97-91-112

МОЛЕКУЛЯРНО-МАССОВЫЙ СОСТАВ ГУМИНОВЫХ КИСЛОТ ГОРОДСКИХ ПОЧВ (НА ПРИМЕРЕ САО Г. МОСКВЫ)

**© 2019 г. А. И. Филатова, В. Г. Мамонтов,
П. Ю. Панова***

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

**e-mail: soillab@rgau-msha.ru*

*Поступила в редакцию 31.10.2018, после доработки 08.11.2018,
принята к публикации 28.05.2019*

В статье приводятся результаты исследований и сравнительная характеристика гуминовых кислот дерново-подзолистой почвы Лесной опытной дачи (ЛОД) РГАУ–МСХА и урбаноземов Тимирязевского района г. Москвы. Гуминовые кислоты зональной дерново-подзолистой почвы заповедной территории ЛОД включают четыре фракции с различными молекулярными массами (ММ): 1-я фракция – $ММ \geq 23\,440$ а.е.м., 2-я – $13\,340$ а.е.м., 3-я – $5\,500$ а.е.м. и 4-я – $2\,460$ а.е.м. Доминирует среди них фракция с молекулярной массой $5\,500$ а.е.м. и относительным содержанием 38 %, причем на долю низкомолекулярных фракций ($< 20\,000$ а.е.м.) приходится 70 % от общей массы гуминовых кислот. Если примерная средневесовая молекулярная масса гуминовых кислот в целом равна $17\,530$ а.е.м., то средневесовая молекулярная масса низкомолекулярных фракций составила $9\,960$ а.е.м. Гуминовые кислоты урбаноземов отличаются молекулярно-массовым составом от гуминовых кислот дерново-подзолистой почвы. В большинстве случаев они состоят из пяти-шести, реже из трех фракций с молекулярными массами от $1\,780$ до $\geq 23\,440$ а.е.м. При этом на долю их средне- и высокомолекулярных фракций приходится от 31–37 % до 47–50 % от общей массы гуминовых кислот. Характерной особенностью гуминовых кислот урбаноземов также является присутствие в их составе низкомолекулярных фракций с молекулярными массами, отсутствующими в гуминовых кислотах дерново-подзолистой почвы. Гуминовые кислоты урбаноземов имеют более высокие примерные средневесовые молекулярные массы, варьирующие в пределах $17\,680$ – $19\,980$ а.е.м., а также более высокие средневесовые молекулярные массы низкомолекулярных фракций которые изменяются от $10\,680$ до $13\,650$ а.е.м.

Ключевые слова: дерново-подзолистая почва, урбанозем, гуминовые кислоты, молекулярная масса, средневесовая молекулярная масса.

DOI: 10.19047/0136-1694-2019-97-113-128

ВВЕДЕНИЕ

При изучении органического вещества почвы широкое применение получил метод гель-хроматографии, зарекомендовавший себя как надежный и быстрый способ фракционирования и определения молекулярных масс гумусовых веществ при изучении процессов их формирования, миграции и трансформации. С его помощью получен значительный объем ценной научной информации об особенностях органического вещества различных почв. В частности, надежно установлена полидисперсность гумусовых кислот, т.е. присутствие среди них молекул с разными молекулярными массами ([Khan, Friesen, 1972](#); [Goh, Williams, 1979](#); [Александрова, 1980](#); [Орлов, 1990](#); [Piccolo, Conte, 2000](#)), причем молекулярные массы (ММ) гуминовых кислот (ГК) варьируют в весьма широких пределах ([Tan, Giddens, 1972](#); [Колесников, 1978](#); [Орлов, 1990](#); [Попов, 2004](#)), а сами фракции различаются между собой составом и свойствами.

Показано, что с уменьшением ММ в ГК снижается содержание Н и N, возрастают количество О, карбоксильных групп, степень окисленности и доля циклических структур в их составе ([Swift, Posner, 1972](#); [Tan, Giddens, 1972](#); [Александрова, 1980](#); [Goh, Williams, 1982](#); [Лиштван и др., 2012](#)). Уменьшение молекулярной массы ГК сопровождается увеличением их возраста ([Чичагова, Тарасова, 1992](#)) и концентрации парамагнитных центров ([Стригуцкий и др., 1992](#)). Высокомолекулярные фракции ГК обогащены жирными кислотами, полисахаридами и полипептидами, в них значительно ниже концентрация фотосенсибилизирующих хромофоров в связи с чем меньше интенсивность поглощения в УФ и видимой частях спектра ([Ришар и др., 2008](#)).

Эти и другие материалы ([Околенова, Барановская, 1987](#); [Мамонтов и др., 2009](#); [Карпухин и др., 2010](#)) позволили значительно расширить представления о формировании и функционировании органической части почв и особенностях ее трансформации под влиянием природных и антропогенных факторов. Однако

получены они при изучении целинных почв и почв агроценозов, в то время как сведения об особенностях молекулярно-массового состава ГК городских почв практически отсутствуют. В то же время такая информация, безусловно, необходима для получения объективных и целостных представлений об особенностях органического вещества урбаноземов как важнейшего фактора, обуславливающего их стабильное состояние и эффективное функционирование.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Объектами наших исследований служили почвы городских ценозов Северного административного округа г. Москвы: дерново-подзолистая почва Лесной опытной дачи (ЛЮД), урбаноземы парка Дубки, газонов Тимирязевской улицы, междомовой территории по Тимирязевской улице (МДТ), Коптевского бульвара, сквера на Большой Академической улице.

Ранее было установлено, что урбаноземы заметно отличаются от зональной дерново-подзолистой почвы не только лабильными, динамичными свойствами, но и фундаментальными, относительно стабильными показателями. В отличие от кислой, ненасыщенной основаниями дерново-подзолистой почвы урбаноземы характеризуются нейтральной или слабощелочной реакцией среды, более высоким содержанием гумуса, обменных Са и Mg и более широким отношением Са : Mg в гумусовом слое, наличием свободных карбонатов, их профиль может быть не дифференцирован по гранулометрическому и валовому составу. По сравнению с зональной дерново-подзолистой почвой урбаноземы содержат меньше валовых SiO₂, TiO₂ и часто Na₂O, больше Al₂O₃, Fe₂O₃, MgO, CaO ([Мамонтов и др., 2016](#)).

Для получения препаратов гуминовые кислоты экстрагировали 0.1 н. раствором NaOH до предельного извлечения после предварительного декальцинирования почвы по общепринятой методике ([Орлов, Гришина, 1981](#)). Для фракционирования ГК использовали сефадекс G-50. Концентрация ГК, наносимых на колонку, составляла 4 мг/мл, растворителем служил 0.1 н. раствор NaOH, элюентом – 0.015 М фосфатный буфер с pH 7.5, отбор проб проводили через 2 мл, оптическую плотность измеряли на КФК-3-

01 при длине волны 315 нм. Для определения свободного объема использовали голубой декстран, ММ фракций ГК находили по эмпирической формуле ([Остерман, 1985](#)).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Фракционирование ГК исследуемых почв на сефадексе G-50 позволило выявить неоднородность их молекулярно массового состава (рис. 1).

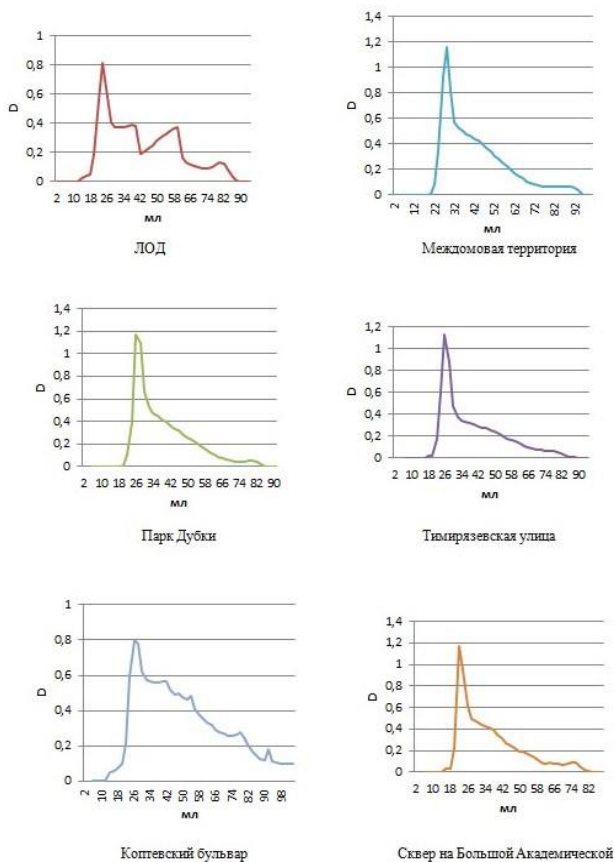


Рис. 1. Гель-хроматограммы ГК городских почв.

Fig. 1. Gel-filtration chromatograms of humic acids in urban soils.

На гель-хроматограмме ГК дерново-подзолистой почвы отчетливо выделяются четыре фракции, расположенные в областях разных ММ, на гель-хроматограмме ГК урбанозема Коптевского бульвара присутствует шесть фракций. На гель-хроматограммах ГК остальных урбаноземов более или менее ясно обособились 1-я и последняя фракции в областях высоких и низких ММ, а между ними располагается обширная область, отнесенная к фракции 2, где отчетливого разделения на фракции не произошло. Элюенты, относящиеся к этой области гель-хроматограмм, были собраны, упарены, каждый до объема 2 мл, и заново пропущены через колонку с гелем. В результате этого ГК некоторых урбаноземов удалось разделить еще на ряд фракций (рис. 2).

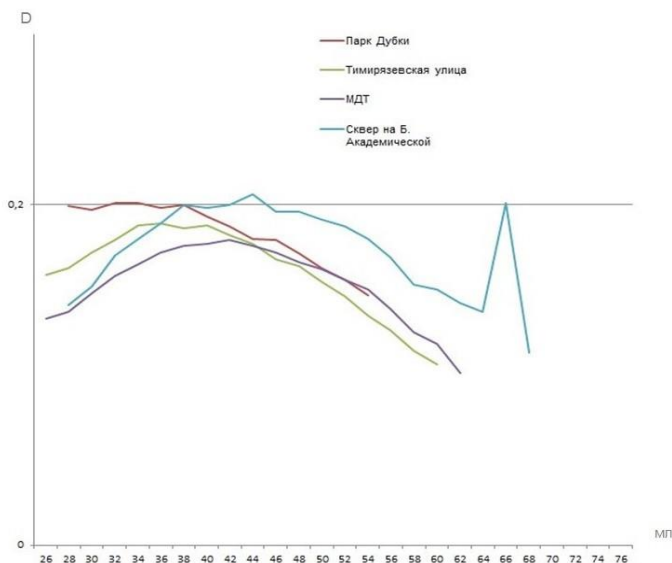


Рис. 2. Гель-хроматограммы 2-й фракции ГК урбаноземов.

Fig. 2. Gel-filtration chromatograms of the 2nd fraction of humic acids in urban soils.

В составе ГК урбаноземов парка Дубки и газона Тимирязевской улицы обнаружилось по три фракции, а в составе ГК урбанозема сквера на Большой Академической улице – четыре фракции, тогда как ГК урбанозема МДТ на фракции не разделились.

Результаты по оценке молекулярно-массового состава ГК исследуемых почв представлены в таблице 1.

Таблица 1. Молекулярно-массовый состав гуминовых кислот городских почв

Table 1. Molecular weight composition of humic acids in urban soils

Объект, почва	Номер фракции	ММ фракции, а.е.м.	Относительное содержание фракции, %	Примерная средневесовая ММ ГК, а.е.м.	Средневесовая ММ низкомолеку- лярных фрак- ций, а.е.м.
ЛОД, дерново- подзолистая почва	1	$\geq 23\ 440$	30	17 530	9 960
	2	13 340	24		
	3	5 500	38		
	4	2 460	8		
МДТ по Тимирязевской улице, урбанозем	1	$\geq 23\ 440$	40	18 500	11 200
	2	11 350	55		
	3	2 090	5		
Парк Дубки, урбанозем	1	$\geq 23\ 440$	50	19 980	13 650
	2	16 980	14		
	3	13 340	17		
	4	9 660	18		
	5	2 880	1		
Тимирязевская улица, урбанозем	1	$\geq 23\ 440$	47	19 560	12 890
	2	14 450	18		
	3	12 300	29		
	4	4 320	2		
	5	3 390	4		
Коптевский бульвар, урбанозем	1	$\geq 23\ 440$	31	17 680	10 990
	2	14 450	19		
	3	10 470	10		
	4	8 220	25		
	5	3 130	10		
	6	1 780	5		

Сквер на Большой Ака- демической улице, урбанозем	1	$\geq 23\ 440$	37	18 150	10 680
	2	13 340	18		
	3	10 470	12		
	4	8 910	24		
	5	4 320	5		
	6	3 390	4		

В большинстве случаев ГК почв каждого из изученных объектов характеризуются своими особенностями молекулярно-массового состава, проявляющимися в разной степени дисперсности, величинах ММ отдельных фракций и их относительном содержании.

Согласно полученным данным ГК зональной дерново-подзолистой почвы Лесной опытной дачи, сформировавшейся под смешанным древостоем, состоят из четырех фракций, различающихся между собой ММ и их относительным содержанием. Преобладает в составе ГК фракция 3 с ММ 5 500 а.е.м., относительное содержание которой составило 38 %. Следующей по значимости вклада в общую массу ГК является выходящая со свободным объемом фракция 1 с ММ $\geq 23\ 440$ а.е.м. при относительном содержании 30 %. В количественном отношении к ней близка фракция 2, имеющая ММ 13 330 а.е.м., на долю которой приходится 24 %. В очень незначительном количестве – 8 % в составе ГК дерново-подзолистой почвы обнаруживается фракция 4 с ММ 2 460 а.е.м.

Считается ([Орлов, 1990](#)), что основная масса молекул ГК имеет средние размеры молекул, лежащие в пределах 20 000 – 80 000 а.е.м. Если исходить из этих данных ГК дерново-подзолистой почвы городского лесного ценоза, испытывающего сравнительно незначительную антропогенную нагрузку, характеризуются относительно невысокой степенью дисперсности. Представлены они в основном низкомолекулярными фракциями (< 20 000 а.е.м.), на долю которых приходится 70 % от массы ГК, а примерная средневесовая ММ ГК составила 17 530 а.е.м., тогда как средневесовая ММ низкомолекулярных фракций – 9 960 а.е.м.

ГК урбаноземов различных городских ценозов характеризуются иным молекулярно-массовым составом, нежели распространенные на территории Лесной опытной дачи дерново-

подзолистые почвы. Различия касаются как степени дисперсности ГК, так и величин молекулярных масс и относительного содержания отдельных фракций.

ГК МДТ состоят всего из трех фракций. Преобладает среди них фракция 2 с ММ 11 350 а.е.м. и относительным содержанием 55 %. Самое низкое содержание – 5 % присуще фракции 3 с ММ 2 090 а.е.м. Фракция 1 с ММ $\geq 23\,440$ а.е.м содержится в количестве 40 %.

В целом ГК МДТ заметно отличаются от ГК дерново-подзолистой почвы. Они менее дисперсны, и в их составе доминирует фракция, отсутствующая среди фракций ГК дерново-подзолистой почвы. Кроме того, они содержат на 10 % меньше низкомолекулярных фракций и имеют более высокую примерную средневесовую ММ равную 18 500 а.е.м., выше и средневесовая ММ их низкомолекулярных фракций – 11 200 а.е.м.

ГК урбаноземов парка Дубки и газона Тимирязевской улицы состоят из пяти фракций. Кроме одинаковой степени дисперсности их молекулярно-массовый состав имеет еще ряд сходных черт. В первую очередь следует отметить высокое содержание (47–50 %) выходящей со свободным объемом фракции 1 с ММ $\geq 23\,440$ а.е.м. Наряду с этим они включают имеющую довольно близкий размер молекул (2 880–3 390 а.е.м.) низкомолекулярную фракцию 5, содержащуюся в очень маленьком количестве (1–4 %). Наконец, они имеют довольно близкую примерную средневесовую ММ (19 560–19 980 а.е.м.) и одинаковое общее содержание низкомолекулярных фракций (50–53 %).

Различаются между собой ГК урбаноземов парка Дубки и газона Тимирязевской улицы абсолютными значениями ММ фракций 2, 3 и 4. Среди них нет фракций одинакового размера, различен и характер вклада отдельных фракций в общую массу ГК.

Наряду с низкомолекулярной фракцией 5 в состав ГК урбанозема парка Дубки входят еще три низкомолекулярные фракции с ММ 16 980, 13 340 и 9 660 а.е.м., причем их относительное содержание практически одинаковое и составило 14 %, 17 % и 18 % соответственно. Средневесовая ММ всех низкомолекулярных фракций равна 13 650 а.е.м.

Содержание низкомолекулярных фракций в составе ГК урбанозема газона Тимирязевской улицы более контрастно. Среди них явно доминирует фракция 3 с ММ 12 300 а.е.м. и относительным содержанием 29 %. В очень небольшом количестве (2 %) присутствует фракция 4 с ММ 4 320 а.е.м., на долю фракции 2 с ММ 14 450 а.е.м. приходится 18 %, средневесовая ММ равна 12 890 а.е.м.

По сравнению с ГК дерново-подзолистой почвы ГК урбаноземов парка Дубки и газона Тимирязевской улицы являются более дисперсными соединениями, что связано с присутствием в них низкомолекулярных фракций, отсутствующих в составе ГК дерново-подзолистой почвы, однако при этом вклад всех низкомолекулярных фракций в общую массу ГК урбаноземов меньше. В связи с этим по сравнению с ГК дерново-подзолистой почвы они имеют более высокую примерную средневесовую ММ и средневесовую ММ низкомолекулярных фракций.

Самыми дисперсными являются ГК урбаноземов Коптевского бульвара и сквера на Большой Академической улице, состоящие из 6 фракций и имеющие довольно похожий молекулярно-массовый состав, что проявляется в близких величинах ММ и содержании основных его фракций. Самое высокое содержание, составляющее 31–31 %, присуще выходящей со свободным объемом фракции 1 с ММ $\geq 23\,440$ а.е.м. Следующей по значимости является фракция 4, имеющая ММ 8 220–8 910 а.е.м. и относительное содержание 24–25 %. Сюда же относится и фракция 3, которая в обоих случаях имеет ММ 10 470 а.е.м. и относительное содержание 10–12 %. Всего на долю этих трех фракций приходится 66–71 % от общей массы ГК, поэтому они преимущественно и определяют особенности их молекулярно-массового состава и величины средневесовых ММ, которые также довольно близки между собой. У ГК урбанозема Коптевского бульвара примерная средневесовая ММ составила 17 680 а.е.м., а низкомолекулярных фракций – 10 990 а.е.м., у ГК урбанозема сквера на Большой Академической улице – 18 150 а.е.м. и 10 680 а.е.м. соответственно.

Различия между ГК этих почв обусловлены величинами ММ и относительным содержанием фракций 2, 5 и 6. У ГК урбанозема Коптевского бульвара величина ММ фракции 2 составила 14 450

а.е.м, при относительном содержании 19 %, у ГК урбанозема сквера на Большой Академической улице ММ фракции 2 меньше – 13 340 а.е.м., хотя содержание такое же. Различаются между собой и наиболее низкомолекулярные фракции 5 и 6. У ГК урбанозема Коптевского бульвара эти фракции имеют ММ 3 130 и 1 780 а.е.м., при относительном содержании 10 % и 5 %, тогда как у ГК урбанозема сквера на Большой Академической улице – 4 320 и 3 390 а.е.м. и 5 % и 4 % соответственно.

В целом ГК урбаноземов Коптевского бульвара и сквера на Большой Академической улице, как и ГК дерново-подзолистой почвы состоят преимущественно из низкомолекулярных фракций, однако являются более дисперсными соединениями с более высокой средневесовой ММ. Сформированы они фракциями, отсутствующими в составе ГК дерново-подзолистой почвы, за исключением ГК урбанозема сквера на Большой Академической улице, которые, как и ГК дерново-подзолистой почвы, содержат фракцию с ММ 13 340 а.е.м., причем примерно в таком же количестве.

Таким образом, ГК урбаноземов характеризуются иным молекулярно-массовым составом, нежели ГК малоизмененной под влиянием человеческой деятельности зональной дерново-подзолистой почвы заповедной территории. Различия касаются как степени дисперсности ГК, так и величин ММ отдельных фракций, а также примерных средневесовых ММ ГК и средневесовых ММ низкомолекулярных фракций. Обусловлены они различными причинами, но, несомненно, ведущую роль в этом играет антропогенный фактор.

В отличие от почв лесоохранных и заповедных территорий урбопочвы, формирующие основной фон почвенного покрова в городах, в значительно большей степени подвержены антропогенному воздействию, что отражается на их режимах и свойствах, в том числе и на молекулярно-массовом составе ГК. Это может быть связано с тем, что в урбаноземах процесс гумификации протекает в качественно других условиях, по сравнению с зональной дерново-подзолистой почвой естественного ценоза. Обусловлено это не только иными химическими и физико-химическими свойствами городских почв, но и изменением характера растительности. Замена смешанного древостоя, свойственного естественным

условиям почвообразования, травянистой растительностью или же преимущественно листовыми породами деревьев с обильным травянистым покровом отражается на масштабах и химическом составе растительного опада, ежегодно поступающего в почву. Изменение условий, в которых протекает процесс гумификации, а также привнос в почвенный профиль при его конструировании органогенных материалов, уже содержащих сформировавшиеся гумусовые вещества, будет отражаться на качественных характеристиках ГК и, в частности, их молекулярных массах. При этом большое значение будет иметь устойчивость ГК этих органогенных материалов к условиям среды, свойственной урбаноземам. Не исключено, что какая-то часть низкомолекулярных фракций ГК урбаноземов не сформировалась в результате протекающего в урбопочвах процесса гумификации, не сохранилась от исходной почвы и не поступала в почвенный профиль при его формировании. Они могут быть продуктом разрушения более крупных молекул ГК, входивших в состав органогенных веществ, использовавшихся при создании урбаноземов и оказавшихся неустойчивыми в иных условиях, по сравнению с теми, в которых они изначально сформировались. Так или иначе, несоответствие молекулярно-массового состава ГК урбаноземов молекулярно-массовому составу ГК, образующихся при зональном типе почвообразования, может стать причиной неустойчивости органопрофиля искусственно созданных городских почв и его ускоренной деградации, в результате чего почвенный покров не сможет в должной мере осуществлять свои экологические функции.

ВЫВОДЫ

1. Гуминовые кислоты городских почв имеют сложный молекулярно-массовый состав и состоят из различного количества фракций, отличающихся молекулярными массами и их относительным содержанием.

2. Гуминовые кислоты зональной дерново-подзолистой почвы состоят из четырех фракций с молекулярными массами от 2 460 до $\geq 23\,440$ а.е.м., среди них преобладают низкомолекулярные фракции, на долю которых приходится 70 % от общей массы гуминовых кислот.

Гуминовые кислоты урбаноземов состоят из пяти-шести фракций с молекулярными массами от 1 780 до $\geq 23\,440$ а.е.м., реже из трех фракций с молекулярными массами от 2 090 до $\geq 23\,440$ а.е.м., а вклад низкомолекулярных фракций в общую массу гуминовых кислот варьирует от 50 % до 69 %.

3. В городских условиях антропогенное воздействие на состав и свойства органической части почв преобладает над естественными факторами почвообразования, что вызывает изменение степени дисперсности и увеличение примерной средневесовой молекулярной массы гуминовых кислот урбаноземов, по сравнению с гуминовыми кислотами зональной дерново-подзолистой почвы на 150–2 450 а.е.м., а средневесовой молекулярной массы их низкомолекулярных фракций – на 720–3 690 а.е.м.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Александрова Л.А.* Органическое вещество почвы и процессы его трансформации. Л.: Наука, 1980. 288 с.
2. *Карпухин А.И., Илахун А., Ториин С.П.* Координационные соединения органических веществ почв с ионами металлов и влияние комплексонатов на их доступность. М.: ВНИИА, 2010. 272 с.
3. *Колесников М.П.* Молекулярно-весовое распределение гуминовых кислот по данным гель-хроматографии на сефадексах // Почвоведение. 1978. № 4. С. 32–41.
4. *Лиштван И.И., Калуцкий Ф.Н., Абрамец А.М., Янута Ю.Г., Монич Г.С., Алейникова В.Н., Глухова Н.С.* Фракционирование гуминовых кислот как метод получения стандартизированных гуминовых материалов // Вестник БГУ. 2012. Серия 2. № 2. С. 7–11.
5. *Мамонтов В.Г., Сюняев Н.К., Афанасьев Р.А.* Молекулярно-массовый состав гуминовых кислот обыкновенного чернозема при орошении // Плодородие. 2009. № 3 (48). С. 28–30.
6. *Мамонтов В.Г., Филатова А.И., Комаристая С.С., Рябова О.Б., Смартыгин С.Н., Черничкин Р.В.* Свойства городских почв (на примере САО г. Москвы) // Плодородие. 2016. № 6 (93). С. 56–58.
7. *Околелова А.А., Барановская В.А.* Гумусовые кислоты степных почв Нижнего Поволжья и их изменение под влиянием орошения // Органическое вещество пахотных почв. М.: Почв. ин-т им. В.В. Докучаева. 1987. С. 135–142.
8. *Орлов Д.С.* Гумусовые кислоты почв и общая теория гумификации. М.: МГУ, 1990. 325 с.

Бюллетень Почвенного института им. В.В. Докучаева. 2019. Вып. 97.
Dokuchaev Soil Bulletin, 2019, 97

9. Орлов Д.С., Гришина Л.А. Практикум по химии гумуса. М.: МГУ, 1981. 272 с.
10. Остерман Л.А. Хроматография белков и нуклеиновых кислот. М.: Наука, 1985. 536 с.
11. Попов А.И. Гуминовые вещества: свойства, строение, образование. СПб: 2004. 248 с.
12. Ришар К., Гийо Ж., Азвер Ж.-П., тер Халле А., Трубецкая О.Е., Трубецкой О.А. Роль фракционирования при изучении фотохимических свойств гумусовых веществ // Российский химический журнал. 2008. Т. LI. № 1. С. 107–113.
13. Стригуцкий В.П., Навоша Ю.Ю., Смычник Т.П., Бамбалов Н.Н. Исследование структуры гуминовых кислот методом нелинейной ЭПР-спектроскопии // Почвоведение. 1992. № 1. С. 147–151.
14. Чичагова О.А., Тарасова Т.И. Свойства разновозрастных гуминовых веществ // Почвоведение. 1992. № 1. С. 94–99.
15. Goh K.M., Williams M.R. Changes in molecular weight distribution of soil organic matter during soil development // Soil Science. 1979. Vol. 30. P. 747–755.
16. Goh K.M., Williams M.R. Distribution of carbon, nitrogen, phosphorus, sulphur and acidity in two molecular weight fractions of organic matter in soil chronosequences // Soil Science. 1982. Vol. 33. No. 1. P. 73–87.
17. Khan S.V., Friesen D., Gel-filtration of humic acids extracted from the black solonchic soil and black chernozemic soils of Alberta // Soil Science. 1972. Vol. 114. No. 1. P. 73–74.
18. Piccolo A., Conte P. Molecular size of humic substance, supramolecular associations versus macromolecular polymers // Advances in Environmental Research. 2000. No. 3(4). P. 508–521.
19. Swift R.S., Posner A.M. Nitrogen, phosphorus and sulphur content of humic acid fractionated with respect to molecular weight phosphorus, sulphur // Soil Science. 1972. Vol. 23. No. 1. P. 50–57.
20. Tan K.H., Giddens J.E. Molecular weights and spectral characteristics humic and fulvic acids // Geoderma. 1972. Vol. 8. No. 4. P. 221–229.

MOLECULAR WEIGHT COMPOSITION OF HUMIC ACIDS IN URBAN SOILS (THE NORTHERN ADMINISTRATIVE DISTRICT OF MOSCOW CITY TAKEN AS AN EXAMPLE)

A. I. Filatova, V. G. Mamontov, P. Yu. Panova*

Russian State Agrarian University –
Moscow Agricultural Academy named after K.A. Timiryazev
Russia, 127550, Moscow, Timiryazevskaya str., 49
* e-mail: soillab@rqau-msha.ru

Received 31.10.2018, Revised 08.11.2018, Accepted 28.05.2019

The article provides research results and comparative analysis of humic acids in sod-podzolic soil of the Experimental Forest of the Russian State Agrarian University (protected area) and urban soils located in the Timiryazev district of Moscow. Humic acids of the zonal sod-podzolic soil of the Experimental Forest include four fractions with varying molecular weight: the 1st fraction – $\geq 23\,440$ unified atomic mass units (amu), the 2nd one – $13\,340$ amu, the 3rd one – $5\,500$ amu and the 4th one – $2\,460$ amu. The fraction with a molecular weight of $5\,500$ amu and a relative content of 38 % dominates among them, while the share of low-molecular fractions ($< 20\,000$ amu) accounts for 70 % of the total mass of humic acids. When weight-average molecular mass of humic acids is $17\,530$ amu, the average molecular mass of the low-molecular fractions is $9\,960$ amu. Humic acids of urbanozems differ in molecular weight composition from humic acids of sod-podzolic soil. In most cases it consists of 5–6, less commonly of 3, fractions with molecular weight from $1\,780$ to $\geq 23\,440$ amu. The share of medium- and high-molecular fractions fluctuates from 31–37 % to 47–50 % of the total mass of humic acids. The characteristic feature of humic acids of urbanozems is the presence in their composition of low-molecular fractions with such molecular weights, which are not found in humic acids of sod-podzolic soil. Thus, humic acids of urbanozems are characterized by higher weight-average molecular mass ranging from $17\,680$ to $19\,980$ amu, as well as by higher weight-average molecular mass of the low-molecular fractions which vary from $10\,680$ to $13\,650$ amu.

Keywords: sod-podzolic soil, urbanozem, humic acids, fraction, molecular weight, weight-average molecular mass.

REFERENCES

1. Aleksandrova L.A., *Organicheskoe veshchestvo pochvy i protsessy ego transformatsii* (Soil organic matter and its transformation processes), Leningrad: Nauka, 1980, 288 p.
2. Karpukhin A.I., Ilakhun A., Torshin S.P., *Koordinatsionnye soedineniya organicheskikh veshchestv pochv s ionami metallov i vliyanie kompleksatov na ikh dostupnost'* (Coordination compounds of soil organic substances with metal ions and the effect of complexonates on their availability), Moscow: VNIIA, 2010, 272 p.

Бюллетень Почвенного института им. В.В. Докучаева. 2019. Вып. 97.
Dokuchaev Soil Bulletin, 2019, 97

3. Kolesnikov M.P., Molekulyarno-vesovoe raspredelenie guminovykh kislot po dannym gel'-khromatografii na sefadeksakh (Molecular weight distribution of humic acids according to gel chromatography on Sephadexes), *Pochvovedenie*, 1978, No. 4, pp. 32–41.
4. Lishtvan I.I., Kalutskii F.N., Abramets A.M., Yanuta Yu.G., Monich G.S., Aleinikova V.N., Glukhova N.S., Fraksionirovanie guminovykh kislot kak metod polucheniya standartizirovannykh guminovykh materialov (Fractionation of humic acids as a method of obtaining standardized humic materials), *Vestnik BGU*, 2012, Series 2, No. 2, pp. 7–11.
5. Mamontov V.G., Syunyaev N.K., Afanas'ev R.A. Molekulyarno-massovyi sostav guminovykh kislot obyknovennogo chernozema pri oroshenii (Molecular mass composition of humic acids of ordinary black soil under irrigation), *Plodorodie*, 2009, No. 3 (48), pp. 28–30.
6. Mamontov V.G., Filatova A.I., Komaristaya S.S., Ryabova O.B., Smarygin S.N., Chernichkin R.V. Svoistva gorodskikh pochv (na primere SAO g. Moskvy) (Properties of urban soil (by the example of the Northern Administrative District of Moscow)), *Plodorodie*, 2016, No. 6 (93), pp. 56–58.
7. Okolelova A.A., Baranovskaya V.A. Gumusovye kisloty stepnykh pochv Nizhnego Povolzh'ya i ikh izmenenie pod vliyaniem orosheniya (Humic acids of steppe soils of the Lower Volga region and their change under the influence of irrigation), In: *Organicheskoe veshchestvo pakhotnykh pochv* (Organic matter of arable soil), Moscow: Pochv. in-t im. V.V. Dokuchaeva, 1987, pp. 135–142.
8. Orlov D.S., *Gumusovye kisloty pochv i obshchaya teoriya gumifikatsii* (Soil humic acids and general theory of humification), Moscow: MGU, 1990, 325 p.
9. Orlov D.S., Grishina L.A. *Praktikum po khimii gumusa* (Workshop on the chemistry of humus), Moscow: MGU, 1981, 272 p.
10. Osterman L.A., *Khromatografiya belkov i nukleinovykh kislot* (Chromatography of proteins and nucleic acids), Moscow: Nauka, 1985, 536 p.
11. Popov A.I., *Guminovye veshchestva: svoistva, stroenie, obrazovanie* (Humic substances: properties, structure, education), St.Petersburg, 2004, 248 p.
12. Rishar K., Giio Zh., Aguer Zh.-P., ter Khalle A., Trubetskaya O.E., Trubetskoi O.A., Rol' fraksionirovaniya pri izuchenii fotokhimicheskikh svoistv gumusovykh veshchestv (The role of fractionation in the study of the photochemical properties of humic substances), *Rossiiskii khimicheskii zhurnal*, 2008, Vol. LII, No. 1, pp. 107–113.
13. Strigutskii V.P., Navosha Yu.Yu., Smychnik T.P., Bambalov N.N., Issledovanie struktury guminovykh kislot metodom nelineinoi EPR-

Бюллетень Почвенного института им. В.В. Докучаева. 2019. Вып. 97.
Dokuchaev Soil Bulletin, 2019, 97

spektroskopii (Study of the structure of humic acids by the method of nonlinear EPR spectroscopy), *Pochvovedenie*, 1992, No. 1, pp. 147–151.

14. Chichagova O.A., Tarasova T.I., *Svoistva raznovozrastnykh guminovykh veshchestv* (Properties of humic substances of different ages), *Pochvovedenie*, 1992, No. 1, pp. 94–99.

15. Goh K.M., Williams M.R., Changes in molecular weight distribution of soil organic matter during soil development, *Soil Science*, 1979, Vol. 30, pp. 747–755.

16. Goh K.M., Williams M.R., Distribution of carbon, nitrogen, phosphorus, sulphur and acidity in two molecular weight fractions of organic matter in soil chronosequences, *Soil Science*, 1982, Vol. 33, No. 1, pp. 73–87.

17. Khan S.V., Friesen D., Gel-filtration of humic acids extracted from the black solonchik soil and black chernozemic soils of Alberta, *Soil Science*, 1972, Vol. 114, No. 1, pp. 73–74.

18. Piccolo A., Conte P., Molecular size of humic substance, supramolecular associations versus macromolecular polymers, *Advances in Environmental Research*, 2000, No. 3 (4), pp. 508–521.

19. Swift R.S., Posner A.M., Nitrogen, phosphorus and sulphur content of humic acid fractionated with respect to molecular weight phosphorus, sulphur, *Soil Science*, 1972, Vol. 23, No. 1, pp. 50–57.

20. Tan K.H., Giddens J.E., Molecular weights and spectral characteristics humic and fulvic acids, *Geoderma*, 1972, Vol. 8, No. 4, pp. 221–229.

Ссылки для цитирования:

Филатова А.И., Мамонтов В.Г., Панова П.Ю. Молекулярно-массовый состав гуминовых кислот городских почв (на примере САО г. Москвы) // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2019. Вып. 97. С. 113-128. DOI: 10.19047/0136-1694-2019-97-113-128

For citation:

Filatova A.I., Mamontov V.G., Panova P.Yu., Molecular weight composition of humic acids in urban soils (the Northern Administrative District of Moscow city taken as an example), *Dokuchaev Soil Bulletin*, 2019, V. 97, pp. 113-128, DOI: 10.19047/0136-1694-2019-97-113-128

ВЛИЯНИЕ ГУМИНОВЫХ ПРЕПАРАТОВ НА СВОЙСТВА ДЕГРАДИРОВАННЫХ ПОЧВ ТЕХНОГЕННЫХ ПУСТОШЕЙ

© 2019 г. П. Н. Трегубова^{1,2*}, Г. Н. Копчик^{1},
А. Л. Степанов¹, А. А. Степанов¹, М. Ю. Корнеечева¹,
Ю. В. Куприянова¹**

¹*МГУ им. М.В. Ломоносова, Россия,
119991, Москва, Ленинские Горы, 1, стр.12,*

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

^{**}*<https://orcid.org/0000-0003-4142-3571>*

²*Сколковский институт науки и технологий, Россия,
121205, Москва, ул. Нобеля, 3,*

*Поступила в редакцию 25.12.2018, после доработки 29.04.2019,
принята к публикации 28.05.2019*

Работа направлена на изучение возможности применения экзогенного органического вещества – гуминовых препаратов (ГП) – для ремедиации почв техногенных пустошей вблизи медно-никелевых комбинатов на Кольском полуострове. В краткосрочных лабораторных экспериментах исследовали возможность стабилизации подвижных форм тяжелых металлов гуминовыми препаратами различного происхождения (торфяной гумат “Флексом” и угольный гумат “Экстра”) в сравнении с ГП, инокулированными биологическими препаратами (микоризообразователями и азотфиксаторами) и минеральными добавками (NPK и CaCO₃). Эксперименты проводили в течение 45 дней после 14 дней прединкубации в климатической камере Binder при контролируемом режиме освещенности, температуры и влажности, соответствующем условиям полярного дня в Кольской Субарктике. По окончании экспериментов оценивали изменение химических свойств почвы, состояние микробного сообщества и тест-культуры (щучки дернистой). Применение торфяного гумата не эффективно без дополнительных мер (сочетания с CaCO₃), при этом эффекта от кооперации с биологическими добавками не отмечено. Внесение угольного гумата способствует стабилизации металлов, активизации почвенной микробиоты и развитию тест-культуры. Возможно сочетание с биологическими добавками, особенно с микоризообразователями. Таким образом, угольные гуматы могут служить перспективным стимулятором роста, мелиорантом и детоксикантом при восстановлении дегра-

Бюллетень Почвенного института им. В.В. Докучаева. 2019. Вып. 97.
Dokuchaev Soil Bulletin, 2019, 97

дированных почв в условиях поликомпонентного загрязнения тяжелыми металлами.

Ключевые слова: техногенные пустоши, ремедиация, гуматы, тяжелые металлы, органическое вещество, кислотность почв.

DOI: 10.19047/0136-1694-2019-97-129-149

ВВЕДЕНИЕ

Урбанизация, промышленная и сельскохозяйственная деятельность человека неизбежно сопровождаются издержками и сопутствующим им спектром экологических проблем ([Добровольский, 1997](#); [Антропогенные почвы..., 2003](#); [Panagos et al., 2013](#)). Постоянное выраженное протекание процессов, не характерных для естественных условий формирования ландшафта, ухудшает способность почвы выполнять свои экосистемные функции, в отдельных случаях разрушая ее полностью ([Adriano, 2001](#); [Toth et al., 2016](#)). В настоящее время среди антропогенных факторов, сопровождающихся деградацией почв, наибольшее распространение получило загрязнение тяжелыми металлами (ТМ) ([Panagos et al., 2013](#)). Актуальным на сегодняшний момент является изучение способов восстановления подвергшихся загрязнению почв – ремедиации, основной задачей которой является уменьшение биологической доступности токсиканта ([Park et al., 2011](#)). Эффективность ремедиации зависит как от факторов, обеспечивающих почвообразование, так и от свойств самих ТМ ([Копчик, 2014](#)).

Перспективным в ремедиации загрязненных ТМ почв является использования гуминовых препаратов (ГП) – производных природного органического вещества, преимущественно получаемых путем щелочной экстракции ([Степанов, Якименко, 2016](#); [Janoš et al., 2010](#); [Pukalchik et al., 2017](#)). Применение ГП в данном направлении обусловлено тем, что органическое вещество является важным компонентом почвенных экосистем, непосредственно участвующим в контроле поведения как элементов питания, так и токсикантов ([Орлов, 1993](#); [Соколова и др., 2009](#); [McBride, 1990](#); [Borůvka, Drábek, 2004](#); [Perminova et al., 2005](#); [Trevisan et al., 2010](#)). Наличие широкого спектра функциональных групп обуславливает способность ГП вступать в ионные и донорно-акцепторные взаимодействия, образовывать водородные связи, активно участвовать

в сорбционных процессах, проявлять полярные и амфифильные свойства. Таким образом, способность ГП связывать ионы металлов в комплексы при определенных условиях может приводить к снижению концентрации свободных ионов, что отвечает целям ремедиации. Отмечается также, что ГП улучшают физико-химические свойства почв, активизируют микрофлору, повышают коэффициент использования минеральных удобрений, усиливают защитные свойства растений к условиям среды ([Орлов, 1993](#); [Куликова, 2008](#); [Perminova et al., 2005](#)). Однако с упомянутой неоднородной функциональной организацией сопряжены и сложности: гуминовые вещества могут способствовать как стабилизации подвижных форм ТМ, так и усиливать их биологическую доступность ([Halim et al., 2003](#)).

Целью данного исследования была отработка метода ремедиации загрязненных почв техногенных пустошей Кольской Субарктики, основанного на внесении ГП в условиях, имитирующих природные условия региона.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Объект исследования, приуроченный к г. Мончегорску Мурманской обл., находится в подзоне северной тайги, Кольско-Печорской подпровинции Североевропейской таежной провинции ([Растительность..., 1980](#)). Для территории характерна замедленность биохимических процессов, короткий вегетационный период.

В рамках исследования была проведена серия лабораторных экспериментов на почвах техногенной пустоши, сформировавшейся в локальной зоне воздействия горно-металлургического комбината (ГМК) “Североникель” в результате многолетних выбросов веществ, сопутствующих технологическому процессу, – диоксида серы и ТМ, преимущественно Ni и Cu. Протяженность пустоши достигает 5–6 км по направлению преобладающих юго-юго-западных ветров, ее характерными чертами являются практически полное отмирание растительности, редуцированный, либо полностью смытый вследствие развития водной и ветровой эрозии органогенный горизонт почв, кислая реакция среды, низкая емкость катионного обмена, высокое содержание главных загрязняющих металлов – Ni и Cu. Используемая в эксперименте почва –

Бюллетень Почвенного института им. В.В. Докучаева. 2019. Вып. 97.
Dokuchaev Soil Bulletin, 2019, 97

абразем альфегумусовый иллювиально-многогумусовый супесчаный на моренных отложениях – была отобрана с участка в 2 км от ГМК. Профиль представлен выходящим на поверхность иллювиальным горизонтом BF, переходным BC и почвообразующей породой С. Координаты участка 67°56.457' с.ш., 32°50.074' в.д.

В качестве тестовой была использована монокультура – щучка дернистая, *Deschampsia cespitosa*, нативная для Кольского полуострова, собранная и предоставленная сотрудниками Полярно-альпийского ботанического сада-института им. Н.А. Аврорина Кольского научного центра РАН.

Эксперименты проводили в контролируемых условиях в климатической камере Binder с режимом освещения, имитирующим полярный день, при температуре и влажности, характерных для летнего сезона в Мончегорском районе согласно данным метеостанции г. Мончегорск с сайта “Расписание погоды” (табл. 1).

Таблица 1. Гидротермический режим в течение экспериментов

Table 1. Hydrothermal regime during experiments

Время, часы	Температура, °С	Влажность, %
00:00 – 06:00	10.3	82.8
06:00 – 12:00	11.9	75.4
12:00 – 18:00	15.0	62.5
18:00 – 24:00	13.4	70.4

В качестве добавок на образцах горизонта BF нами были протестированы коммерческие гуматы – Na/K соли гуминовых веществ различного происхождения: торфяной гумат “Флексом” (ГТ) и угольный гумат (ГУ) “Экстра”. В соответствии с проведенными ранее экспериментами, ГУ вносился в концентрации 0.5 % углерода к массе почвы, дозы ГТ подбирались из ряда от рекомендованных производителем до максимально возможных без нарушения водно-воздушного режима почвы.

Внесение органических добавок в подобранных дозах сравнивали с эффектом от внесения 1) минеральных добавок – CaCO₃ и NPK; 2) ГП, инокулированных биологическими препаратами – микоризообразователями (*Glomus intraradices*, *Glomus proliferum*, *Cenococcum geophilum*) и азотфиксаторами (*Azotobacter chroococcum*, *Rhodococcus erythropolis*, *Pseudomonas fluorescens*) –

Бюллетень Почвенного института им. В.В. Докучаева. 2019. Вып. 97.
Dokuchaev Soil Bulletin, 2019, 97

в целях стабилизации подвижных форм ТМ и усиления биологической активности загрязненной почвы. В данной работе мы оцениваем содержание соединений ТМ, экстрагируемых водой. Оценка содержания фракций, извлекаемых ацетатно-аммонийным буфером, не входила в задачи исследования ввиду отмечающейся в литературе избыточной реакционной способности буфера, из чего следует, что не вполне корректно проводить им экстракцию для определения легкодоступных для растений форм ([Водяницкий и др., 2012](#)).

Подбор вариантов и доз внесения в краткосрочном лабораторном эксперименте первой серии.

Задачи эксперимента: сравнить эффект от внесения набора доз ГП различного происхождения (совместно с NPK) на свойства почв техногенной пустоши и состояние тест-культуры. В эксперименте были использованы следующие варианты: (i) азофоска (NPK) – в качестве контрольного; (ii) карбонат кальция совместно с азофоской ($\text{CaCO}_3 + \text{NPK}$); (iii) ГТ в концентрациях 3 (рекомендация производителя), 300 и 3000 л/га совместно с NPK; (iv) ГУ в концентрации 0.5 % углерода к массе почвы совместно с NPK.

Проверка сочетаемости препаратов, включая микробные, в краткосрочном лабораторном эксперименте второй серии.

Задачи эксперимента: сравнить влияние препаратов в подобранных концентрациях (ГТ – 3000 л/га и ГУ 0.5 %) самих по себе (по результатам первой серии) и совместно с микробными препаратами и CaCO_3 на свойства почв и состояние тест-культуры. ГП были инокулированы микроорганизмами-микоризообразователями (М) и азотфиксаторами (А). В эксперименте были использованы следующие варианты: (i) контроль (без внесения добавок); (ii) ГТ, инокулированный организмами-азотфиксаторами, совместно с азофоской (ГТА + NPK); (iii) ГТ, инокулированный организмами-азотфиксаторами, совместно с азофоской и CaCO_3 (ГТА + NPK + CaCO_3); (iv) ГТ, инокулированный организмами-микоризообразователями, совместно с азофоской (ГТМ + NPK); (v) ГУ, инокулированный организмами-азотфиксаторами, совместно с азофоской (ГУА + NPK); (vi) ГУ, инокулированный организмами-

Бюллетень Почвенного института им. В.В. Докучаева. 2019. Вып. 97.
Dokuchaev Soil Bulletin, 2019, 97

азотфиксаторами, совместно с азотфоской и CaCO_3 (ГУА + NPK + CaCO_3); (vii) ГУ, инокулированный организмами-микоризообразователями, совместно с азотфоской (ГУМ + NPK).

В обеих сериях период предварительной инкубации составил 14 дней, продолжительность инкубации – 45 дней.

По прошествии экспериментов в предварительно растертых до 0.25 мм почвенных образцах определено общее содержание углерода методом сухого сжигания на экспресс-анализаторе АН-7529. В водной вытяжке из почвы были измерены рН потенциометрически, содержание водорастворимых соединений углерода (DOC) и азота (DN) на Shimadzu TOC Analyzer, содержание водорастворимых форм ТМ с помощью масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой (ICP MS 7500a, Agilent). Содержание углерода микробной биомассы (C_{micr}) определяли в свежих образцах почв, лишенных корней, методом фумигации-экстракции ([Vance et al., 1987](#)). В течение эксперимента оценивали эмиссию диоксида углерода почвами в динамике методом закрытых камер с помощью ИК CO_2 -газоанализатора AZ 7752. Также была оценена надземная и подземная фитомасса тест-культуры.

Таким образом, эксперименты проводили в двух сериях, для которых использовали отобранные с участка пустоши усредненные образцы почвы; варианты в разных сериях не повторялись; в первой серии контрольным можно считать вариант с внесением NPK, во второй – без внесения добавок. Для удобства представления экспериментальные результаты объединены. Полученные данные обработаны методами описательной статистики и корреляционного анализа в программах RStudio и Excel.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Свойства почвы. Почва пустоши в контрольном варианте и варианте внесения NPK в среднем характеризуется кислой реакцией среды – $\text{pH} = 4.7\text{--}4.9$, низким общим содержанием органического углерода – $\text{TC} = 1.1\text{--}1.4\%$ (табл. 2). Внесение карбоната кальция сопровождается снижением кислотности; торфяной гумат в выбранных концентрациях сам по себе не способствует тому же эффекту, в то время как внесение угольного гумата значительно повышает pH до $5.4\text{--}6.2$ в среднем по вариантам.

Таблица 2. Свойства почвы пустошей в конце экспериментов: pH – pH водной вытяжки, TC – общее содержание углерода (%), DOC – содержание водорастворимого углерода (мг/кг), DN – содержание водорастворимого азота (мг/кг). Min и Max – минимальное и максимальное значение показателя, Q1 и Q3 – первый и третий квартили, Med – медиана

Table 2. Properties of techogenic barren soil in the end of experiments: pH – pH of water extract, TC – total carbon content (%), DOC – dissolved organic carbon content (mg/kg), DN – dissolved nitrogen content (mg/kg). Min and Max – minimum and maximum of parameter, Q1 and Q3 – first and third quartiles, Med – median

Вариант эксперимента	pH					TC				
	Min	Q1	Med	Q3	Max	Min	Q1	Med	Q3	Max
К	4.6	4.6	4.7	4.8	4.9	1.0	1.1	1.1	1.2	1.2
НПК	4.7	4.8	4.8	4.9	5.2	1.2	1.3	1.4	1.5	1.6
CaCO ₃	4.8	5.1	5.2	5.3	5.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.6
ГТЗ	4.9	5.0	5.0	5.0	5.0	1.5	1.5	1.6	1.6	1.6
ГТ300	4.5	4.6	4.7	4.7	4.7	1.5	1.5	1.5	1.5	1.6
ГТ3000	4.9	4.9	5.0	5.0	5.1	1.6	1.6	1.7	1.7	1.7
ГТА3000+CaCO ₃	6.2	6.2	6.2	6.3	6.3	1.1	1.1	1.1	1.1	1.2
ГТМ3000	4.8	4.8	4.8	4.8	4.9	1.1	1.1	1.1	1.2	1.2
ГТА3000	5.0	5.0	5.0	5.1	5.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1
ГУ	5.1	5.3	5.5	5.6	5.7	1.7	1.9	2.0	2.0	2.0
ГУА+CaCO ₃	6.1	6.2	6.3	6.3	6.3	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4

ГУМ	6.0	6.0	6.0	6.1	6.2	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4
ГУА	6.0	6.0	6.0	6.0	6.1	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
Вариант эксперимента	DOC					DN				
	Min	Q1	Med	Q3	Max	Min	Q1	Med	Q3	Max
К	241	266	280	285	288	13.9	14.7	15.7	17.4	20.2
NPK	87.9	88.0	90.3	101	128	158	198	228	263	313
CaCO ₃	123	126	143	165	186	127	160	189	223	272
ГТ3	99.4	107	110	111	115	207	209	223	247	277
ГТ300	98.8	103	106	107	109	324	327	334	341	344
ГТ3000	83.5	96.6	102	105	107	135	179	195	206	232
ГТА3000 + CaCO ₃	195	196	252	316	340	112	123	132	149	184
ГТМ3000	240	272	297	324	363	144	172	183	186	186
ГТА3000	252	282	302	332	395.4	175	181	189	195	197
ГУ	131	138	144	149	153	137	154	179	219	280
ГУА + CaCO ₃	220	304	349	367	368	104	114	126	136	142
ГУМ	259	279	286	302	344	126	134	143	157	178
ГУА	260	280	299	320	345	124	130	132	142	173

То же относится и к общему содержанию углерода – внесению угольного гумата соответствует обогащение почвы пустоши углеродом на предполагаемые при постановке эксперимента 0.5 %. Кажущиеся различия в содержании водорастворимого углерода по всей видимости связаны с исходной неоднородностью, обуславливавшей разницу в pH и ТС в вариантах К и NPK (разница в 0.2–0.3 единицы и процента соответственно). Относительно этих контрольных вариантов для двух экспериментальных серий значимых изменений с внесением карбоната кальция и органических добавок в содержании DOC отметить нельзя. Кроме того, к сожалению, в данной работе нельзя признать содержание водорастворимого углерода информативным показателем: корреляции с почвенными свойствами, в частности, с содержанием водорастворимых форм ТМ, не соответствуют ожидаемым зависимостям и не согласуются с литературными данными. Предполагается, что растворенное органическое вещество напрямую связано с подвижностью биологически доступных форм ТМ ([Добровольский, 1997](#); [Yin et al., 2002](#)), чего нам отметить не удалось. В то же время логичны различия в содержании растворимого азота в почвах после эксперимента: максимум и минимум содержания совпадает с высокими и низкими содержаниями Ni и Cu в аналогичных вариантах и, вероятно, свидетельствует о его низком потреблении.

Деградированные почвы пустоши характеризуются сильным загрязнением Ni и Cu (рис. 1). Поскольку достоверных различий между содержанием водорастворимых соединений металлов в контрольном варианте и варианте с NPK нет, для удобства восприятия на рисунках 1 и 2 они объединены в один вариант – К*. Аналогичным образом объединены варианты с инокуляцией – И – торфяного (ГТИ3000) и угольного (ГУИ) гуматов микроорганизмами.

Содержание водорастворимых соединений Ni и Cu в контрольном варианте достигает 4–5 мг/кг и 10–12 мг/кг, что превышает ПДК подвижных соединений металлов даже с учетом привязки норматива (ГН 2.1.7.2041-06) к более реакционноспособному ацетатно-аммонийному буферу. Внесение торфяного гумата не влечет за собой стабилизации водорастворимых соединений Ni и Cu либо наблюдается их относительная мобилизация. Выбранной

концентрации угольного гумата достаточно для снижения концентраций ТМ в водной вытяжке в 4–10 раз. Можно было бы ожидать, что сочетание органических добавок с карбонатом кальция усилит их стабилизирующий эффект, однако, если это верно для торфяного гумата, для угольного гумата значимых различий в сравнении с чистым препаратом не наблюдается.

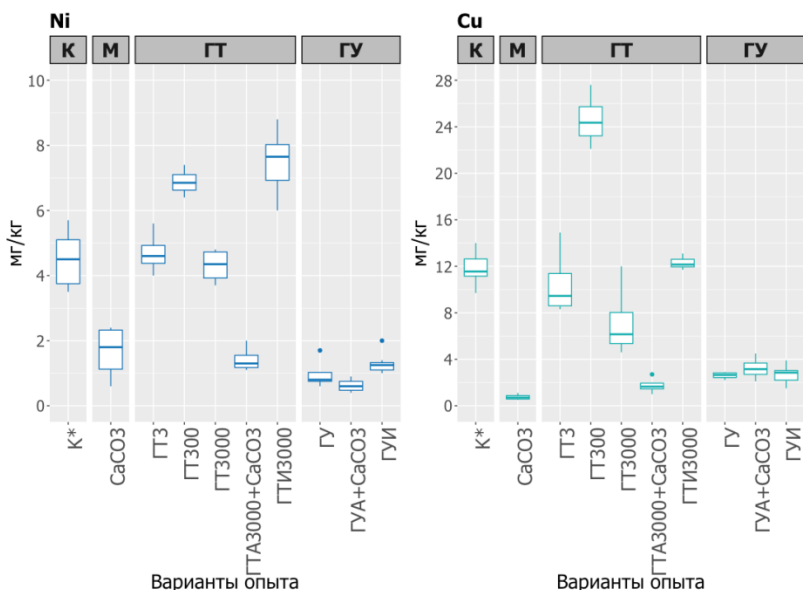


Рис. 1. Содержание водорастворимых соединений Ni и Cu в почве в конце экспериментов. Здесь и далее: К – контроль, М – с минеральными добавками, ГТ – с торфяным гуматом, ГУ – с угольным гуматом. На графиках “box-plot with whiskers” изображены общий, межквартильный размах (первый и третий квартиль) и медиана, число повторностей равно четырем.

Fig. 1. Content of water-soluble Ni and Cu in soils in the end of experiments. Hereinafter K – control, M – with mineral ameliorants, GT – with peat humate, GU – with coal humate. On graphs “box-plot with whiskers” – range, interquartile range (between 1st and 3rd quartiles), median with number of replicants is 4.

В то же время в литературе отмечается постепенное снижение эффекта стабилизации карбонатом кальция, равно как и известью, биологически доступных форм ТМ с течением времени

([Копчик и др., 2016](#)), поэтому дополнительное сочетание препаратов может быть целесообразным. Содержание водорастворимых форм железа слабо меняется в вариантах эксперимента, тогда как для алюминия наблюдается схожий с медью тренд увеличения подвижности в варианте с торфяным гуматом ГТ300.

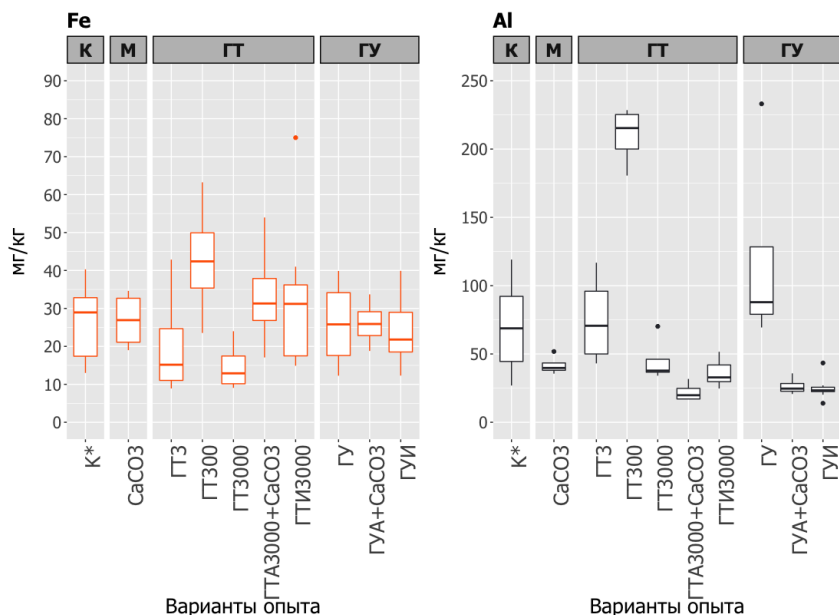


Рис. 2. Содержание водорастворимых соединений Fe и Al в почве в конце экспериментов.

Fig. 2. Content of water-soluble Fe and Al in soils in the end of experiments.

Биологический отклик. Микробная биомасса в контрольном варианте эксперимента составила порядка 150 мг/кг в среднем в пересчете на углерод (рис. 3). Ее увеличение наблюдается в вариантах с угольным гуматом, и тенденция к увеличению прослеживается всюду, куда вносился карбонат кальция. Это наблюдение согласуется с эмиссией диоксида углерода почвами в течение экспериментов (рис. 4).

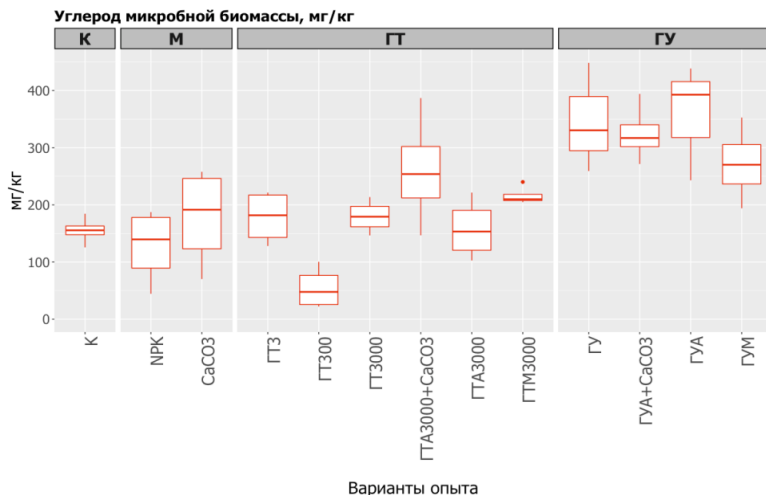


Рис. 3. Содержание углерода микробной биомассы в почве в конце экспериментов.

Fig. 3. Content of microbial biomass carbon in soils the end of experiments.

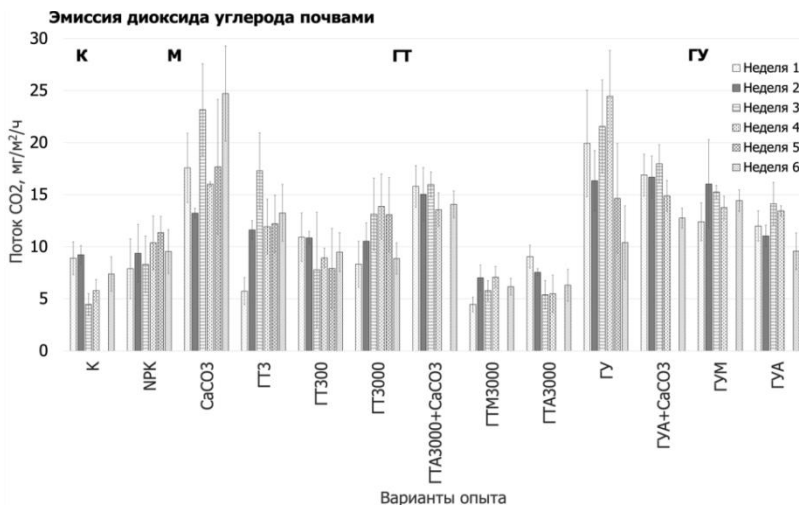


Рис. 4. Динамика почвенного дыхания в течение шести недель экспериментов.

Fig. 4. Soil respiration dynamics during 6 weeks of experiments.

Контрольные значения почвенного дыхания являются экстремально низкими, и, даже при его относительно увеличении в

вариантах с внесением карбоната кальция и угольного гумата, уровень дыхания соответствует скорости эмиссии CO_2 из загрязненных почв техногенных пустошей ([Кадулин, Копчик, 2013](#)).

Отклик микробного сообщества на торфянный гумат не отмечен в рамках экспериментов – содержание углерода микробной биомассы, равно как и скорость эмиссии CO_2 , значительно не отличаются от контрольных вариантов, за исключением заметного обеднения C_{mic} в варианте ГТ300, обусловленного, вероятно, относительным увеличением подвижности ТМ.

В целом между содержанием углерода микробной биомассы и водорастворимых соединений Ni и Cu отмечается обратная связь (коэффициенты корреляции Спирмена – 0.67 и – 0.58).

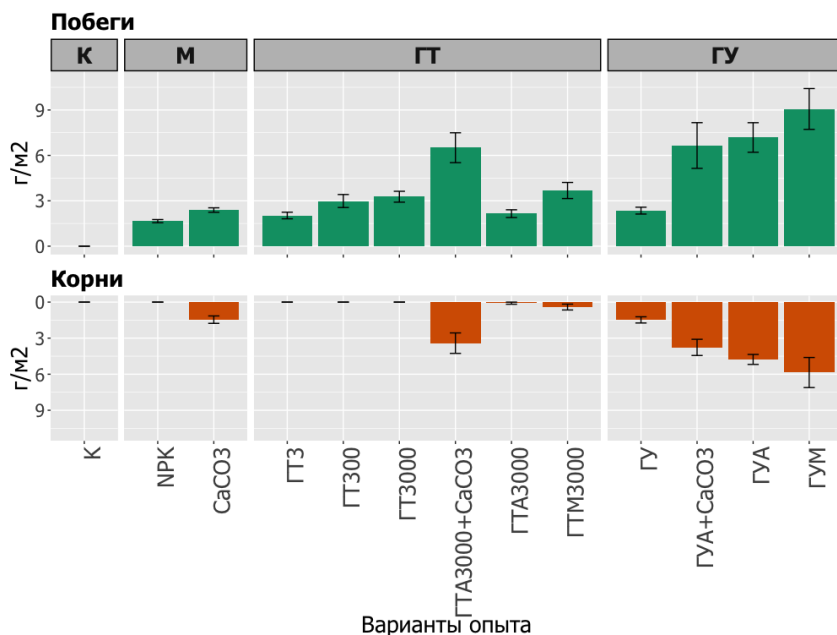


Рис. 5. Фитомасса тест-культуры, щучки дернистой, в конце экспериментов (средние и стандартные отклонения).

Fig. 5. Test-culture (*Deschampsia cespitosa*) phytomass in the end of experiments (means and standart errors).

Как видно на рисунке 5, для произрастания тест-культуры наиболее благоприятным является воздействие угольного гумата в

Бюллетень Почвенного института им. В.В. Докучаева. 2019. Вып. 97.
Dokuchaev Soil Bulletin, 2019, 97

концентрации 0.5 % и CaCO_3 без внесения дополнительного органического вещества, так как в этих вариантах развивались и побеги, и корни.

При этом, по всей видимости, росту надземной массы тест-культуры торфяной гумат способствует так же, как и угольный. Обратная зависимость между интенсивностью прорастания и содержанием водорастворимых Ni и Cu в почве выше для корней (коэффициенты корреляции – 0.75 и – 0.71), чем для побегов щучки (коэффициенты корреляции – 0.45 и – 0.41) соответственно, что может косвенно указывать на отмечающиеся в литературе протекторные функции корней, с одной стороны, и гуминовых препаратов, с другой ([Куликова, 2008](#); [Farouk et al., 2011](#)). Отметим также разницу во влиянии азотфиксаторов и микоризообразователей на рост и развитие надземной и подземной фитомассы внутри вариантов с ГТ и ГУ. Для угольного гумата характерно наличие положительного эффекта от сочетания с микоризообразователями и азотфиксаторами, в то время как для торфяного гумата его не наблюдается.

ВЫВОДЫ

Внесение торфяных гуматов калия без дополнительных стабилизирующих агентов – в данном случае, карбоната кальция – не способствует снижению подвижности ТМ, активизации почвенной микробиоты и обогащению почвы водорастворимыми соединениями углерода. Эффект от инокуляции биопрепаратами не отмечен. Угольные гуматы уменьшают подвижность ТМ, способствуют активизации почвенной микробиоты и положительно влияют на рост тест-культуры. Наблюдается эффект от кооперации с микоризообразователями – улучшение развития корневой системы тест-культуры. Применение угольных гуматов в описанных условиях не требует сочетания с дополнительными добавками.

Согласно нашим расчетам, стоимость гуминовых препаратов (в концентрации 0.5 % к массе почвы) и NPK для внесения в верхний (0–10 см), наиболее загрязненный слой маломощных подзолов / абраземов техногенных пустошей составляет 15–23 тыс. га. Это в среднем на порядок меньше затрат на промывание-экстракцию и в 5–20 раз меньше затрат на выемку и отсыпку за-

Бюллетень Почвенного института им. В.В. Докучаева. 2019. Вып. 97.
Dokuchaev Soil Bulletin, 2019, 97

грязненного слоя, приводимых в литературных источниках ([Копцик, 2014](#)). Таким образом, применение гуминовых препаратов может представлять экологически благоприятный и экономически приемлемый способ стабилизации загрязненных почв на ограниченных территориях техногенных пустошей.

В заключение отметим, что для понимания механизмов стабилизации биологически доступных форм ТМ необходимо проведение дополнительных экспериментальных исследований с последующим изучением структурно-функциональных характеристик вносимого органического вещества. Полученные в ходе таких экспериментов зависимости могут быть важным шагом к прогнозированию восстановления глубоко нарушенных экосистем.

БЛАГОДАРНОСТЬ

Исследования выполнены при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-04-01028.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Герасимова М.И., Строганова М.Н., Можарова Н.В., Прокофьева Т.В. Антропогенные почвы: генезис, география, рекультивация. Смоленск: Ойкумена, 2003. 268 с.
2. Водяницкий Ю.Н., Ладонин Д.В., Савичев А.Т. Загрязнение почв тяжелыми металлами. М.: Изд-во Почвенного института им. В.В. Докучаева, 2012. 306 с.
3. Гигиенические нормативы ГН 2.1.7.2041-06. Предельно допустимые концентрации (ПДК) химических веществ в почве.
4. Орлов Д.С. Гуминовые вещества в биосфере. М.: Наука, 1993. 238 с.
5. Добровольский В.В. Биосферные циклы тяжелых металлов и регуляторная роль почвы // Почвоведение. 1997. № 4. С. 431–441.
6. Исаченко Т.И., Лавренко Е.М. Ботанико-географическое районирование // Растительность Европейской части СССР. Л.: Наука, 1980. 236 с.
7. Кадулин М.С., Копцик Г.Н. Эмиссия CO₂ почвами в зоне влияния ГМК Североникель в Кольской субарктике // Почвоведение. 2013. № 11. С. 1387–1396. DOI: [10.1134/S1064229313110045](https://doi.org/10.1134/S1064229313110045).
8. Кацулина Г.М. Аэротехногенная трансформация почв Европейского Субарктического региона. Апатиты: КНЦ РАН, 2002. Ч. 1. 158 с.

Бюллетень Почвенного института им. В.В. Докучаева. 2019. Вып. 97.
Dokuchaev Soil Bulletin, 2019, 97

9. *Копчик Г.Н.* Современные подходы к ремедиации почв, загрязненных тяжелыми металлами (обзор литературы) // Почвоведение. 2014. № 7. С. 851–868. DOI: [10.1134/S1064229314070072](https://doi.org/10.1134/S1064229314070072).
10. *Копчик Г.Н., Копчик С.В., Смирнова И.Е.* Альтернативные технологии ремедиации техногенных пустошей в Кольской Субарктике // Почвоведение. 2016. № 11. С. 1375–1391. DOI: [10.7868/S0032180X16090082](https://doi.org/10.7868/S0032180X16090082).
11. *Куликова Н.А.* Защитное действие гуминовых веществ по отношению к растениям в водной и почвенной средах в условиях абиотических стрессов. Дисс. ... докт. биол. наук. М.: МГУ, 2008.
12. *Соколова Т.А., Трофимов С.Я.* Сорбционные свойства почв. Адсорбция. Катионный обмен: учебное пособие по некоторым главам химии почв. Тула: Гриф и К, 2009. 172с.
13. *Степанов А.А., Якименко О.С.* Ремедиация загрязненных городских почв с применением гуминовых препаратов // Научное электронное периодическое издание ЮФУ “Живые и биокосные системы”. 2016. № 18. URL: <http://www.jbks.ru/archive/issue-18/article-5/>.
14. *Adriano D.C.* Trace elements in the Terrestrial Environment. New York: Springer, 2001. 867 p.
15. *Borůvka L., Drábek O.* Heavy metal distribution between fractions of humic substances in heavily polluted soils // Plant Soil Environ. 2004. Vol. 50. No. 8. P. 339–345. DOI: [10.17221/4041-PSE](https://doi.org/10.17221/4041-PSE).
16. *Farouk S., Mosa A.A., Taha A.A., Ibrahim Heba M., EL-Gahmery A.M.* Protective effect of humic acid and chitosan on radish (*Raphanus sativus*, L. var. *sativus*) plants subjected to cadmium stress // Journal of Stress Physiology & Biochemistry. 2011. Vol. 7(2). P. 99–116.
17. *Halim M., Conte P., Piccolo A.* Potential availability of heavy metals to phytoextraction from contaminated soils induced by exogenous humic substances // Chemosphere. 2003. Vol. 52. P. 265–275. DOI: [10.1016/S0045-6535\(03\)00185-1](https://doi.org/10.1016/S0045-6535(03)00185-1).
18. *Janoš P., Vávrová J., Herzogová L., Pilařová V.* Effects of inorganic and organic amendments on the mobility (leachability) of heavy metals in contaminated soil: a sequential extraction study // Geoderma. 2010. Vol. 159. Issues (3–4). P. 335–341. DOI: [10.1016/j.geoderma.2010.08.009](https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2010.08.009).
19. *McBride N.M.* Reactions controlling heavy metal solubility in soils // Adv. Soil Sci. 1989. No. 10. P. 1–56.
20. *Panagos P., Van Liedekerke M., Yigini Y., Montanarella L.* Contaminated sites in Europe: review of the current situation based on data collected through a European network. J Environ Public Health, 2013. DOI: [10.1155/2013/158764](https://doi.org/10.1155/2013/158764).

Бюллетень Почвенного института им. В.В. Докучаева. 2019. Вып. 97.
Dokuchaev Soil Bulletin, 2019, 97

21. *Park J.H., Lamb D., Paneerselvam P., Choppala G., Bolan N., Chung J.W.* Role of organic amendments on enhanced bioremediation of heavy metal (loid) contaminated soils // *Journal of Hazardous Materials*. 2011. Vol. 185. No. 2. P. 549–574. DOI: [10.1016/j.jhazmat.2010.09.082](https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2010.09.082).

22. *Perminova I., Hatfield K., Hertkorn N.* Use of humic substances to remediate polluted environments: from theory to practice. Van Godewijck-Straat 30. Dordrecht. Netherlands. 2005. 506 p.

23. *Pukalchik M., Mercl, F., Terekhova V., Tlustoš P.* Biochar, wood ash and humic substances mitigating trace elements stress in contaminated sandy loam soil: Evidence from an integrative approach // *Chemosphere*. 2018. Vol. 203. P. 228–238. DOI: [10.1016/j.chemosphere.2018.03.181](https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.03.181).

24. *Tóth G., Hermann T., Da Silva M.R., Montanarella L.* Heavy metals in agricultural soils of the European Union with implications for food safety // *Environment international*. 2016. Vol. 88. P. 299–309. DOI: [10.1016/j.envint.2015.12.017](https://doi.org/10.1016/j.envint.2015.12.017).

25. *Trevisan S., Francioso O., Quaggiotti S., Nardi S.* Humic substances biological activity at the plant-soil interface // *Plant Signaling Behav.* 2010. Vol. 5. P. 635–643. DOI: [10.4161/psb.5.6.11211](https://doi.org/10.4161/psb.5.6.11211).

26. *Tyler G., Olsson T.* Concentrations of 60 elements in the soil solution as related to the soil acidity // *European Journal of Soil Science*. 2001. Vol. 52(1). P. 151–165. DOI: [10.1046/j.1365-2389.2001.t01-1-00360.x](https://doi.org/10.1046/j.1365-2389.2001.t01-1-00360.x).

27. *Vance E., Brookes P., Jenkinson D.* An extraction method for measuring soil microbial biomass C // *Soil Biol Biochemistry*. 1987. Vol. 19. P. 703–707. DOI: [10.1016/0038-0717\(87\)90052-6](https://doi.org/10.1016/0038-0717(87)90052-6).

28. *Yin Y., Impellitteri C.A., You S.J., Allen H.E.* The importance of organic matter distribution and extract soil: solution ratio on the desorption of heavy metals from soils // *Science of the Total Environment*. 2002. Vol. 287 (1–2). P. 107–119. DOI: [10.1016/S0048-9697\(01\)01000](https://doi.org/10.1016/S0048-9697(01)01000).

INFLUENCE OF HUMIC PREPARATIONS ON DEGRADED SOILS PROPERTIES OF TECHNOGENIC BARRENS

P. N. Tregubova^{1,2*}, G. N. Koptsik^{1}, A. L. Stepanov¹,
A. A. Stepanov¹, M. Yu. Korneicheva¹, Yu. V. Kupriianova¹**

¹*Lomonosov Moscow State University,
Russia, 119991, Moscow, Leninskie Gory, 1-12*

²*Skolkovo Institute of Science and Technology,
Russia, 121205, Moscow, Moscow Region, Nobelya str., 3.*

Received 25.12.2018, Revised 29.04.2019, Accepted 28.05.2019

This research aim was testing the applicability of exogenic organic matter – extracted humic substances – for the remediation of technogenic barren soils near Cu-Ni smelter (Kola Peninsula). In short-term laboratory experiments we studied the possibility of stabilization of heavy metals labile forms by commercial humic substances (HS) of different origin (peat humate “Flexom” and coal humate “Extra”) in comparison with HS, inoculated by microorganisms – nitrogen fixers and mycorrhizae-forming fungi and mineral fertilizers (NPK и CaCO₃). Experiments were provided during 45 days after 14 days of pre-incubation under controlled conditions in climate chamber with light, temperature and humidity imitating the polar day conditions in Kola Subarctic. After experiments we evaluated changes in soil chemical properties, soil microbial community and test-culture (*Deschampsia cespitosa*). Peat humate application is ineffective without additional manipulations (e.g. combination with CaCO₃), cooperation with biological applicants cannot be pointed out. Application of coal humate favours to metals stabilization, soil microorganism’s activation, test-culture growth. It may be effective to combine coal humate with biological applicants like mycorrhizae-forming fungi. So, coal-humates may be perspective growth-stimulator, ameliorant and detoxicant in remediation of degraded soils in conditions of polymetallic contamination.

Keywords: technogenic barren soil, remediation, humates, heavy metals, organic matter, soil acidity.

REFERENCES

1. Gerasimova M.I., Stroganova M.N., Mozharova N.V., Prokof'eva T.V., *Antropogennyye pochvy: genezis, geografiya, rekul'tivatsiya* (Anthropogenic soils: genesis, geography, recultivation. Study book), Smolensk: Oikumena, 2003, 268 p.
2. Vodyanitskii Yu.N., Ladonin D.V., Savichev A.T., *Zagryaznenie pochv tyazhelymi metallami* (Contamination of soils by heavy metals), Moscow: Izd-vo Pochvennogo instituta im. V.V. Dokuchaeva, 2012, 306 p.
3. *GN 2.1.7.2041-06* (Hygienic standards of the Russian Federation).
4. Orlov D.S., *Guminovye veshchestva v biosfere* (Humic substances in biosphere), Moscow: Nauka, 1993, 238 p.
5. Dobrovol'skii V.V., *Biosfernye tsikly tyazhelykh metallov i regul'yatornaya rol' pochvy* (Cycles of heavy metals and soil regulation function in biosphere), *Pochvovedenie*, 1997, No. 4, 431–441 pp.

Бюллетень Почвенного института им. В.В. Докучаева. 2019. Вып. 97.
Dokuchaev Soil Bulletin, 2019, 97

6. Isachenko T.I., Lavrenko E.M., Botaniko-geograficheskoe rayonirovaniye (Botanical-geographic zoning), In: *Rastitelnost Evropeyskoy chasti SSSR* (Plants of European part of USSR), Leningrad: Nauka, 1980, 236 p.
7. Kadulin M. S., Koptsik G. N., Emissiya CO₂ pochvami v zone vliyaniya GMK Severonikel' v Kol'skoi subarktike (Emission of CO₂ by soils in the impact zone of the Severonikel smelter in the Kola subarctic region), *Eurasian Soil Science*, 2013, Vol. 46, No. 11, 1107–1116 pp., DOI: [10.1134/S1064229313110045](https://doi.org/10.1134/S1064229313110045).
8. Kashulina G.M., *Aerotehnogennaya transformatsiya pochv Evropeiskogo Subarkticheskogo regiona* (Aerotechnogenic transformation of soils of European Subarctic Region), Apatity: KNTs RAN, 2002, Chapter 1, 158 p.
9. Koptsik G.N. Sovremennye podkhody k remediatsii pochv, zagryaznennykh tyazhelymi metallami (Modern approaches to remediation of soils polluted by heavy metals), *Eurasian Soil Science*, 2014, Vol. 47, No. , 707–722 pp., DOI: [10.1134/S1064229314070072](https://doi.org/10.1134/S1064229314070072).
10. Koptsik G.N., Koptsik S.V., Smirnova I.E., Al'ternativnye tekhnologii remediatsii tekhnogennykh pustoshei v Kol'skoi Subarktike (Alternative technologies for remediation of technogenic barren lands in the Kola Subarctic zone), *Eurasian Soil Science*, 2016, Vol. 49, No. 11, 1294–1309 pp., DOI: [10.1134/S1064229316090088](https://doi.org/10.1134/S1064229316090088).
11. Kulikova N.A., *Zashchitnoe deistvie guminovykh veshchestv po otnosheniyu k rasteniyam v vodnoi i pochvennoi sredakh v usloviyakh abioticheskikh stressov: Diss. ... dokt. biol. nauk* (Protection properties of humic substances to plants in aquatic and soil media under the conditions of abiotic stress, Dr. biol. sci. thesis), Moscow: MGU, 2008.
12. Sokolova T.A., Trofimov S.Ya., *Sorbtsionnye svoystva pochv. Adsorbtsiya. Kationnyi obmen* (Soil sorption properties. Adsorption. Cation exchange), Tula: Grif i K, 2009, 172 p.
13. Stepanov A.A., Yakimenko O.S., Remediatsiya zagryaznennykh gorodskikh pochv s primeneniem guminovykh preparatov (Remediation of contaminated urban soils with application of humic substances), Nauchnoe elektronnoe periodicheskoe izdanie YuFU “Zhivye i biokosnye sistemy”, 2016, No. 18, URL: <http://www.jbks.ru/archive/issue-18/article-5/>.
14. Adriano D.C., *Trace elements in the Terrestrial Environment*, New York: Springer, 2001, 867 p.
15. Borůvka L., Drábek O., Heavy metal distribution between fractions of humic substances in heavily polluted soils, *Plant Soil Environ.*, 2004, Vol. 50, No. 8, 339–345 pp., DOI: [10.17221/4041-PSE](https://doi.org/10.17221/4041-PSE).
16. Farouk S., Mosa A.A., Taha A.A., Ibrahim Heba M., EL-Gahmery A.M., Protective effect of humic acid and chitosan on radish (*Raphanus sativus*, L.

Бюллетень Почвенного института им. В.В. Докучаева. 2019. Вып. 97.
Dokuchaev Soil Bulletin, 2019, 97

var. sativus) plants subjected to cadmium stress, *J. stress physiol. biochem*, 2011, Vol. 7(2), 99–116 pp.

17. Halim M., Conte P., Piccolo A., Potential availability of heavy metals to phytoextraction from contaminated soils induced by exogenous humic substances, *Chemosphere*, 2003, Vol. 52, 265–275 pp., DOI: [10.1016/S0045-6535\(03\)00185-1](https://doi.org/10.1016/S0045-6535(03)00185-1).

18. Janoš P., Vávrová J., Herzogová L., Pilařová V., Effects of inorganic and organic amendments on the mobility (leachability) of heavy metals in contaminated soil: a sequential extraction study, *Geoderma*, 2010, Vol. 159, Issues (3–4), 335–341 pp., DOI: [10.1016/j.geoderma.2010.08.009](https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2010.08.009).

19. McBride N.M., Reactions controlling heavy metal solubility in soils, *Adv. Soil Sci.*, 1989, No. 10, 1–56 pp.

20. Panagos P., Van Liedekerke M., Yigini Y., Montanarella L., Contaminated sites in Europe: review of the current situation based on data collected through a European network, *Journal of Environmental and Public Health*, 2013, DOI: [10.1155/2013/158764](https://doi.org/10.1155/2013/158764).

21. Park J.H., Lamb D., Paneerselvam P., Choppala G., Bolan N., Chung J.W., Role of organic amendments on enhanced bioremediation of heavy metal(loid) contaminated soils, *Journal of Hazardous Materials*, 2011, Vol. 185, No. 2, 549–574 pp., DOI: [10.1016/j.jhazmat.2010.09.082](https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2010.09.082).

22. Perminova I., Hatfield K., Hertkorn N., *Use of humic substances to remediate polluted environments: From theory to practice*, Netherlands, Dordrecht: Springer, 2005, 506 p.

23. Pukalchik M., Mercl F., Terekhova V., Tlustoš P., Biochar, wood ash and humic substances mitigating trace elements stress in contaminated sandy loam soil: Evidence from an integrative approach, *Chemosphere*, 2018, Vol. 203, 228–238 pp., DOI: [10.1016/j.chemosphere.2018.03.181](https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.03.181).

24. Tóth G., Hermann T., Da Silva M.R., Montanarella L., Heavy metals in agricultural soils of the European Union with implications for food safety, *Environment international*, 2016, Vol. 88, 299–309 pp., DOI: [10.1016/j.envint.2015.12.017](https://doi.org/10.1016/j.envint.2015.12.017).

25. Trevisan S., Francioso O., Quaggiotti S., Nardi S., Humic substances biological activity at the plant-soil interface, *Plant Signaling Behav.*, 2010, Vol. 5, 635–643 pp., DOI: [10.4161/psb.5.6.11211](https://doi.org/10.4161/psb.5.6.11211).

26. Tyler G., Olsson T., Concentrations of 60 elements in the soil solution as related to the soil acidity, *European Journal of Soil Science*, 2001, Vol. 52(1), 151–165 pp., DOI: [10.1046/j.1365-2389.2001.t01-1-00360.x](https://doi.org/10.1046/j.1365-2389.2001.t01-1-00360.x).

27. Vance E., Brookes P., Jenkinson D., An extraction method for measuring soil microbial biomass C, *Soil Biol. Biochem.*, 1987, Vol. 19, 703–707 pp., DOI: [10.1016/0038-0717\(87\)90052-6](https://doi.org/10.1016/0038-0717(87)90052-6).

Бюллетень Почвенного института им. В.В. Докучаева. 2019. Вып. 97.
Dokuchaev Soil Bulletin, 2019, 97

28. Yin Y., Impellitteri C.A., You S.J., Allen H.E., The importance of organic matter distribution and extract soil: solution ratio on the desorption of heavy metals from soils, *Science of the Total Environment*, 2002, Vol. 287(1–2), 107–119 pp., DOI: [10.1016/S0048-9697\(01\)01000](https://doi.org/10.1016/S0048-9697(01)01000).

Ссылки для цитирования:

Трегубова П.Н., Копчик Г.Н., Степанов А.Л., Степанов А.А., Корнеечева М.Ю., Куприянова Ю.В. Влияние гуминовых препаратов на свойства деградированных почв техногенных пустошей // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2019. Вып. 97. С. 129-149. DOI: 10.19047/0136-1694-2019-97-129-149

For citation:

Tregubova P.N., Koptsik G.N., Stepanov A.L., Stepanov A.A., Korneecheva M.Yu., Kupriianova Yu.V. Influence of humic preparations on degraded soils properties of technogenic barrens, *Dokuchaev Soil Bulletin*, 2019, V. 97, pp. 129-149, DOI: 10.19047/0136-1694-2019-97-129-149

ПАРАМЕТРЫ МОДЕЛЕЙ ВЕРТИКАЛЬНОЙ МИГРАЦИИ В ПОЧВАХ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ В ОКРЕСТНОСТИ ЗАВОДА ПО ПРОИЗВОДСТВУ СВИНЦА И СУРЬМЫ

© 2019 г. А. С. Фрид*, Т. И. Борисочкина

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

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

**<https://orcid.org/0000-0003-0474-8019>, e-mail: asfrid@mail.ru*

Поступила в редакцию 04.02.2019, принята к публикации 28.05.2019

В статье приводится анализ данных (Yuan et al., 2017) по профильным распределениям в почвах тяжелых металлов в провинции Гуанси на юге Китая в зоне влияния завода по производству свинца и сурьмы. Почва – сильногумусированная дерново-карбонатная. Оценены усредненные по годам и глубине (“кажущиеся”) параметры моделей миграции (диффузионной и конвективно-диффузионной) в районе комбинированного загрязнения почв (только аэрогенного и в сочетании с заливом сточными водами завода). Большие значения диффузионных параметров получены для Zn и Cd ($n \cdot 10^{-7}$ см²/с), меньшие – для Pb и Sb ($n \cdot 10^{-8}$ см²/с). В случае залива почв сточными водами отмечена достоверная конвективная составляющая миграции для Zn и Sb, при этом пик концентрации цинка переместился на глубину 40–60 см. В то же время в данных условиях не было ожидаемой четкой обратной корреляции между миграционной подвижностью и величиной сорбции элементов почвой.

Ключевые слова: дерново-карбонатная почва, тяжелые металлы, вертикальная миграция в почвах, модели миграции и их параметры, южный Китай.

DOI: 10.19047/0136-1694-2019-97-150-164

ВВЕДЕНИЕ

Настоящая работа продолжает серию аналогичных исследований по анализу экспериментальных данных, полученных в разных регионах мира, по вертикальной миграции в почвах тяжелых металлов и других элементов в местах интенсивного загрязнения (Фрид, Борисочкина, 2011; Frid, 2016; Фрид и др., 2016; Фрид, Борисочкина, 2018 а, б, в, г). Подобные экспериментальные данные немногочисленны, а их анализ с помощью математических моде-

Бюллетень Почвенного института им. В.В. Докучаева. 2019. Вып. 97.
Dokuchaev Soil Bulletin, 2019, 97

лей миграции практически не проводился, в отличие от аналогичных данных для радионуклидов при радиационных авариях и для глобальных выпадений ([Прохоров, 1981](#); [Фрид, 1999](#)).

Актуальность вопроса связана с оценкой прогноза глубины загрязнения различных почв разными элементами при разных источниках загрязнения. Обратная сторона вопроса – оценка скорости самоочищения верхнего слоя почв, со степенью загрязнения которого обычно связаны все экологические характеристики.

Цель работы – оценить параметры математических моделей вертикальной миграции Pb, Sb, Cd, Zn в почвах при загрязнении аэрогенными выбросами и при последующем заливе сточными водами металлургического завода. Отметим, что параметры моделей миграции характеризуют миграционную подвижность веществ в отличие от химической подвижности, которую определяют по содержанию фракций, выделяемых из почв различными реагентами.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Описание объектов дается по первоисточнику ([Yuan et al., 2017](#)). Завод по производству свинца и сурьмы был расположен на юге Китайской народной республики – северо-запад провинции Guangxi в пригороде Hechi City. Начало производства – 1992 г., перерабатывались руды: стибнит (Sb_2S_3), антимонит (FeSb_2S_4), плаглонит ($\text{Pb}_5\text{Sb}_8\text{S}_{17}$). Сточные воды завода имели высокое содержание тяжелых металлов. В 2008 г. произошло затопление части окружающей завод территории этими сточными водами, и завод прекратил работу.

Образцы почв отбирали примерно в 2014 г., то есть через 6 лет после закрытия завода. Отбирали на трех площадках: А) разово затопленная сточными водами ложбина; В) незатопленное подножие соседнего холма; С) контрольная площадка в 8.4 км от завода.

Почва – сильногумусированная дерново-карбонатная (terra fusca). Климат – гумидный субтропический, средняя годовая температура 20.4°C, годовые осадки – 1470 мм, преобладают юго-западные ветры.

Более подробно авторами работы были проанализированы образцы почв верхнего слоя (0–10 см) – таблицы 1 и 2. Валовые содержания загрязняющих элементов в почвах определяли после разложения образцов $\text{HNO}_3 + \text{HF}$ (конечное определение на ICP-MS); валовые содержания макроэлементов – рентгенфлуоресцентным методом. По глубине почв образцы отбирали из слоев по 10–20 см, в них определяли валовые содержания Pb, Sb, As, Zn, Cu, Cd, их концентрации в поровых растворах и коэффициенты распределения Kd (отношение валовой концентрации к концентрации в поровом растворе). К сожалению, профильные данные авторы работы ([Yuan et al., 2017](#)) привели на графиках в логарифмической шкале концентраций.

Таблица 1. Состав и свойства верхнего слоя почв (среднее и стандартное отклонение)

Table 1. Composition and properties of the upper soil layer (mean and standard deviation)

Показатель	Место отбора образцов, в скобках – число повторных образцов			
	A (10)	B (8)	C (3)	Верхняя часть континентальной коры *
pH _{H2O}	5.86 ± 0.58	6.03 ± 0.50	7.05 ± 0.19	-
Органическое вещество, %	2.96 ± 0.30	1.05 ± 0.42	1.77 ± 0.16	-
Валовое содержание макроэлементов, %				
Al ₂ O ₃	11.0 ± 2.3	10.5 ± 2.8	10.7 ± 2.1	14.9
Fe ₂ O ₃	4.90 ± 0.94	5.0 ± 1.3	5.18 ± 0.69	4.68
CaO	1.04 ± 0.66	0.89 ± 0.60	0.88 ± 0.17	3.55
Mn	0.18 ± 0.02	0.15 ± 0.04	0.09 ± 0.03	-
Ti	0.72 ± 0.20	0.69 ± 0.09	0.40 ± 0.05	-
MgO	0.51 ± 0.16	0.48 ± 0.19	0.43 ± 0.11	2.46
Гранулометрический состав, %				
глина (ил)	21.3 ± 4.1	19.8 ± 3.4	17.9 ± 1.6	-
песок	76 ± 7.1	78 ± 4.3	81 ± 3.2	66.3
пыль	2.8 ± 1.3	2.2 ± 2.3	1.02 ± 0.68	-

Примечание. Прочерк (-) означает отсутствие данных, звездочка (*) – данные из [Condie, 1993](#).

Поэтому для наших расчетов данные пришлось снимать с графиков, что понизило точность этих данных.

Таблица 2. Содержание загрязняющих элементов (мг/кг) в верхнем слое почвы (среднее и стандартное отклонение)

Table 2. Contaminants content (mg/kg) in the upper soil layer (mean and standard deviation)

Элемент	Место отбора образцов, в скобках – число повторных образцов					
	А (10)	В (8)	С (3)	сточные воды (8)	пыль из труб (9)	провинциальный фон
Sb	3100 ± 1600	290 ± 170	21	13300 ± 6500	15200 ± 9000	2.12
As	410 ± 260	32 ± 14	39	5200 ± 2200	4000 ± 1600	20
Pb	6400 ± 2900	440 ± 360	76	940 ± 320	2300 ± 1700	18.8
Zn	920 ± 420	290 ± 130	26	4800 ± 2000	1030 ± 590	46
Cu	192 ± 58	59 ± 38	10	580 ± 240	790 ± 360	21
Cd	34 ± 15	12 ± 6	2	47 ± 59	42 ± 31	0.062

Для математического анализа по моделям миграции использовали те профили концентрации загрязняющих элементов, где имели место заметные градиенты по глубине на протяжении нескольких слоев. Полученная таким образом информация (с графиков) представлена в таблице 3.

Таблица 3. Валовые концентрации загрязняющих элементов по глубине почв (снято с графиков работы ([Yuan et al., 2017](#)), мг/кг

Table 3. Total contaminants content and distribution along the soil profile (taken from the charts of [Yuan et al., 2017](#)), mg/kg

Слой почвы, см	Место отбора образцов					
	(В) незатопленное подножие холма		(А) затопленная сточными водами ложбина			
	Cd	Zn	Pb	Sb	Cd	Zn
0–10	19	840	2 440	2 680	25	1 060
10–20	6.1	620	289	336	14	1 000
20–30	3.5	580	189	190	6.4	1 000
30–40	2.5	540	182	190	5.1	1 060
40–60	2.2	535	165		4.7	4 005
60–80	1.75	535	158		3.1	2 700
80–90	1.65	465	154		2.3	1 060

Использовали два типа моделей миграции с оценкой их параметров: диффузионную и конвективно-диффузионную. Принимали значения параметров постоянными по времени миграции и по глубине почвы, считая, что они отражают усреднение реальных колебаний разнообразных процессов, сопутствующих миграции. Такое допущение, с одной стороны, значительно упрощает математические модели и работу с ними, а с другой стороны, вполне оправдало себя в наших и других работах, представленных ранее. Соответствующие значения параметров называют “кажущимися”.

Время миграции до отбора образцов состояло из двух отрезков: первые 16 лет на поверхность почв участков А и В поступали аэрогенные выпадения от завода, последующие 6 лет выпадений не было, но участок А подвергся залповому затоплению сточными водами. Эти обстоятельства отразились в выборе граничных условий на поверхности почвы. Соответствующие точные решения дифференциальных уравнений миграции брали из публикаций ([Рыжинский и др., 1971](#); [Полянин и др., 1998](#); [Малкович, 1999](#)).

Процедура подбора параметров моделей была следующей. Сначала для каждого слоя почвы вычисляли возможный диапазон значений валовых концентраций в виде $\pm 15\%$ к указанным в таблице 3. Считали, что миграцию загрязняющих элементов оценивают именно валовые содержания, так как, с одной стороны, они при загрязнении часто значительно превышают фоновые, а, с другой стороны, фоновые валовые содержания при расчетах либо задаются, либо вычитаются. Отклонение в 15% превышает аналитические ошибки, указанные в [Yuan et al., 2017](#), – 10% , но частично учитывают наличие природного варьирования и ошибки при снятии данных с графиков. Далее при различных комбинациях значений параметров по конкретной модели рассчитывали значения концентраций до тех пор, пока они не войдут в заданный коридор ($\pm 15\%$) опытных значений. Наличие коридора позволяет одновременно оценить и возможный разброс значений параметров. Дополнительным контролем являлась близость измеренных значений содержаний в профиле (сверх фона) и рассчитанного по модели входа загрязняющего элемента. При выполнении этих условий модель и ее параметры принимались адекватными.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Из таблицы 2 следует, что верхний слой почвы на площадке А (с затоплением сточными водами) явно загрязнен всеми шестью элементами; на площадке В (без затопления) нет явного загрязнения только по As. Наличие загрязнения подтверждает и профильное рассмотрение (табл. 3). При этом видна особенность распределения по глубине Zn на площадке А – в отличие от других элементов, здесь максимальная концентрация расположена не на поверхности, а в районе слоя 40–60 см, что явно свидетельствует о конвективном переносе цинка при затоплении сточными водами.

В таблицах 4–6 приведены оцененные нами кажущиеся параметры моделей миграции, в таблице 7 – их сводка. На участке А (с затоплением) конвективный перенос вглубь почвы зафиксирован (кроме Zn) только для Sb, причем средняя скорость за 6 лет для Zn составила очень большую величину – около 10 см/год.

Таблица 4. Кажущиеся параметры диффузионной модели – участок В, окончание аэрогенных выпадений от завода после прекращения его 16-летней работы

Table 4. Apparent parameters of diffusion model – plot B, termination of aerogenic drop-out from the plant after cessation of its 16 year-long work

Фон, мг/кг	Поток на поверхность почвы в период работы завода (q), мг/(см ² ·с)	$D \cdot 10^8$, см ² /с	Найдено в профиле сверх фона, мг/см ²	Вошло в почву по модели, мг/см ²
Цинк				
500	35	40	7200	7020
Кадмий				
1.2	Полоса значений от (D = 6.8, q = 8) до (D = 11, q = 5); середина полосы – D = 8, q = 6.5		272	Для всей полосы – 274–278

Диффузионные параметры миграции (D и D_k) для всех элементов показали значительный разброс как между площадками А и В, так и между моделями (диффузионной и конвективно-диффузионной). Различия оценок между моделями для Pb и Sb объяснить затруднительно. В целом же можно отметить, что параметры диффузионной миграции Zn и Cd были выше, чем для Pb и Sb.

Таблица 5. Кажущиеся параметры моделей миграции – участок А, окончание аэрогенных выпадений от завода после прекращения его 16-летней работы и разового затопления сточными водами (Zn, Cd)

Table 5. Apparent parameters of diffusion model – plot A, termination of aerogenic drop-out from the plant after cessation of its 16 year-long work and one-time waste waters (containing Zn, Cd) flooding

Диффузионная модель, диффузия из слоя 0–10 см после затопления					
Фон, мг/кг	Начальная концентрация в слое 0–10 см, мг/кг	$D \cdot 10^8$, см ² /с	Найдено в профиле сверх фона, мг/см ²	Вошло в почву по модели, мг/см ²	
Цинк					
-	-	-	-	-	
Кадмий					
2.0	40–49	80–100	428–580	442	
Конвективно-диффузионная модель, импульсный источник в момент затопления					
Фон, мг/кг	Количество элемента в импульсе, мг/см ²	$D_k \cdot 10^8$, см ² /с	$V \cdot 10^8$, см/с	Найдено в профиле сверх фона, мг/см ²	Вошло в почву по модели, мг/см ²
Цинк					
1000	56 500–76 000	21–27	31.5–32.8	81 500–110 300	98 450
Кадмий					
2.0	300–530	40–95	-5 ... +2	428–580	412

Сравним найденные в данной работе оценки D (D_k) с полученными для других полевых условий. Для Zn и Cd они близки к значениям, найденным для карбонатных засоленных почв Египта, орошаемых природными (речными и артезианскими) водами ([Фрид и др., 2016](#)); для Pb – ближе всего к выщелоченной дерново-

карбонатной почве Вологодской области ([Фрид, Борисочкина, 2011](#)) и к одной из почв (Hapli-Udic Argosols) южного Китая ([Фрид, Борисочкина, 2018б](#)); для Sb есть пока лишь единичная оценка для сильновыщелоченной пиритными отходами карбонатной песчаной почвы ([Фрид, Борисочкина, 2018а](#)), которая ниже полученной в данной работе.

Таблица 6. Кажущиеся параметры моделей миграции – участок А, окончание аэрогенных выпадений от завода после прекращения его 16-летней работы и разового затопления сточными водами (Pb, Sb)

Table 6. Apparent parameters of diffusion model – plot A, termination of aerogenic drop-out from the plant after cessation of its 16 year-long work and one-time waste waters (containing Pb, Sb) flooding

Диффузионная модель, диффузия из слоя 0-10 см после затопления					
Фон, мг/кг	Начальная концентрация в слое 0–10 см, мг/кг	$D \cdot 10^8$, см ² /с	Найдено в профиле сверх фона, мг/см ²	Вошло в почву по модели, мг/см ²	
Свинец					
150	2 600–3 000	1.9–3.0	25 500	28 000	
Сурьма					
190	2 000–3 450	1.85–3.0	26 360	27 250	
Конвективно-диффузионная модель, импульсный источник в момент затопления					
Фон, мг/кг	Количество элемента в импульсе, мг/см ²	$D_k \cdot 10^8$, см ² /с	$V \cdot 10^8$, см/с	Найдено в профиле сверх фона, мг/см ²	Вошло в почву по модели, мг/см ²
Свинец					
150	18 000–30 000	8.5–9.7	-0.4 ... +0.8	25 500	24 310
Сурьма					
190	18 000–32 500	7–9	0.3–0.7	26 360	26 220

Свойства верхних слоев почв на площадках А и В довольно близки (табл. 1), кроме содержания органического вещества – последнего значительно больше на площадке А, с чем можно было бы связать большую диффузионную подвижность Cd и высокую

конвективную подвижность Zn.

Таблица 7. Сводная таблица найденных кажущихся миграционных параметров

Table 7. Summary table of the found apparent migration parameters

Элемент	Участок В	Участок А		
	$D \cdot 10^8$, см ² /с	$D \cdot 10^8$, см ² /с	$D_k \cdot 10^8$, см ² /с	$V \cdot 10^8$, см/с
Zn	40	-	21–27	31.5–32.8 (9.9–10.3 см/год)
Cd	8	80–100	40–95	-
Pb	-	1.9–3.0	8.5–9.7	-
Sb	-	1.85–3.0	7–9	0.3–0.7 (0.10–0.22 см/год)

Примечание. Для V приведены только значения, отличающиеся от нуля.

Однако здесь могут иметь место и другие обстоятельства, например, различие форм Zn и Cd в аэрогенных выпадениях и в сточных водах. Так что четкий ответ по имеющейся информации дать затруднительно.

Из механистических моделей миграции в пористых средах (Прохоров, 1981; Прохоров, Фрид, 1971; Рыжинский, Фрид, 1973) известно, что значения параметров моделей миграции D (D_k) и V зависят от сорбции мигрирующего вещества. В случае линейных изотерм и двухфазной среды, одна из которых является сорбирующей (жидкость и твердые частицы), можно упрощенно записать:

$$D = \frac{D_1(l_0/l_1)^2\Theta_1 + D_2(l_0/l_2)^2\Theta_2K}{\Theta_1 + \Theta_2K}, \quad V = (l_0/l_1)\Theta_1 V_1/K,$$

где D_1 и D_2 – коэффициенты диффузии в жидкой и твердой фазах (точнее, по поверхности твердой фазы), $(l_0/l_1)^2$ и $(l_0/l_2)^2$ – коэффициенты извилистости тех же фаз, Θ_1 и Θ_2 – объемные доли этих фаз в среде, K – объемный (безразмерный) коэффициент распределения между твердой и жидкой фазами ($K = K_d d_0$), K_d – обычный коэффициент распределения (мл/г), d_0 – удельная масса твердой фазы, V_1 – скорость потока веществ (например, воды), вызывающих конвективное перемещение изучаемого элемента.

Так как в данной работе имеем дело с сильносорбирующимися почвой элементами, то величиной Θ_1 в знаменателе выраже-

ния для D можно пренебречь, и тогда получим:

$$D = D_1(l_0/l_1)^2\theta_1/\theta_2K + D_2(l_0/l_2)^2.$$

Следовательно, и для D , и для V можно ожидать обратную их зависимость от коэффициента распределения.

В работе ([Yuan et al., 2017](#)) на рисунке 4 приведены значения K_d для разных элементов по глубине почв для площадки А. Значения K_d рассчитаны как отношения валовых содержаний элементов в почвенных образцах к их концентрациям в поровых растворах. Из рисунка видно, что для всех элементов величины K_d заметно возрастали от глубины 5 см к глубине 10 см, а глубже возрастающий тренд замедлялся. Наличие этого тренда противоречит нашему предположению о постоянстве среднегодовых параметров по глубине почвы, но не отменяет адекватность оценок моделей миграции по описанным выше критериям. Это противоречие может быть объяснено как низкой точностью расчета K_d , так и неизвестной предысторией изменений K_d за 22 года от начала загрязнения.

Тем не менее, представляет интерес сопоставить различия элементов по величинам K_d и миграционных параметров (табл. 7). Графики K_d по глубине расположены в следующем порядке: $Pb \gg Zn \geq Sb \gg Cd$. Как отмечалось выше, диффузионные параметры для Pb относятся к минимальным, а для Cd – к максимальным, что вполне соответствует ряду K_d . В то же время Zn и Sb имеют крайние по величинам диффузионные параметры, а по K_d – средние значения. Аналогичная ситуация для Zn и Sb по конвективному параметру V (табл. 7). Таким образом, при длительной миграции загрязняющих элементов в полевых условиях зависимость между параметрами моделей миграции вглубь почвы и показателем сорбции (при разовом его измерении) неоднозначна.

При сохранении или известном изменении граничных условий на поверхности данных почв модели миграции с найденными оценками параметров могут быть использованы для прогнозов профильного загрязнения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Оценены усредненные по годам и глубине (“кажущиеся”) параметры моделей миграции (диффузионной и конвективно-диффузионной) в районе техногенного загрязнения почв (только аэрогенного и в сочетании с заливом сточными водами металлургического завода). Большие значения диффузионных параметров получены для Zn и Cd ($n \cdot 10^{-7}$ см²/с), меньшие – для Pb и Sb ($n \cdot 10^{-8}$ см²/с). В случае залива почв сточными водами отмечена достоверная конвективная составляющая миграции для Zn и Sb, при этом пик концентрации цинка переместился на глубину 40–60 см. В то же время в данных условиях не было ожидаемой четкой обратной корреляции между миграционной подвижностью и величиной сорбции элементов почвой.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Малкович Р.Ш. Математика диффузии в полупроводниках. М.: Наука, 1999. 387 с.
2. Полянин А.Д., Вязьмин А.В., Журов А.И., Казенин Д.А. Справочник по точным решениям уравнений тепло- и массопереноса. М.: Факториал, 1998. 368 с.
3. Прохоров В.М. Миграция радиоактивных загрязнений в почвах: физико-химические механизмы и моделирование. М.: Энергоиздат, 1981. 100 с.
4. Прохоров В.М., Фрид А.С. Количественные закономерности диффузии ионов в почве как пористой адсорбирующей среде // Вопросы энерго- и массообмена в системе почва-растение-атмосфера. Труды по агрономической физике. Л., 1971. Вып. 32. С. 80–89.
5. Рыжинский М.В., Фрид А.С., Прохоров В.М. Сравнение точного и приближенного решений уравнения вынужденной диффузии при определении параметров хроматографического переноса // Журнал физической химии. 1971. Т. 45. № 11. С. 2875–2879.
6. Рыжинский М.В., Фрид А.С. Обобщение уравнения конвективной диффузии на многофазную среду // Бюлл. научно-технич. информации по агрономической физике. Л., 1973. № 17–18. С. 17–21.
7. Фрид А.С. Механизмы и модели миграции Cs-137 в почвах // Радиационная биология. Радиоэкология. 1999. Т. 39. № 6. С. 667–674.
8. Фрид А.С., Борисочкина Т.И. Использование миграционных моделей при исследовании передвижения тяжелых металлов в загрязненных почвах // Проблемы техногенного воздействия на сферу

Бюллетень Почвенного института им. В.В. Докучаева. 2019. Вып. 97.
Dokuchaev Soil Bulletin, 2019, 97

агропромышленного производства: теория и практика. Сб. тр. совещания 8 июня 2010 г. Обнинск, 2011. С. 100–105.

9. *Фрид А.С., Гома Ботхина Саад М.А., Борисочкина Т.И.* Миграция тяжелых металлов в аридных почвах Египта, орошаемых природными и городскими сточными водами (подведение итогов) // *Агрохимия*. 2016. № 11. С. 46–57.

10. *Фрид А.С., Борисочкина Т.И.* Параметры моделей миграции тяжелых металлов и других элементов из пиритных хвостов в первые два месяца после попадания на карбонатную почву // *Агрохимия*. 2018 (а), № 2. С. 88–98. DOI: [10.7868/S0002188118020084](https://doi.org/10.7868/S0002188118020084).

11. *Фрид А.С., Борисочкина Т.И.* Параметры моделей миграции тяжелых металлов в ненарушенных лесных почвах в зоне воздействия сталелитейного завода // *Агрохимия*. 2018 (б). № 3. С. 72–76. DOI: [10.7868/S0002188118030092](https://doi.org/10.7868/S0002188118030092).

12. *Фрид А.С., Борисочкина Т.И.* Параметры моделей миграции Zn и Cd в пахотных почвах в зоне воздействия металлургического комплекса // *Агрохимия*. 2018 (в). № 6. С. 63–67. DOI: [10.7868/S0002188118060078](https://doi.org/10.7868/S0002188118060078).

13. *Фрид А.С., Борисочкина Т.И.* Использование малопараметрических динамических моделей для описания миграции тяжелых металлов по почвенному профилю различных ландшафтов // *Новые методы и результаты исследований ландшафтов в Европе, Центральной Азии и Сибири. Т. III. Мониторинг и моделирование ландшафтов*. М.: ВНИИА, 2018 (г). С. 315–318. DOI: [10.25680/1287.2018.88.21.259](https://doi.org/10.25680/1287.2018.88.21.259).

14. *Condie K.C.* Chemical-composition and evolution of the upper continental-crust – contrasting results from surface samples and shales // *Chem. Geol.* 1993. Vol. 104 (1–4). P. 1–37.

15. *Frid A.S.* Migration models of Cu, Zn, and Cd in soils under irrigation with urban wastewater // *Biogenic-abiogenic interactions in natural and anthropogenic systems. Lecture Notes in Earth System Sciences*. Springer. Cham. 2016. P. 157–163. DOI: [10.1007/978-3-319-24987-2_13](https://doi.org/10.1007/978-3-319-24987-2_13).

16. *Yuan Y., Xiang M., Liu C., Theng B.K.G.* Geochemical characteristics of heavy metal contamination induced by a sudden wastewater discharge from a smelter // *J. of Geochemical Exploration*. 2017. Vol. 176. P. 33–41.

PARAMETERS OF MATHEMATICAL MODELS FOR VERTICAL MIGRATION OF HEAVY METALS IN SOILS IN THE AREA OF LEAD AND ANTIMONY PLANT

A. S. Frid*, T. I. Borisochkina

V.V. Dokuchaev Soil Science Institute,
Russia, 119017, Moscow, Pizhevskiy per., 7, build. 2
*<https://orcid.org/0000-0003-0474-8019>, e-mail: asfrid@mail.ru

Received 04.02.2019, Accepted 28.05.2019

The data on distribution of heavy metals in the soil profile (Yuan et al., 2017) of the province Guangxi in southern China in the zone influenced by lead and antimony plant were analyzed. The soil is sod-calcareous and rich in humus. The averaged over the years and depth (“apparent”) parameters of diffusion and convective-diffusion models of migration in the area of combined soil pollution (only soil aerogenic pollution and in combination with the sewage waters) are estimated. The largest values of the diffusion parameters were obtained for Zn and Cd ($n \cdot 10^{-7}$ cm²/sec), the smallest values were obtained for Pb and Sb ($n \cdot 10^{-8}$ cm²/sec). When soil was flooded by waste waters, a reliable convective component of migration for Zn and Sb was noted. At the same time the peak of Zn concentration moved to the depth of 40–60 cm. Under these conditions there was no clear inverse correlation between the migration mobility and the amount of sorption of elements by the soil.

Keywords: sod-calcareous soil, heavy metals, vertical migration in soils, migration models and their parameters, south China.

REFERENCES

1. Malkovich R.Sh., *Matematika diffuzii v poluprovodnikakh* (Mathematics of diffusion in semiconductors), Moscow: Nauka, 1999, 387 p.
2. Polyanin A.D., Vyaz'min A.V., Zhurov A.I., Kazenin D.A., *Spravochnik po tochnym resheniyam uravnenii teplo- i massoperenosa* (Handbook of exact solutions for heat and mass transfer equations), Moscow: Factorial, 1998, 368 p.
3. Prokhorov V.M., *Migratsiya radioaktivnykh zagryaznenii v pochvakh: fiziko-khimicheskie mekhanizmy i modelirovanie* (Migration of radioactive contamination in the soil: physico-chemical mechanisms and modeling), Moscow: Energoizdat, 1981, 100 p.
4. Prokhorov V.M., Frid A.S., *Kolichestvennye zakonomernosti diffuzii ionov v pochve kak poristoi adsorbiruyushchei srede, Voprosy energo- i massoobmena v sisteme pochva-rastenie-atmosfera* (Quantitative regularities of ions diffusion in soil as a porous adsorbing medium, Issues of energy and mass transfer in the system soil-plant-atmosphere), *Trudy po agromicheskoi fizike*, Leningrad, 1971, Vol. 32, pp. 80–89.
5. Ryzhinskii M.V., Frid A.S., Prokhorov V.M., *Sravnenie tochnogo i priblizhennogo reshenii uravneniya vynuzhdennoi diffuzii pri opredelenii parametrov khromatograficheskogo perenosa* (Comparison between precise

and approximate data of the forced diffusion equation for determining the parameters of chromatographic transfer), *Zhurnal fizicheskoy khimi*, 1971, Vol. 45, No. 11, pp. 2875–2879.

6. Ryzhinskii M.V., Frid A.S., Obobshchenie uravneniya konvektivnoi diffuzii na mnogofaznyuyu sredu (Generalising the equation of convective diffusion for many-phase medium), *Byull. nauchno-tekhnich. informatsii po agronomicheskoi fizike*, Leningrad, 1973, No. 17–18, pp.17–21.

7. Frid A.S., Mekhanizmy i modeli migratsii ^{137}Cs v pochvakh (The mechanisms and the models of ^{137}Cs migration in soils), *Radiatsionnaya biologiya. Radioekologiya*, 1999, Vol. 39, No. 6, pp. 667–674.

8. Frid A.S., Borisochkina T.I., Ispol'zovanie migratsionnykh modelei pri issledovanii peredvizheniya tyazhelykh metallov v zagryaznennykh pochvakh (Application of migration models to the study of heavy metals migration in contaminated soils), *Proc. Meeting June 8, 2010, on Problems of anthropogenic impact on the scope of agro-industrial production: theory and practice*, Obninsk, pp. 100–105.

9. Frid A.S., Goma Botkhina Saad M.A., Borisochkina T.I., Migratsiya tyazhelykh metallov v aridnykh pochvakh Egipta, oroshaemykh prirodnymi i gorodskimi stochnymi vodami (podvedenie itogov) (The migration of heavy metal in Egyptian arid soils irrigated by natural and city waste waters (sum up)), *Agrokimiya*, 2016, No. 11, pp.46–57.

10. Frid A.S., Borisochkina T.I., Parametry modelei migratsii tyazhelykh metallov i drugikh elementov iz piritnykh khvostov v pervye dva mesyatsa posle popadaniya na karbonatnuyu pochvu (Parameters of migration models of heavy metals and other elements from pyrite tailings in the first two months after the spill on the calcareous sandy soil), *Agrokimiya*, 2018 (a), No. 2, pp. 88–98, DOI: [10.7868/S0002188118020084](https://doi.org/10.7868/S0002188118020084).

11. Frid A.S., Borisochkina T.I., Parametry modelei migratsii tyazhelykh metallov v nenarushennykh lesnykh pochvakh v zone vozdeistviya staleliteinogo zavoda (Parameters of the models of migration of heavy metals in undisturbed forest soils in the impact zone of steel mill), *Agrokimiya*, 2018 (b), No. 3, pp. 72–76, DOI: [10.7868/S0002188118030092](https://doi.org/10.7868/S0002188118030092).

12. Frid A.S., Borisochkina T.I., Parametry modelei migratsii Zn i Cd v pakhotnykh pochvakh v zone vozdeistviya metallurgicheskogo kompleksa (Parameters of Zn and Cd migration models in arable soils in the impact zone of metallurgical complex in the north of France), *Agrokimiya*, 2018 (c), No. 6, pp. 63–67, DOI: [10.7868/S0002188118060078](https://doi.org/10.7868/S0002188118060078).

13. Frid A.S., Borisochkina T.I., Ispol'zovanie maloparametricheskikh dinamicheskikh modelei dlya opisaniya migratsii tyazhelykh metallov po pochvennomu profilu razlichnykh landshaftov (Use of parameter-reduced dynamic models to describe the migration of heavy metals in the soil profile of

Бюллетень Почвенного института им. В.В. Докучаева. 2019. Вып. 97.
Dokuchaev Soil Bulletin, 2019, 97

various landscapes), In: *Novye metody i rezul'taty issledovaniy landshaftov v Evrope, Tsentral'noi Azii i Sibiri* (Novel methods and results of landscape research in Europe, Central Asia and Siberia (in five volumes)), Vol. 3 Landscape monitoring and modelling, Moscow: VNIIA, 2018 (g), pp. 315–318, DOI: [10.25680/1287.2018.88.21.259](https://doi.org/10.25680/1287.2018.88.21.259).

14. Condie K.C., Chemical-composition and evolution of the upper continental-crust – contrasting results from surface samples and shales, *Chem. Geol.* 1993, Vol. 104 (1–4), pp. 1–37.

15. Frid A.S., Migration models of Cu, Zn, and Cd in soils under irrigation with urban wastewater, *Biogenic-abiogenic interactions in natural and anthropogenic systems*, Lecture Notes in Earth System Sciences, Springer, Cham, 2016, pp. 157–163, DOI: [10.1007/978-3-319-24987-2_13](https://doi.org/10.1007/978-3-319-24987-2_13).

16. Yuan Y., Xiang M., Liu C., Theng B.K.G., Geochemical characteristics of heavy metal contamination induced by a sudden wastewater discharge from a smelter, *J. of Geochemical Exploration*, 2017, Vol. 176, pp. 33–41.

Ссылки для цитирования:

Фрид А.С., Борисочкина Т.И. Параметры моделей вертикальной миграции в почвах тяжелых металлов в окрестности завода по производству свинца и сурьмы // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2019. Вып. 97. С. 150-164. DOI: 10.19047/0136-1694-2019-97-150-164

For citation:

Frid A.S., Borisochkina T.I. Parameters of mathematical models for vertical migration of heavy metals in soils in the area of lead and antimony plant, Dokuchaev Soil Bulletin, 2019, V. 97, pp. 150-164, DOI: 10.19047/0136-1694-2019-97-150-164

ЗАКОНОМЕРНОСТИ МИГРАЦИИ ^{137}Cs В АЛЛЮВИАЛЬНОЙ ПОЧВЕ

© 2019 г. С. М. Пакшина, Л. П. Харкевич*, Н. М. Белоус,
Е. В. Смольский**

Брянский ГАУ, Россия,
243365, Брянская обл., с. Кокино, ул. Советская 2а,

*<https://orcid.org/0000-0003-2547-0239>,

**e-mail: sev_84@mail.ru

Поступила в редакцию 28.02.2019, после доработки 08.04.2019,
принята к публикации 28.05.2019

В данной работе рассмотрены закономерности миграции ^{137}Cs в аллювиальной почве центральной поймы реки Ипуть (Новozyбковский район, Брянская область). Исследовано влияние фильтрации воды во время паводка, биовыноса и радиоактивного распада ^{137}Cs на процесс миграции в почве. Вклад радиоактивного распада, фильтрации воды и биовыноса в общий вынос ^{137}Cs из почвы составил за период с 1994 г. по 2007 г. соответственно 50–79, 20–50, 0.3–2.2 % в зависимости от способа обработки, дозы минерального удобрения и соотношения в ней элементов питания. Установлено, что повышенный вынос ^{137}Cs из слоя почвы поймы при проведении двухъярусной вспашки, по сравнению с дискованием и естественным травостоем, определяется более низким значением числа Пекле, что свидетельствует о преобладании конвективного переноса ^{137}Cs , по сравнению с диффузионным, в общем потоке раствора.

Ключевые слова: ^{137}Cs , миграция, закономерность, радиоактивный распад, биовынос, фильтрация воды.

DOI: 10.19047/0136-1694-2019-97-165-180

ВВЕДЕНИЕ

В работе исследуется влияние радиоактивного распада, фильтрации воды во время паводка, биовыноса на процесс миграции ^{137}Cs в корнеобитаемом слое аллювиальной почвы естественного луга, а также при поверхностном и коренном его улучшении.

В настоящее время известны закономерности движения и распределения макроэлементов в почве при отсутствии растительного покрова. В работе ([Волобуев, 1975](#)) описаны две закономерности миграции солей в почве, которые были получены на основе

обобщения и анализа многочисленных данных экспериментально-полевых и лабораторных опытов по промывкам засоленных почв.

Первая закономерность связывает массу солей со временем в процессах засоления – рассоления почв и имеет следующий вид:

$$S_t = S_0 \exp(\pm \beta t), \quad (1)$$

где t – время, необходимое для изменения содержания солей в почве от начального значения S_0 до значения S_t , β – постоянная для определенных условий протекания процесса миграции, знаки “ $\pm$ ” относятся соответственно к процессам засоления и рассоления почвы.

Вторая закономерность связывает массу солей с пространством, в котором протекает процесс рассоления почвы и имеет вид:

$$h = \mu \lg(S_i/S_0), \quad (2)$$

где h – толщина почвы, разделенная на i слоев, S_i – запас солей в слоях $i = 0 - h$, S_0 – запас солей в поверхностном слое, μ – параметр, характеризующий фильтрационную способность и степень дренированности почвогрунта. Величина h зависит от количества профильтровавшейся влаги (Q). Поэтому значение μ определяется по графику функции $\lg(S_i/S_0) = f(Q)$, который имеет линейный прямопропорциональный вид. Параметры β и μ представляют собой постоянные для конкретной почвы величины, поскольку величины S_0 , S_t , S_i , S_h имеют конечное значение ([Волобуев, 1975](#)). В работе ([Борздыко, 2000](#)) впервые было показано, что уравнение (2) соблюдается также при описании распределения активности ^{137}Cs по глубине почвы при отсутствии растительного покрова.

В работах ([Пакшина, 1985; 1989](#)) дано теоретическое обоснование зависимостей (1), (2). Для этого была построена модель, включающая не только диффузионные и конвективные потоки ионов по порам почвы вдоль движения раствора, но и диффузионный поток ионов в электростатическом поле вокруг заряженных стенок пор, направленный перпендикулярно стенкам пор, который описывает ионный обмен на почвенно-поглолительном комплексе (ППК). При решении уравнения для случаев нисходящего ([Пакшина, 1985](#)) и восходящего ([Пакшина, 1989](#)) потоков ионов было получено следующее выражение:

$$C_t = C_0 \exp(-\lambda \nu t), \quad (3)$$

где C_0 , C_t – соответственно начальная и конечная концентрация ионов в почве, t – время, необходимое для снижения содержания иона от C_0 до C_t , v – скорость потока, λ – параметр массопереноса для определенных условий протекания процесса.

Получена связь между параметрами β , μ , и λ , которая определяется следующими соотношениями:

$$\beta = \lambda v, \quad \mu = 1/\lambda. \quad (4)$$

Модель позволила расшифровать содержание параметра λ и выразить его в виде формулы, включающей только физические величины:

$$\lambda = 1,8 \cdot 10^3 \cdot \text{ЕКО} \cdot \text{Pe} \sqrt{\frac{Z_1 + Z_2}{2}} / S \cdot T, \quad (5)$$

где **ЕКО** – емкость катионного обмена, мг-экв/100 г почвы, **S** – удельная поверхность почвы, м²/г, **T** – абсолютная температура почвы, **Pe** – параметр Пекле, равный D/vr . **D** – коэффициент диффузии иона, **v** – скорость потока раствора, **r** – радиус пор, **Z₁**, **Z₂** – валентность аниона и катиона соли ([Пакшина, 1985](#); [1989](#)).

Учитывая уравнение (1) в работе ([Пакшина, 1994](#)), была введена формула, связывающая плотность загрязнения почвы ¹³⁷Cs со временем, которая изменяется под действием процессов радиоактивного распада, фильтрации воды через почву, биовыноса, и имеет следующий вид:

$$A_k = A_0 (e^{-\lambda_1 t} - e^{-\lambda_2 Q_t} - n e^{-\lambda_3 \Sigma v E t}). \quad (6)$$

Где, первый, второй и третий члены относятся к радиоактивному распаду, фильтрации воды и биовыносу; λ_1 , λ_2 , λ_3 – постоянная радиоактивного распада, параметры массопереноса ионов при фильтрации влаги и биовыноса радионуклида корневой системой растений; **Q**, **ΣvEt** – количество профильтровавшейся через почву влаги и транспирация соответственно. **A₀**, **A_k** – начальная и конечная плотность загрязнения слоя почвы, $A_0 e^{-\lambda_1 t}$ – , оставшееся плотность загрязнения слоя после радиоактивного распада ¹³⁷Cs за период **t**, $A_0 e^{-\lambda_2 Q_t}$ – вынос ¹³⁷Cs при фильтрации воды, $A_0 n e^{-\lambda_3 \Sigma v E t}$ – биовынос доступного растениям ¹³⁷Cs, **n**-доля доступного ¹³⁷Cs от общей активности.

Модель (6) описывает миграцию ¹³⁷Cs из определенного слоя почвы тремя механизмами массопереноса во времени.

Целью данной работы является исследование применимости формулы (6) к процессу миграции ^{137}Cs в корнеобитаемом слое при наличии растительного покрова многолетних трав, выращиваемых в затопляемой паводковыми водами пойме.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Исследование закономерностей миграции ^{137}Cs в корнеобитаемом слое многолетних трав проводили на луговом участке центральной поймы реки Ипуть (Новозыбковский район, Брянская область) в течение 14 лет (1994–2007 гг.).

Почва опытного участка представлена аллювиальной луговой, маломощной, среднегумусной, песчаной на супесчаном аллювии и имеет следующее строение профиля: Ah (0–4), A (4–18), B₁ (18–40), B_g (40–60), C_g (60–90).

Агрохимические свойства почвы в период проведения опытов колебались в следующих интервалах значений: pH_{KCl} – 5.2–5.43; гидролитическая кислотность – 2.78–2.43 мг-экв/100г почвы; сумма поглощенных оснований – 10.1–12.24 мг-экв/100г почвы; содержание гумуса – 3.11–3.21 % (по Тюрину); содержание подвижного фосфора и обменного калия соответственно 121–135 и 50–69 мг/кг (по Кирсанову).

Плотность загрязнения опытного участка в среднем составила 1221–1554 кБк/м². Длительность затопления опытного участка во время весеннего паводка составляла 20–22 дня.

Объектами исследований служили естественный травостой и сеяная мятликовая травосмесь при обработке поймы дискованием и двухъярусной вспашкой. Злаковая травосмесь имела следующий состав: овсяница луговая (*Festuca pratensis* Huds.), тимopheвка луговая (*Phleum pratense* L.), кострец безостый (*Bromopsis inermis* Holub.), двухкосточник тростниковидный (*Phalaris arundinacea* L.), лисохвост луговой (*Alopecurus pratensis* L.).

На каждом фоне обработки поймы и естественном травостое использовали 5 вариантов внесения удобрения: 1 – Контроль, 2 – N₁₂₀P₉₀K₁₂₀, 3 – N₁₂₀P₉₀K₂₄₀, 4 – N₁₈₀P₁₂₀K₁₈₀, 5 – N₁₈₀P₁₂₀K₃₆₀.

Азотные (аммиачная селитра) и калийные (хлористый калий) удобрения вносили в два приема: половина расчетной дозы – под первый укос, вторая половина – под второй укос. Фосфорные

удобрения (простой гранулированный суперфосфат) вносили в один прием весной.

Площадь посевной делянки составляла 63 м², уборочной – 24 м²; повторность опыта была трехкратной. Урожайность многолетних трав учитывали методом сплошной поделяночной уборки и отбора пробного снопа. В год проводили два укоса (первый – с 01 по 10 июня, второй – с 23 по 30 августа). Удельную активность ¹³⁷Cs в образцах почвы и растений измеряли на универсальном спектрометрическом комплексе Гамма Плюс (НПП “Доза”, Россия), ошибка измерений не превышала 10 %.

В год закладки опыта (1994) и в 2007 г. были отобраны образцы из каждого слоя почвы, равного 5 см, до глубины, равной 60 см, на определение плотности загрязнения ¹³⁷Cs ([Харкевич, 2011](#)).

Транспирацию посевов рассчитывали по формуле ([Пенман, 1972](#)), испаряемость – по формуле Иванова ([Иванов, 1954](#)), радиоактивный распад ¹³⁷Cs – по формуле Резерфорда (1903). Для расчета параметра биовыноса λ_3 использовалось уравнение, выведенное из данных полевых опытов, которое имеет следующий вид:

$$\ln(A_k / A_i) = \lambda \Sigma v E t, \quad (7)$$

где **A_k**, **A_i** – соответственно удельная активность ¹³⁷Cs на контроле и на варианте *i* ([Пакшина и др., 2017](#)). Для расчета параметра массопереноса ¹³⁷Cs в почве при фильтрации воды использовалось уравнение (5), где **ЕКО** = 15.3 мэкв/100г почвы, **S** = 31.3 м²/г, **T** = 279.6 К, **Pe** = 0.4 (естественный травостой), **Pe** = 0.35 (дискование), **Pe** = 0.25 (двухъярусная вспашка). При фильтрации воды из почвы выносятся не только доступные корневой системе растений формы ¹³⁷Cs, но и коллоидные частицы, содержащие труднорастворимые соединения ¹³⁷Cs ([Сковородникова, 2005](#)). При расчетах биовыноса ¹³⁷Cs учитывалось, что активность водорастворимой и обменной форм ¹³⁷Cs в оглеенных почвах составляет 5 % от общей активности ¹³⁷Cs ([Сковородникова, 2005](#)).

Для расчета испаряемости, дефицита атмосферной влаги, фильтрации влаги из слоя почвы, равного 60 см, использовали данные метеостанции “Красная гора”, наиболее близко расположенной к месту проведения опытов.

Каждый год (с 1994 по 2007) был разделен на три периода, включающего месяцы: I–IV, V–IX, X–XII. В каждый период года

подсчитывали среднемесячную сумму осадков, испаряемости и дефицита атмосферной влаги. Дефицит атмосферной влаги в течение 14 лет наблюдали только в V–IX месяцы, который составил 1075 мм воды. Сумма выпавших осадков за 14 лет составила 7197 мм воды, испаряемость – 6163 мм, коэффициент увлажнения (КУ) – 1.17, который характеризует промывной тип водного режима почвы. Фильтрация паводковых вод по данным Брянскгипрводхоза составляет 26 % от общей суммы осадков за год, которая составила 134 мм в рассматриваемый период (1994–2007 гг.). Скорость фильтрации паводковых вод составила 0.8×10^{-7} м/с, что свидетельствует о высокой водопроницаемости.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В таблице 1 представлены данные урожайности сена (ц/га) и транспирации многолетних трав (мм) в среднем за два укоса и в среднем за периоды вегетации в 1994–2007 гг.

Таблица 1. Урожайность сена и транспирация многолетних трав в среднем за период вегетации 1994–2007 гг.

Table 1. The average hay yield and transpiration of perennial grasses for the growing season from 1994 to 2007

Вариант	Естественный травостой			Сеяный травостой					
				дискование			вспашка		
	У	ΣвЕт	К.т.	У	ΣвЕт	К.т.	У	ΣвЕт	К.т.
Контроль	23.9	183	766	31.2	239	766	32.9	252	766
N ₁₂₀ P ₉₀ K ₁₂₀	104.3	798	765	128.4	982	765	139.6	1068	765
N ₁₂₀ P ₉₀ K ₂₄₀	94.7	724	764	118.0	903	765	120.8	924	765
N ₁₈₀ P ₁₂₀ K ₁₈₀	121.5	929	765	140.0	1071	765	141.4	1082	765
N ₁₈₀ P ₁₂₀ K ₃₆₀	107.0	819	765	121.8	932	765	126.0	964	765

Примечание. У – урожайность сена в сумме за два укоса, ц/га; ΣвЕт – транспирация за вегетационный период, мм; К.т. – транспирационный коэффициент, равный расходу транспирирующей влаги (т) на формирование 1т воздушно-сухой фитомассы.

Установлено, что при внесении полного минерального удобрения урожайность трав зависит не только от соотношения доз калия к азоту, но и дозы фосфора. Увеличение отношения К : N в два раза при равной дозе фосфора вызывает его недостаток, и приводит к снижению транспирации и урожайности (табл.1). Транспирационный коэффициент (К.т.) не зависит от дозы удобрения и способа

обработки почвы, на всех вариантах опыта составляет равное значение. Независимость величины К.т. от дозы минерального удобрения было отмечено ранее в работе Шатилова ([Шатилов, 1978](#)). Высокие значения К.т. обусловлены использованием грунтовых вод в период вегетации трав при близком их уровне в центральной пойме. В таблице 2 приведены данные плотности загрязнения ^{137}Cs почвы по профилю корнеобитаемого слоя многолетних трав в 1994 г.

Таблица 2. Распределение плотности загрязнения почв ^{137}Cs по профилю корнеобитаемого слоя в 1994 г. (в год закладки опыта)

Table 2. The distribution of soil contamination (^{137}Cs) density in the root zone profile in 1994 (in the year of trial establishment)

Слой почвы, см Вариант	0–20		21–30		31–40	
	Ai	%	Ai	%	Ai	%
Естественный травостой	1 339.0	98.6	14.8	1.1	4.9	0.3
Сеяный травостой (обработка почвы – дискование)	1 311.0	99.0	10.0	0.7	3.7	0.3
Сеяный травостой (обработка почвы – двухъярусная вспашка)	1 323.4	95.4	54.7	4.0	8.9	0.6

Примечание. Ai – плотность загрязнения слоя ^{137}Cs , кБк/м².

По прошествии 8 лет после аварии на ЧАЭС плотность загрязнения ^{137}Cs слоя аллювиальной почвы, равного 0–20 см, на естественном травостое и при проведении поверхностного улучшения (дискование) поймы снизилась только на 1 % от начального загрязнения. После проведения коренного улучшения (двухъярусная вспашка), которое привело к перемешиванию почвы до глубины 45 см, плотность загрязнения ^{137}Cs слоя почвы 0–20 см уменьшилась на 5 %. Выпавший в 1986 г. ^{137}Cs переместился к 1994 г. до глубины 40 см. В таблице 3 представлены данные изменения плотности загрязнения ^{137}Cs корнеобитаемого слоя аллювиальной

Таблица 3. Распределение плотности загрязнения почвы ^{137}Cs по профилю корнеобитаемого слоя по вариантам опыта в 2007 г.

Table 3. The distribution of soil contamination (^{137}Cs) density in the root zone profile in various treatments (2007)

Слой почвы, см Вариант	0–20		21–30		31–40		41–50		51–60	
	Ai	%	Ai	%	Ai	%	Ai	%	Ai	%
Естественный травостой										
Контроль	788.8	97.5	18.4	2.1	2.5	0.3	0.5	0.07	0.32	0.06
N ₁₂₀ P ₉₀ K ₁₂₀	784.3	92.8	55.2	6.2	6.8	0.7	1.3	0.14	0.48	0.06
N ₁₂₀ P ₉₀ K ₂₄₀	805.9	91.3	70.9	7.5	7.6	0.8	2.9	0.3	0.72	0.07
N ₁₈₀ P ₁₂₀ K ₁₈₀	790.4	91.7	56.5	6.2	14.7	1.6	3.9	0.4	0.92	0.1
N ₁₈₀ P ₁₂₀ K ₃₆₀	719.6	86.8	89.7	10.2	20.3	2.1	6.4	0.7	1.52	0.16
Сеяный травостой (обработка почвы – дискование)										
Контроль	803.2	96.6	24.0	3.0	1.6	0.2	1.0	0.14	0.48	0.06
N ₁₂₀ P ₉₀ K ₁₂₀	666.9	93.1	46.7	6.2	4.2	0.5	1.1	0.15	0.41	0.05
N ₁₂₀ P ₉₀ K ₂₄₀	762.6	94.7	33.6	3.9	9.0	1.0	9.2	0.35	0.56	0.05
N ₁₈₀ P ₁₂₀ K ₁₈₀	777.0	97.8	16.9	2.0	1.1	0.1	0.4	0.05	0.32	0.04
N ₁₈₀ P ₁₂₀ K ₃₆₀	631.0	91.5	50.9	6.9	8.1	1.1	2.4	0.3	0.96	0.12
Сеяный травостой (обработка почвы – двухъярусная вспашка)										
Контроль	414.5	61.7	255.8	36.2	15.1	2.0	0.7	0.07	0.46	0.05
N ₁₂₀ P ₉₀ K ₁₂₀	311.1	49.6	278.0	42.3	56.1	7.9	0.9	0.14	0.32	0.06
N ₁₂₀ P ₉₀ K ₂₄₀	380.4	60.3	258.6	39.1	2.8	0.4	1.0	0.13	0.56	0.07
N ₁₈₀ P ₁₂₀ K ₁₈₀	492.1	68.6	223.6	29.6	13.4	1.7	0.8	0.08	0.32	0.02
N ₁₈₀ P ₁₂₀ K ₃₆₀	427.3	68.6	200.9	20.8	3.3	0.4	1.0	0.14	0.36	0.06

Примечание. Ai – плотность загрязнения слоя 0–60 см ^{137}Cs (кБк/м²).

почвы в 2007 г. в зависимости от варианта опыта, заложенного в 1994 г. На контроле в слое аллювиальной почвы, равном 0–20 см, остается около 98 % ^{137}Cs от слоя, равного 0–60 см. Внесение минерального удобрения ускорило процесс десорбции ^{137}Cs из дернины и вынос его из слоя, равного 0–20 см. В этом слое активность ^{137}Cs составила в среднем 91 % от активности слоя 0–60 см.

Измельчение дернины при дисковании и оставление ее на поверхности не оказало существенного влияния на вынос ^{137}Cs , по сравнению с естественным травостоем. Активность ^{137}Cs в слое почвы 0–20 см на контроле и с внесением NPK составила соответственно 97 % и 94 % от активности слоя 0–60 см.

Измельчение дернины и перемешивание ее остатков с другими горизонтами при проведении двухъярусной вспашки на глубину 45 см повысило вынос ^{137}Cs из слоя 0–20 см на контроле и вариантах с внесением NPK. Активность ^{137}Cs в этом слое в среднем составила 62 % от активности ^{137}Cs в слое 0–60 см. На всех вариантах при разных обработках почвы ^{137}Cs присутствует в слое 50–60 см, на границе с оглеенной материнской породой Cg (60–90).

В таблице 4 представлена сравнительная оценка рассчитанных по уравнению (6) значений A_t ($t = 14$ лет) с экспериментальными значениями. Экспериментальные значения включали плотность загрязнения слоя почвы 0–60 см в 1994 г. и 2007 г., снижение плотности загрязнения за 14 лет, экспериментальные значения биовыноса фитомассы трав. Биовынос ^{137}Cs из почвы определялся путем умножения урожайности сена за 14 лет на удельную активность в нем ^{137}Cs . При расчете биовыноса ^{137}Cs из почвы фитомассой трав использовал значение $\lambda_3\Sigma E_t$, полученное по формуле (7).

Для расчета выноса ^{137}Cs из почвы во время паводков находились значения λ_2 по формуле (5) и значение Pe для разных способов обработки почвы. В работе ([Pakshina et al., 2018](#)) было показано, что между значениями Pe и относительной транспирацией имеет место линейная обратнопропорциональная зависимость. На рисунке представлены зависимости значений Pe от относительной транспирации трех мятликовых культур. Как следует из рисунка, число Pe уменьшается с увеличением потерь воды из почвы.

Таблица 4. Количественная оценка процессов выноса ^{137}Cs из слоя почвы 0–60 см за период с 1994 по 2007 гг.
Table 4. Quantitative assessment of ^{137}Cs removal from 0–60 cm soil layer for the period from 1994 to 2007

Вариант	1994	2007	Вынос ¹³⁷ Cs Ao- Ak		Процесс выноса ¹³⁷ Cs из почвы, экспериментальные и рассчитанные значения					
	Ao	Ak	Экс.	Рас.	Радиоактивный распад		Биовынос		Фильтрация воды	
					A ₁	Ao-At	Экс.	Рас.	Экс.	Рас.
Естественный травостой										
Контроль	1 359	810	549		985	374	13.2		161	
N ₁₂₀ P ₉₀ K ₁₂₀		848	511	526			22.1	26	115	128
N ₁₂₀ P ₉₀ K ₂₄₀		888	471				5.6	7.2	91	
N ₁₈₀ P ₁₂₀ K ₁₈₀		856	503				16.8	17	112	
N ₁₈₀ P ₁₂₀ K ₃₆₀		847	512				3.5	4	134	
Сеяный травостой (обработка почвы – дискование)										
Контроль	1 325	830	495		961	364	13.7		117	
N ₁₂₀ P ₉₀ K ₁₂₀		719	606	511			20.3	23.8	221	169
N ₁₂₀ P ₉₀ K ₂₄₀		809	516				4.2	5.6	147	
N ₁₈₀ P ₁₂₀ K ₁₈₀		796	529				9.1	9.8	155	
N ₁₈₀ P ₁₂₀ K ₃₆₀		693	632				2.5	3.1	265	
Сеяный травостой (обработка почвы – двухъярусная вспашка)										
Контроль	1 387	687	700		1006	381	9.1		310	
N ₁₂₀ P ₉₀ K ₁₂₀		646	741	724			13.2	23.6	347	319
N ₁₂₀ P ₉₀ K ₂₄₀		643	744				2.9	6.2	360	
N ₁₈₀ P ₁₂₀ K ₁₈₀		730	357				7.4	13.2	269	
N ₁₈₀ P ₁₂₀ K ₃₆₀		633	754				1.7	3.4	371	

Примечание: А₀, А_к (экс.), А_к (рас.) – соответственно начальная (1994 г.) и конечная экспериментальная и рассчитанная по формуле (6) для слоя 0–60 см плотность загрязнения почвы кБк/м².

При значениях относительной транспирации, равных 2 и 2.5, число Pe соответственно равно 0.4 и 0.25. Испаряемость в апреле во время паводков в среднем за 14 лет составила 53.9 мм. Отсюда $Q/\Sigma E_0 = 2.5$, здесь $Q = 134$ мм. При максимальных потерях воды на фильтрацию число Pe составляет 0.25, при минимальных – 0.4.

На рисунке представлена корреляционная зависимость между числом Pe и относительной транспирацией посевов мятликовых трав.

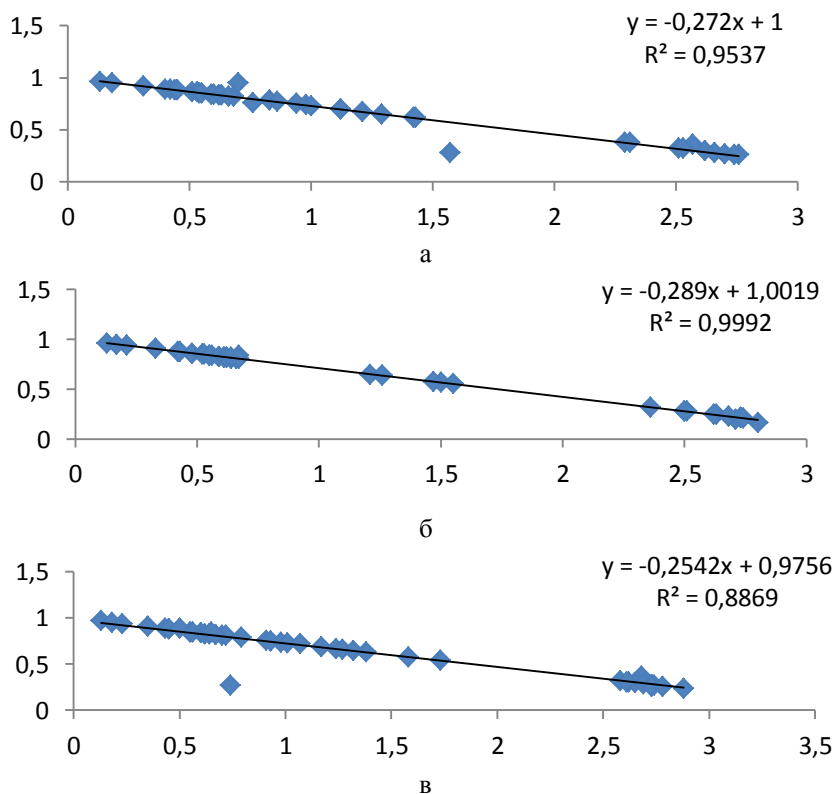


Рисунок. Корреляционная связь между числом Pe потоков почвенной влаги и относительной транспирацией посевов мятликовых трав: а – ежа сборная, б – овсяница луговая, в – двукосточник тростниковидный.

Figure. Correlation communication between Peclet's number of streams of soil moisture and a relative transpiration of crops of bluegrass herbs: а –

Dactylis glomerata, б – *Festuca pratensis*, в – *Phalaris arundinacea*.

Как следует из рисунка, с увеличением расхода почвенной влаги на транспирацию посевов трав или влажностью почвы, увеличивается конвективный поток ионов и снижается число Pe . С уменьшением расхода влаги посевами трав на транспирацию увеличивается диффузионный поток ионов с потоком жидкости и возрастает число Pe .

Как следует из таблицы 4, экспериментальные значения биовыноса ^{137}Cs из почвы фитомассой трав и выноса ^{137}Cs при фильтрации паводковых вод через слой почвы, равный 0–60 см, совпали.

Количественная оценка процессов выноса ^{137}Cs из корнеобитаемого слоя трав за период 1994–2007 гг. выявила, что вклад биовыноса в общий вынос ^{137}Cs невелик и на всех вариантах не превышает 4 %. Минеральные удобрения оказывают существенное влияние на биовынос ^{137}Cs из почвы. Особенно низкий биовынос ^{137}Cs наблюдается при внесении NPK при отношении доз $K : N = 2$.

Вынос ^{137}Cs при фильтрации воды через слой почвы в несколько раз превышает биовынос. Особенно высокий фильтрационный вынос ^{137}Cs наблюдается при проведении двухъярусной вспашки поймы.

Двухъярусная вспашка, увеличивая пористость и размер пор почвы, скорость потока влаги и уменьшая число Pe , повышает вынос ^{137}Cs в нижние слои почвы во время паводков, по сравнению с дискованием и естественным травостоем в 1.9 и 2.5 раза.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ экспериментально-полевых данных изменения плотности загрязнения ^{137}Cs почвы корнеобитаемого слоя многолетних трав со временем позволяет выявить следующее:

– Убывание плотности активности ^{137}Cs корнеобитаемого слоя зависит от вклада каждого процесса. Вклад радиоактивного распада, инфильтрации воды, биовыноса ^{137}Cs из почвы за 14 лет соответственно составил: 50–79 %; 20–50 %; 0.3–2.2 %.

– Двухъярусная вспашка повышает вынос ^{137}Cs из верхнего слоя почвы, равного 0–60 см, по сравнению с естественным травостоем.

стоим во время поводка и дискованием, соответственно в 2.5 и 1.9 раза.

– Экспериментально подтверждена формула, связывающая активность ^{137}Cs в корнеобитаемом слое со временем, которая имеет следующий вид: $A_t = A_0(e^{-\lambda_1 t} \times e^{-\lambda_2 Q} \times ne^{-\lambda_3 \Sigma v E t})$, где первый, второй, третий члены относятся соответственно к радиоактивному распаду, инфильтрации воды и биовыносу ^{137}Cs из почвы.

– Доказано, что причиной повышенного выноса ^{137}Cs из алювиальных почв, по сравнению с другими почвами Брянской области, является интенсивная миграция ^{137}Cs в период ежегодных паводков.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Борздыко И.А. Разработка системы автоматизированного мониторинга последствий катастрофы на Чернобыльской АЭС в юго-западных районах Брянской области: Автореф. дис. ... канд. т. наук. Брянск. 2000. 19 с.
2. Волобуев В.Р. Расчет промывки засоленных почв. М.: Колос, 1975. 71 с.
3. Иванов Н.Н. Об определении величины испаряемости // Известия Всес. Географического общества. 1954. Т. 86. № 2. С. 189–195.
4. Исаков А.Н., Володченков А.Н. Динамика содержания радионуклидов в почвах Калужской области // Агрохимический вестник. 2010. № 2. С. 11–14.
5. Маркина З.Н. Радиоэкологическое состояние агроландшафтов Юго-Запада России и их реабилитация: Автореф. дис. ... докт. с.-х. наук. Брянск. 1999. 42 с.
6. Пакишина С.М. Исследование закономерности вертикального распределения солей по профилю почвы и ее частных случаев // Почвоведение. 1989. № 2. С. 86–93.
7. Пакишина С.М. Модель для долгосрочного прогноза загрязнения пахотных почв ^{137}Cs // Тезисы докладов XXXI Межвузовской научно-практической конференции “Наука и передовой опыт в производстве и учебном процессе”. Великие Луки. 1994. С. 24–26.
8. Пакишина С.М. Физическая интерпретация параметра солеотдачи почв и метод его расчета при проведении промывок засоленных почв // Доклады ВАСХНИЛ. 1985. № 12. С. 34–36.
9. Пакишина С.М., Белоус Н.М., Силаев А.Л., Смольский Е.В. Количественная оценка биологического выноса ^{137}Cs из почвы наземной

Бюллетень Почвенного института им. В.В. Докучаева. 2019. Вып. 97.
Dokuchaev Soil Bulletin, 2019, 97

массой мятликовых трав при внесении минеральных удобрений // Радиация и риск. 2017. Т. 26. № 4. С. 99–110.

10. Пенман Х. Круговорот воды. Биосфера. М.: Мир, 1972. С. 60–72.

11. Харкевич Л.П. Эффективность способов обработки почвы и агрохимических приемов при производстве кормов на радиоактивных угодьях Юго-Запада России: Автореф. дис. ... докт. с.-х. наук. Брянск. 2011. 45 с.

12. Шатилов И.С. Водопотребление и транспирация растений в полевых условиях. Научные основы программирования урожаев культур. М.: Колос, 1978. С. 53–66.

13. Сковородникова Н.А. Миграция цезия-137 в почвах различных биосистем Брянского Полесья: Автореф. дис. ... канд. с.-х. наук. Брянск. 2005. 20 с.

14. Pakshina S.M., Belous N.M., Shapovalov V.F., Chesalin S.F., Smolsky E.V., Silaev A.L. Calculation of ^{137}Cs accumulation by phytomass of motley herbs // International Journal of Green Pharmacy. 2018. Vol. 12. No. 3. P. 704–711.

REGULARITIES OF MIGRATION ^{137}CS IN THE ALLUVIAL SOIL

S. M. Pakshina, L. P. Harkevich*, N. M. Belous,
E. V. Smolsky**

Bryansk State Agrarian University

Russia, 243365, Bryansk region, s. Kokino, Sovetskaya str., 2a

**<https://orcid.org/0000-0003-2547-0239>,*

***e-mail: sev_84@mail.ru*

Received 28.02.2019, Revised 08.04.2019, Accepted 28.05.2019

This paper examines the patterns of ^{137}Cs migration in the alluvial soil of the central floodplain of the Iput River (Novozybkovsky district, Bryansk region). The effect of water filtration during flooding, bioremoval by plants and ^{137}Cs radioactive decay on the migration process of Cs ions in the soil was studied. The contribution of radioactive decay, filtration of water and bioremoval to the total removal of ^{137}Cs from the soil during the period from 1994 to 2007 was 50–79, 20–50, 0.3–2.2 % coorespondingly, depending on the treatment method, the dose of mineral fertilizers and the ratio of nutrients. It was found that the increased removal of ^{137}Cs from the soil layer of the floodplain during double-depth plowing, compared with disking and natural grass stands, is determined by a lower Peclet number, which indicates the prevalence of convective ^{137}Cs transfer in contrast to diffusion in the total solution flow.

Keywords: ^{137}Cs , migration, regularity, radioactive decay, biocarrying out, water filtration.

REFERENCES

1. Borzdyko I.A., *Razrabotka sistemy avtomatizirovannogo monitoringa posledstviy katastrofy na Chernobyl'skoi AES v yugo-zapadnykh raionakh Bryanskoi oblasti: Avtoref. dis. ... kand. t. nauk* (Development of a system for automated monitoring of the consequences of the disaster at the Chernobyl nuclear power plant in the south-western districts of the Bryansk region, Extended abstract of Cand. Tech. sci. thesis), Bryansk, 2000, 19 p.
2. Volobuev V.R., *Raschet promyvki zasolennykh pochv* (Calculation of desalinization of saline soils), Moscow: Kolos, 1975, 71 p.
3. Ivanov N.N., Ob opredelenii velichiny ispyaryemosti (On determining the value of evaporation), *Izvestiya Vses. Geograficheskogo obshchestva*, 1954, Vol. 86, No. 2, pp. 189–195.
4. Isakov A.N., Volodchenkov A.N., Dinamika sodержaniya radionuklidov v pochvakh Kaluzhskoi oblasti (Dynamics of radionuclide content in the soils of the Kaluga region), *Agrokhimicheskiy vestnik*, 2010, No. 2, pp. 11–14.
5. Markina Z.N., *Radioekologicheskoe sostoyaniye agrolandshaftov Yugo-Zapada Rossii i ikh reabilitatsiya: Avtoref. dis. ... dokt. s.-kh. nauk* (Radioecological state of agricultural landscapes of South-West Russia and their rehabilitation, Extended abstract of Dr. Agric. sci. thesis), Bryansk, 1999, 42 p.
6. Pakshina S.M., Issledovanie zakonornosti vertikal'nogo raspredeleniya soley po profilu pochvy i ee chastichnykh sluchaev (Study of the regularity of the vertical distribution of salts in the soil profile and its partial cases), *Pochvovedenie*, 1989, No. 2, pp. 86–93.
7. Pakshina S.M., Model' dlya dolgosrochnogo prognoza zagryazneniya pakhotnykh pochv ^{137}Cs (Model for a long-term forecast of ^{137}Cs contamination of arable soil), *Tezisy dokladov XXXI Mezhevuzovskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii "Nauka i peredovoy opyt v proizvodstve i uchebnom protsesse"* (Proc. of the XXXI Inter-University Scientific-Practical Conf. "Science and Advanced Experience in Production and the Educational Process"), Velikie Luki, 1994, pp. 24–26.
8. Pakshina S.M., Fizicheskaya interpretatsiya parametra soleotdachi pochv i metod ego rascheta pri provedenii promyvok zasolennykh pochv (Physical interpretation of the soil salt transfer parameter and the method of its calculation during the desalinization of saline soils), *Doklady VASKhNIL*, 1985, No. 12, pp. 34–36.
9. Pakshina S.M., Belous N.M., Silaev A.L., Smol'skii E.V., Kolichestvennaya otsenka biologicheskogo vynosа ^{137}Cs iz pochvy nazemnoi

Бюллетень Почвенного института им. В.В. Докучаева. 2019. Вып. 97.
Dokuchaev Soil Bulletin, 2019, 97

massoi myatlikovykh trav pri vnesenii mineral'nykh udobrenii (Quantitative assessment of ^{137}Cs biological removal from the soil by above the ground mass of bluegrass when mineral fertilizers are applied), *Radiatsiya i risk*, 2017, Vol. 26, No. 4, pp. 99–110.

10. Penman Kh., *Krugovorot vody. Biosfera* (The water cycle. Biosphere), Moscow: Mir, 1972, pp. 60–72.

11. Kharkevich L.P., *Effektivnost' sposobov obrabotki pochvy i agrokhimicheskikh priemov pri proizvodstve kormov na radioaktivnykh ugod'yakh Yugo-Zapada Rossii: Avtoref. dis. ... dokt. s.-kh. nauk* (The effectiveness of methods of tillage and agrochemical methods in the production of feed on radioactive lands of South-West Russia, Extended abstract of Dr. Agric. sci. thesis), Bryansk, 2011, 45 p.

12. Shatilov I.S., *Vodopotreblenie i transpiratsiya rastenii v polevykh usloviyakh. Nauchnye osnovy programmirovaniya urozhaev kul'tur* (Water consumption and transpiration of plants in the field. Scientific basis for programming crop yields), Moscow: Kolos, 1978, pp. 53–66.

13. Skovorodnikova N.A., *Migratsiya tseziya-137 v pochvakh razlichnykh biosistem Bryanskogo Poles'ya: Avtoref. dis. ... kand. s.-kh. nauk* (Migration of cesium-137 in the soils of various biosystems of the Bryansk Polesie, Extended abstract of Cand. Agric. sci. thesis), Bryansk, 2005, 20 p.

14. Pakshina S.M., Belous N.M., Shapovalov V.F., Chesalin S.F., Smolsky E.V., Silaev A.L., Calculation of ^{137}Cs accumulation by phytomass of MOTLEY herbs, *International Journal of Green Pharmacy*, 2018, Vol. 12, No. 3, pp. 704–711.

Ссылки для цитирования:

Пакшина С.М., Харкевич Л.П., Белоус Н.М., Смольский Е.В. Закономерности миграции ^{137}Cs в аллювиальной почве // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2019. Вып. 97. С. 165-180. DOI: 10.19047/0136-1694-2019-97-165-180

For citation:

Pakshina S.M., Harkevich L.P., Belous N.M., Smolsky E.V. Regularities of migration ^{137}Cs in the alluvial soil, *Dokuchaev Soil Bulletin*, 2019, V. 97, pp. 165-180, DOI: 10.19047/0136-1694-2019-97-165-180

Научное издание

Бюллетень Почвенного института
имени В.В. Докучаева

Выпуск 97

Главный редактор *А.Л. Иванов*

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 15.06.2019 г.

Подписано в печать 15.06.2019 г.

Формат 60×84/16. Бумага офсетная.

Усл. печ. л. 10,5 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