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

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

БЮЛЛЕТЕНЬ

ПОЧВЕННОГО ИНСТИТУТА имени В.В. ДОКУЧАЕВА

101

Москва
2020
https://bulletin.esoil.ru

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

V.V. DOKUCHAEV SOIL SCIENCE INSTITUTE

Dokuchaev Soil Bulletin

(Byulleten Pochvennogo instituta imeni V.V. Dokuchaeva)

101

Moscow
2020
https://bulletin.esoil.ru

ББК П03
Б 98
УДК 631.4

Главный редактор:
***Иванов А. Л.**, академик РАН*

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

Редакционная коллегия:

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

Chief Editor:
***A. L. Ivanov**, Academician*

Deputy Chief Editor:
***I. Yu. Savin**, Academician*

Editorial board:

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

© ФГБНУ Почвенный институт им. В.В. Докучаева, 2020 г.

© V.V. Dokuchaev Soil Science Institute, 2020

СОДЕРЖАНИЕ

Пространственные аспекты прикладного почвоведения

Савин И.Ю. 5

Проблема активизации засоления в почвах юга Восточной Сибири и Монголии в связи с аридизацией климата

Панкова Е.И., Черноусенко Г.И. 19

Арктические и тундровые почвы на новой почвенной карте России масштаба 1 : 2.5 млн

Ананко Т.В., Герасимова М.И., Конюшков Д.Е. 46

Краевой угол смачивания как интегральный показатель физико-химических свойств черноземов Каменной степи

Матвеева Н.В., Милановский Е.Ю.,
Хайдапова Д.Д., Рогова О.Б. 76

Запасы и групповой состав фосфатов почв предгорной зоны Илийского Алатау и их изменение при длительном использовании

Балгабаев А.М., Елешев Р.Е., Умбетов А.К.,
Иванов А.Л., Рогова О.Б, Колобова Н.А. 124

Сравнительный анализ минералогического состава ила лугово-каштановой почвы и солонца на территории с невыраженным микрорельефом в северо-западной части Прикаспийской низменности

Чурилин Н.А., Лебедева М.П., Варламов Е.Б. 159

Сравнительная характеристика свойств целинного, пахотного и залежного чернозема типичного Курской области

Мамонтов В.Г., Артемьева З.С., Лазарев В.И.,
Родионова Л.П., Крылов В.А., Ахмедзянова Р.Р. 182

Научные идеи почвоведа-географа В.М. Фридланда, их истоки и развитие (к 100-летию со дня рождения)

Иванов И.В., Замотаев И.В. 202

CONTENTS

Spatial aspects of applied Soil Science

Savin I.Yu. 5

The problem of salinization activation in soils of the south of Eastern Siberia and Mongolia in connection with climate aridization

Pankova E.I., Chernousenko G.I. 19

Arctic and tundra soils on the new digital soil map of Russia, 1 : 2.5 M scale

Ananko T.V., Gerasimova M.I., Konyushkov D.E. 46

The contact angle of wetting as an integral indicator of physical-chemical properties of Chernozems of Kamennaya Steppe

Matveeva N.V., Milanovsky E.Yu.,
Khaidapova D.D., Rogova O.B 76

Stocks and fraction composition of phosphorus in the Ili Alatau foothill soils and their change under long-term use

Balgabaev A.M., Eleshev R.E., Umbetov A.K.,
Ivanov A.L., Rogova O.B., Kolobova N.A. 124

Mineralogical comparative analysis of the clay fraction of solonatz and chestnut soil without apparent microrelief in the north-western part of the Caspian lowland

Churilin N.A., Lebedeva M.P., Varlamov E.B. 159

Comparative characteristics of the properties of Halpic Chernozem of the Kursk Region of different land use

Mamontov V.G., Artemyeva Z.S., Lazarev V.I.,
Rodionova L.P., Krylov V.A., Ahmetzyanova R.R. 182

Scientific ideas of pedologist-geographer V.M. Fridland, their origins and development (to the 100th anniversary

Ivanov I.V., Zamotaev I.V. 202

УДК 631.421
DOI: 10.19047/0136-1694-2020-101-5-18

Ссылки для цитирования:
Савин И.Ю. Пространственные аспекты прикладного почвоведения // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2020. Вып. 101. С. 5-18. DOI: 10.19047/0136-1694-2020-101-5-18
Cite this article as:
Savin I.Yu., Spatial aspects of applied Soil Science, Dokuchaev Soil Bulletin, 2020, V. 101, pp. 5-18, DOI: 10.19047/0136-1694-2020-101-5-18
Благодарность:
Исследования проведены при финансовой поддержке РФФИ (грант № 18-016-00052) и гранта Минобрнауки России (соглашение № 05.607.21.0302).
Acknowledgments:
The studies were carried out with the financial support of the Russian Foundation for Basic Research (RFBR) (grant No. 18-016-00052) and in the framework of the grant project of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation (agreement No. 05.607.21.0302).

Пространственные аспекты прикладного почвоведения

© 2020 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 10.02.2020, *после доработки* 11.02.2020,
принята к публикации 04.03.2020

Резюме: Проведен анализ особенностей прикладного использования почвенных данных. Показано, что для решения большинства практических задач требуется пространственная информация о почвах и их свойствах. В связи с этим почвенная карта является своеобразным интерфейсом между теоретическим и прикладным почвоведением. Выявлены недостатки и ограничения современных почвенных карт, которые существенно снижают возможности их практического использования. Проведен анализ возможных путей преодоления выявленных ограничений. Установлено, что повышение практической

значимости почвоведения в настоящее время невозможно как без технологической модернизации почвенного картографирования, так и без смысловой, методологической корректировки. Необходим и уже возможен полный переход от традиционных почвенных карт к пиксельным пространственным почвенным базам данных. Информационная нагрузка и точность почвенных карт может и должна быть увеличена за счет перехода от картографирования положения почвы в той или иной классификации на картографирование отдельных сельскохозяйственно значимых свойств почв. Для решения практических сельскохозяйственных задач важно дополнить информацию почвенных карт сведениями о современных процессах, протекающих в почвах, которые могут быть получены на основе пространственного цифрового моделирования.

Ключевые слова: картографирование почв, оценка почв, цифровая почвенная картография, классификация почв.

Spatial aspects of applied Soil Science

I. Yu. Savin

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

Agrarian and Technological Institute RUDN,
8/2 Miklukho-Maklaya Str., Moscow 117198, Russian Federation,
http://orcid.org/0000-0002-8739-5441, e-mail: savin_iyu@esoil.ru.

Received 10.02.2020, *Revised* 11.02.2020, *Accepted* 04.03.2020

Abstract: The analysis of peculiarities of applied use of soil data has been carried out. It is shown that most of practical tasks require spatial information about soils and their properties. In this regard, a soil map is considered as a kind of interface between theoretical and applied soil science. The disadvantages and limitations of modern soil maps, which significantly reduce the possibility of their practical use, have been revealed. The analysis of possible ways of overcoming the revealed limitations has been carried out. It is established that increase of practical importance of soil science at present is impossible both without technological modernization of soil mapping and without semantic, methodological adjustments. The complete transition from traditional soil maps to pixel spatial soil databases is necessary and already possible. Information load and accuracy of soil maps can and should be increased due to transition from mapping of soil position in one or another classification to mapping of individual, agriculturally important soil properties. In order to solve practical agricultural problems it is important to

complete the information of soil maps with information about modern processes occurring in soils, which can be obtained from spatial digital modeling.

Keywords: soil mapping, soil evaluation, digital soil mapping, soil classification.

ВВЕДЕНИЕ

Почвоведение, как и любая другая естественная наука, имеет большое прикладное значение. Основным приложением почвенных знаний является сельское хозяйство и экология в широком смысле этого термина. Причем значимость достижений почвоведения для решения сельскохозяйственных задач в настоящее время в гораздо большей степени очевидна для общества.

Говоря о практической значимости знаний о почвах в сельском хозяйстве, многие (как обыватели, так и чиновники) под этим понимают агрохимию и мелиорацию земель, а не почвоведение в чисто научном понимании этого термина. Об этом свидетельствует, к примеру, содержание государственных программ повышения плодородия почв, которые проводились в течение десятилетий Минсельхозом России (http://pravo.gov.ru/proxy/ips/?docbody=&nd=102073335&rdk=&backlink=1; http://static.government.ru/media/files/41d49957ae2064e53ee1.pdf). Несмотря на это, почвоведение, конечно же, тоже имеет большое прикладное значение в сельскохозяйственном производстве.

Эти три науки (почвоведение, агрохимия и мелиорация земель) имеют, по сути, один объект исследований – почвы, но направлены на получение новых знаний в несколько разных областях. Почвоведение как фундаментальная наука познает почву как особое природное образование, специфику ее образования и жизни (Шоба, 2015). Агрохимия пытается познать особенности поведения в почвах искусственно вносимых в нее химических веществ, включая их поведение в системе почва – растение (Ладонин, 2005). Мелиорация земель нацелена на получение фундаментальных знаний в области изучения реакции почв на направленное антропогенное (преимущественно физическое) воздействие (Кирейчева, 2011).

Прикладное значение почвоведения, агрохимии и мелиорации также в некоторой степени различно.

Почвоведение позволяет решать задачи, связанные с оптимизацией землепользования и повышением его эффективности с точки зрения минимизации процессов деградации и максимизации экономической эффективности. Без почвенных знаний невозможно решать вопросы оптимального размещения посевов и насаждений, вопросы оптимизации использования сельскохозяйственной техники, вопросы оптимизации территориального планирования землепользования, вопросы минимизации экологических рисков при сельскохозяйственном использовании земель, определения потенциальных возможностей использования земель в том или ином качестве (Кирюшин, 2013).

Основной прикладной задачей агрохимии является научное обоснование обеспечения сельскохозяйственных растений достаточным количеством питательных элементов в течение всего вегетационного периода при минимизации экологических рисков (Минеев и др., 2017).

Мелиорация почв и земель нацелена на научное обоснование направленного изменения неблагоприятных для сельского хозяйства свойств почв и земель с целью повышения урожайности сельскохозяйственных культур и естественных сельскохозяйственных угодий (Дубенок и др., 2009).

Анализ перечисленного списка решаемых фундаментальных и практических задач позволяет сделать вывод о том, что решение фундаментальных задач этими науками вполне возможно с использованием даже одного образца почвы, или даже одного педона, но для решения практических сельскохозяйственных задач обязательно необходим учет пространственного варьирования почв и их свойств.

ПРОБЛЕМЫ ТРАДИЦИОННЫХ ПОЧВЕННЫХ КАРТ И ПУТИ ИХ ПРЕОДОЛЕНИЯ

Из-за того, что почвы и их свойства в большинстве случаев значительно изменяются в пространстве (Фридланд, 1972), результаты, полученные на примере одного образца или даже разреза почв, часто не могут быть экстраполированы на территорию

земельного участка, используемого в сельском хозяйстве.

Для решения этой проблемы условно принимается, что экстраполяция почвенных знаний, полученных на уровне образца или разреза почв, может быть осуществлена с использованием почвенной карты (Савин и др., 2019). То есть,в качестве основополагающей эксплуатируется идея о том, что почвы одного классификационного положения имеют близкие свойства, и в них протекают схожие процессы почвообразования. Поэтому экстраполяция данных, полученных на уровне образца и/или разреза почв с целью их практического использования, осуществляется на основе почвенной карты. Таким образом, почвенная карта (здесь и далее под этим термином имеется в виду традиционная почвенная карта, а не картограммы отдельных свойств почв) выступает в качестве своеобразного интерфейса между фундаментальным и прикладным почвоведением, и от ее качества и информативности зависит успешность практического использования достижений почвоведения в сельском хозяйстве.

Но традиционная почвенная карта не является оптимальным интерфейсом по нескольким причинам.

1. Классификационное положение почв и свойства почв.

На традиционных почвенных картах отображаются выделы почв в терминах определенной классификации почв. Известно, что существует достаточно много классификаций почв, в основе которых заложены разные принципы (Soil Taxonomy, 1975; Классификация и диагностика…, 1977, 2004; IUSS, 2007). Это означает, что, используя разные классификационные схемы, можно получить различные почвенные карты на одну и ту же территорию. Но гораздо более важное значение имеет то, какие свойства почв и протекающие в них процессы были использованы в той или иной классификации почв в качестве значимых для выделения почв. От этого зависит география каких свойств почв и процессов будет отражена на той или иной почвенной карте. При этом необходимо принимать во внимание, что для решения практических задач в подавляющем большинстве случаев требуется информация об отдельных конкретных свойствах почв. Причем для решения разных задач набор необходимых свойств почв различен и может достигать несколько десятков (van Diepen et al., 1991; Driessen, Konijn,

1992; De la Rosa, van Diepen, 2002; Costantini, 2017).

Классификации почв, которые используются в России, позиционируются как “базовые” (Классификация и диагностика…, 1977, 2004). Они классифицируют почвы как естественно-исторические образования, то есть безотносительно целей и задач сельского хозяйства. И подавляющая часть крупномасштабных и среднемасштабных почвенных карт в стране построена на базе именно этих классификаций. Это приводит к тому, что большая часть свойств почв, важных для решения сельскохозяйственных задач, является классификационно незначимыми. Поэтому использование традиционных почвенных карт для экстраполяции значимых для сельского хозяйства свойств почв вряд ли может дать кондиционные результаты и приводит к большим ошибкам. На определенном этапе развития науки и практики, уровень этих ошибок был более-менее приемлем. Но в настоящее время уже очевидно, что необходим и возможен переход на использование более точных данных.

2. Генерализованность изображения почв на картах.

Схематичность отображения почв на картах связана как с их масштабом, так и с классификационным положением почв.

Даже те свойства, которые важны для сельского хозяйства, и которые значимы для классификации почв, можно “вывести” из классификационного названия почв лишь в виде неких градаций, которые иногда излишне широки для практического использования. Построение карт подобных свойств почв на основе традиционной почвенной карты в виде картограмм является широко используемым приемом, но позволяет получать информацию лишь в этих широких градациях (Савин, 2016).

Любая почвенная карта является обобщенной моделью почвенного покрова территории (Савин и др., 2019). Поэтому информация о неоднородностях почв даже на картах масштаба 1 : 10 000 достаточно генерализована. Карты же более мелкого масштаба, по сути, уже мало чем отличаются от районирований (то есть отражают некие районы с закономерным варьированием почв в пространстве). Использование подобной генерализованной информации для решения практических задач в сельском хозяйстве также сильно ограничено.

3. Принципы построения почвенных карт не предусматривают отражение на них тех процессов, которые реально протекают в почвах в текущий момент, и которые важны при практическом использовании почвенной информации в сельском хозяйстве. Речь при этом не идет о процессах, которые сформировали почвенный профиль (например, процессы оподзоливания, гумусонакопления, осолонцевания и т. п.). То, что эти процессы сформировали профиль почвы на протяжении ее существования в течение столетий и тысячелетий, не вызывает сомнения, но то, что они продолжают действовать и в данный момент, не очевидно. Однако именно эта информация и важна для практического использования почвенных данных, а не сведения о том, как формировался профиль почвы за время ее существования. Кроме того, эти сведения на традиционных почвенных картах также отсутствуют.

Преодолеть вышеупомянутые ограничения почвенных карт можно несколькими путями.

1. Необходимо решить проблему схематичности отражения почвенных свойств на картах. Так как основной причиной схематичности почвенной карты является то, что на ней отображаются классификационные выделы почв, то наиболее логичным является переход от традиционных почвенных карт (с показом почв в той или иной классификационной системе) к созданию серий карт конкретных свойств почв. Каждое свойство почв имеет свою географию, которая может быть отличной от географии классификационного выдела почв. Поэтому наиболее точно эта география может быть отражена, когда картографируется именно отдельное свойство, а не приписывается некое усредненное значение свойства классификационному выделу почвы. Таким образом, почвенная карта как таковая должна потерять свое значение для решения практических задач в сельском хозяйстве, а на смену ей должны прийти наборы карт отдельных, сельскохозяйственно значимых свойств почв. Но для этого должны быть разработаны надежные методы картографирования отдельных свойств почв. Наиболее перспективным является базирование этих методов на использовании данных бесконтактного зондирования, включая спутниковые данные (Савин, Симакова, 2012), данные, получаемые с БПЛА

(Huuskonen, Oksanen, 2018), данные наземных бесконтактных сенсоров (Viscarra Rossel et al., 2010), данные георадарного зондирования (De Benedetto et al., 2015) и т. п. В сочетании с технологиями цифровой почвенной картографии (McBratney et al., 2003; Arrouays et al., 2018) эти данные уже в ближайшей перспективе позволят решить задачу картографирования отдельных свойств почв, а не их классификационных выделов.

При движении в данном направлении в перспективе исчезает необходимость картографирования почв как обособленных природных тел или их комбинаций. Более того, после построения карт отдельных свойств почв может при необходимости решаться и задача установления по комплексу подобных карт обособленных почвенных тел на основе подходов, предлагаемых В.А. Рожковым для классификации почв (Рожков, 2013). Но эта задача имеет смысл лишь для дальнейшего развития фундаментального почвоведения, а не для решения практических задач.

2. При этом, конечно же, речь не идет о составлении карт отдельных свойств почв в традиционном, бумажном, виде. Речь, по сути, идет о создании геоинформационных многослойных растровых баз данных, где к каждому пикселю, помимо его географических координат и данных о его размерах, привязана информация о значении того или иного свойства почв.

При таком подходе важное значение при создании базы данных приобретает выбор размера пикселя. В идеале пиксель должен быть однородным по всем привязанным к нему свойствам почв. То есть в пределах пикселя свойство почв не должно меняться. Достичь этого на практике практически невозможно, так как большинство свойств почв сильно варьирует в пространстве. Поэтому точнее говорить о квазиоднородности свойства почв внутри пикселя. Другим подходом может быть привязка к пикселю атрибутивной информации о пространственном варьировании свойства почв в пикселе. В этом случае размер пикселя должен определяться спецификой решаемых на основе почвенной базы данных задач.

Другой важной проблемой является то, что разные свойства почв имеют разную специфику пространственного варьирования: одно свойство может сильно изменяться в пределах метра, а дру-

гое может быть практически неизменным на расстоянии в сотни метров (Фридланд, 1972). Следовательно, в идеальном случае для каждого свойства может быть выбран свой оптимальный размер пикселя, при котором география этого свойства может быть отражена практически без потери информации. Но в любом случае при совместном анализе карт отдельных свойств все они должны будут приведены к единому размеру пикселя (самому малому по площади).

Таким образом, традиционная почвенная карта должна быть заменена базой данных элементарных участков (пикселей), к которым привязана атрибутивная информация о географических координатах пикселя, его размере и значениях свойств почв в каждом конкретном пикселе. В настоящий момент считается, что оптимальной для пикселя является квадратная форма. Но в перспективе ничто не мешает создавать базы данных с пикселями иной формы (например, с вокселами или текселами).

Преимуществом подобных пиксельных баз данных, по сравнению с традиционными почвенными картами, является также и то, что подобное представление данных значительно облегчает и делает более качественным компьютерный анализ данных о почвах с данными о других свойствах земель.

3. Таким образом, переход к пискельным базам данных открывает широкие возможности для пространственного моделирования современных почвенных процессов и внесения информации о них в базу данных. Подобное моделирование должно опираться на свойства почв, строение профиля почв, а также на информацию об их использовании, метеорологических условиях и рельефе. Подходы к подобному моделированию уже разрабатываются (Gobin, 2000; Bui et al., 2006) и уже в ближайшее время смогут быть использованы для решения этой задачи.

ВЫВОДЫ

Вышеизложенное позволяет сделать следующие выводы.

1. Повышение практической значимости почвоведения в настоящее время невозможно как без технологической модернизации почвенного картографирования, так и без смысловой, методологической.

2. Уже совершившийся переход к цифровым технологиям в картографии диктует необходимость перехода от традиционных почвенных карт к пиксельным пространственным почвенным базам данных.

3. Информационная нагрузка и точность почвенных карт может и должна быть увеличена за счет перехода от картографирования положения почвы в той или иной классификации на картографирование отдельных, сельскохозяйственно значимых свойств почв.

4. Для решения практических сельскохозяйственных задач важно дополнить информацию почвенных карт сведениями о современных процессах, протекающих в почвах, которые могут быть получены на основе пространственного цифрового моделирования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Дубенок Н.Н., Смарыгин С.Н., Ромашкин К.И.* Теоретические основы развития сельскохозяйственной мелиорации. М.: РГАУ – МСХА, 2009. 545 с.

2. *Кирейчева Л.В.* Мелиорация // Большая российская энциклопедия. Т. 19. М. 2011. С. 674–675.

3. *Кирюшин В.И.* Агрономическое почвоведение. СПб. 2013. 686 с.

4. *Классификация и диагностика почв России* / сост. Л.Л. Шишов, В.Д. Тонконогов, И.И. Лебедева. Смоленск: Ойкумена, 2004. 342 с.

5. *Классификация и диагностика почв СССР* / сост. В.В. Егоров, В.М. Фридланд, Е.Н. Иванова, Н.Н. Розов, В.А. Носин, Т.А. Фриев. М.: Колос, 1977. 220 с.

6. *Ладонин В.Ф.* Агрохимия // Большая российская энциклопедия. Т. 1. М. 2005. 200 с.

7. *Минеев В.Г., Сычев В.Г., Гамзиков Г.П., Шеуджен А.Х., Агафонов Е.В., Белоус Н.М., Егоров В.С., Подколзин А.И., Романенков В.А., Торшин С.П., Лапа В.В., Цыганов А.Р., Персикова Т.Ф., Елешев Р.Е., Сапаров А.С.* Агрохимия. М.: ВНИИА, 2017. 854 с.

8. *Рожков В.А.* Классификация почв – не место для дискуссий // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2013. Вып.72. С. 47–64. DOI: 10.19047/0136-1694-2013-72-47-64.

9. *Савин И.Ю.* Классификация почв и земледелие // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2016. Вып. 84. С. 3–9. DOI: 10.19047/0136-1694-2016-84-3-9.

10. *Савин И.Ю., Симакова М.С.* Спутниковые технологии для инвентаризации и мониторинга почв в России // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2012. 9 (5). С. 104–115.
11. *Савин И.Ю., Столбовой В.С., Иванов А.Л., Прудникова Е.Ю., Жоголев А.В., Воронин А.Я.* Технологии составления и обновления почвенных карт. М.: Перо, 2019. 328 с.
12. *Фридланд В.М.* Структура почвенного покрова. М.: Мысль, 1972. 336 с.
13. *Шоба С.А.* Почвоведение // Большая российская энциклопедия. Т. 27. М. 2015. С. 310–311.
14. *Arrouays D., Savin I., Leenaars J., McBratney A.B. (eds.)* GlobalSoilMap – Digital Soil Mapping from Country to Globe. Balkem: CRC Press, 2018. 174 p.
15. *Bui E.N., Henderson B.L., Viergever K.* Knowledge discovery from models of soil properties developed through data mining // Ecological Modelling. 2006. Issue 3–4. Vol. 191. P. 431–446. DOI: 10.1016/j.ecolmodel.2005.05.021.
16. *Costantini E.A.C.* Manual of Methods for Soil and Land Evaluation. CRC Press, 2017. 564 p.
17. *De Benedetto D., Quarto R., Castrignanò A., Palumbo D.A.* Impact of Data Processing and Antenna Frequency on Spatial Structure Modelling of GPR Data // Sensors. 2015. Vol. 15. Issue 7. P. 16430–16447. DOI: 10.3390/s150716430.
18. *De la Rosa D., van Diepen C.A.* Qualitative and Quantitative Land Evaluation, in 1.5. Land Use and Land Cover, in Encyclopedia of Life Support System (EOLSS-UNESCO). Oxford: Eolss Publishers, UK, 2002. URL: http://www.eolss.net.
19. *Driessen P.M., Konijn N.T.* Land use systems analysis. Wageningen Agric. Univ., The Netherlands, 1992. 230 p.
20. *Huuskonen J., Oksanen T.* Soil sampling with drones and augmented reality in precision agriculture // Computers and Electronics in Agriculture. 154. November 2018, P. 25–35. DOI: 10.1016/j.compag.2018.08.039.
21. IUSS Working Group WRB. World Reference Base for Soil Resources 2006, first update 2007 // World Soil Resources Reports. Rome: FAO, 2007. No. 103. 116 p.
22. *Gobin A.* Participatory and spatial-modeling methods for land resources analysis. PhD thesis. Katholik Universiteit. Leuven. 2000. 282 p.
23. *McBratney A., Mendonça Santos M., Minasny B.* On digital soil mapping // Geoderma. 2003. Vol. 117. Issue 1–2. P. 3–52. DOI: 10.1016/S0016-7061(03)00223-4.

24. Soil Taxonomy. A basic System of Soil Classification for Making and Interpreting Soil Surveys. Washington DC. 1975.
25. *Van Diepen C.A., van Keulen H, Wolf J., Berkhout J.A.A.* Land Evaluation: From Intuition to Quantification. In: B.A. Stewart, ed, Advances in Soil Science. New York: Springer Verlag, 1991. P. 139–204.
26. *Viscarra Rossel R.A., McBratney A.B., Minasny B. (eds.)* Proximal Soil Sensing. Springer Netherlands, 2010. 448 p.

REFERENCES

1. Dubenok N.N., Smarygin S.N., Romashkin K.I., *Teoreticheskie osnovy razvitiya sel'skokhozyaistvennoi melioratsii* (Theoretical foundations of the development of agricultural reclamation), Moscow: RGAU – MSKhA, 2009. 545 p.
2. Kireicheva L.V., Melioratsiya (Reclamation), In: *Bol'shaya rossiiskaya entsiklopediya* (Big Russian Encyclopedia), Vol. 19, Moscow, 2011, pp. 674–675.
3. Kiryushin V.I., *Agronomicheskoe pochvovedenie* (Agronomic soil science), SaintPetersburg, 2013, 686 p.
4. Shishov L.L., Tonkonogov V.D., Lebedeva I.I. (eds.), *Klassifikatsiya i diagnostika pochv Rossii* (Classification and soil diagnostics of Russia), Smolensk: Oikumena, 2004, 342 p.
5. Egorov V.V., Fridland V.M., Ivanova E.N., Rozov N.N., Nosin V.A., Friev T.A., *Klassifikatsiya i diagnostika pochv SSSR* (Classification and soil diagnostics of the USSR), Moscow: Kolos, 1977, 220 s.
6. Ladonin V.F., Agrokhimiya (Agrochemistry), In: *Bol'shaya rossiiskaya entsiklopediya* (Big Russian Encyclopedia), Vol. 1, Moscow, 2005, 200 p.
7. Mineev V.G., Sychev V.G., Gamzikov G.P., Sheudzhen A.Kh., Agafonov E.V., Belous N.M., Egorov B.C., Podkolzin A.I., Romanenkov V.A., Torshin S.P., Lapa V.V., Tsyganov A.R., Persikova T.F., Eleshev R.E., Saparov A.S., *Agrokhimiya* (Agrochemistry), Moscow: VNIIA, 2017, 854 p.
8. Rozhkov V.A., Soil classification is not quite in place for discussion, *Dokuchaev Soil Bulletin*, 2013, Vol. 72, pp. 47–64, DOI: 10.19047/0136-1694-2013-72-47-64.
9. Savin I.Yu., The Classification of Soils and Agriculture, *Dokuchaev Soil Bulletin*, 2016, Vol. 84, pp. 3–9, DOI: 10.19047/0136-1694-2016-84-3-9.
10. Savin I.Yu., Simakova M.S., Sputnikovye tekhnologii dlya inventari-zatsii i monitoringa pochv v Rossii (Satellite Technologies for Inventory and Soil Monitoring in Russia), *Sovremennye problemy distantsi-onnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa* (Modern problems of remote sensing of the Earth from space), 2012, 9 (5), pp. 104–115.

11. Savin I.Yu., Stolbovoi V.S., Ivanov A.L., Prudnikova E.Yu., Zhogolev A.V., Voronin A.Ya., *Tekhnologii sostavleniya i obnovleniya pochvennykh kart* (Technologies for compiling and updating soil maps), Moscow: Pero, 2019, 328 p.
12. Fridland V.M., *Struktura pochvennogo pokrova* (The structure of the soil cover), Moscow: Mysl', 1972, 336 p.
13. Shoba S.A., Pochvovedenie (Soil Science), In: *Bol'shaya rossiiskaya entsiklopediya* (Big Russian Encyclopedia), Vol. 27, Moscow, 2015, pp. 310–311.
14. Arrouays D., Savin I., Leenaars J., McBratney A.B. (eds.), *GlobalSoilMap – Digital Soil Mapping from Country to Globe*, Balkem: CRC Press, 2018, 174 p.
15. Bui E.N., Henderson B.L., Viergever K., Knowledge discovery from models of soil properties developed through data mining, *Ecological Modelling*, 2006, Issue 3–4, Vol. 191, pp. 431–446, DOI: 10.1016/j.ecolmodel.2005.05.021.
16. Costantini E.A.C., *Manual of Methods for Soil and Land Evaluation*, CRC Press, 2017, 564 p.
17. De Benedetto D., Quarto R., Castrignanò A., Palumbo D.A., Impact of Data Processing and Antenna Frequency on Spatial Structure Modelling of GPR Data, *Sensors*, 2015, Vol. 15, Issue 7, pp. 16430–16447, DOI: 10.3390/s150716430.
18. De la Rosa D., van Diepen C.A., Qualitative and Quantitative Land Evaluation, in 1.5. Land Use and Land Cover, In: *Encyclopedia of Life Support System (EOLSS-UNESCO)*, Oxford: Eolss Publishers, UK, 2002, URL: http://www.eolss.net.
19. Driessen P.M., Konijn N.T., *Land use systems analysis*, Wageningen Agric. Univ., The Netherlands, 1992, 230 p.
20. Huuskonen J., Oksanen T., Soil sampling with drones and augmented reality in precision agriculture, *Computers and Electronics in Agriculture*, 154, November 2018, pp. 25–35, DOI: 10.1016/j.compag.2018.08.039.
21. IUSS Working Group WRB. *World Reference Base for Soil Resources* 2006, first update 2007, World Soil Resources Reports, Rome: FAO, 2007, No. 103, 116 p.
22. Gobin A., *Participatory and spatial-modeling methods for land resources analysis. PhD thesis*, Katholik Universiteit, Leuven, 2000, 282 p.
23. McBratney A., Mendonça Santos M., Minasny B., On digital soil mapping, *Geoderma*, 2003, Vol. 117, Issue 1–2, pp. 3–52, DOI: 10.1016/S0016-7061(03)00223-4.
24. *Soil Taxonomy, A basic System of Soil Classification for Making and Interpreting Soil Surveys*, Washington DC, 1975.

25. Van Diepen C.A., van Keulen H, Wolf J., Berkhout J.A.A., Land Evaluation: From Intuition to Quantification, In: B.A. Stewart (ed.), *Advances in Soil Science*, New York: Springer Verlag, 1991, pp. 139–204.
26. Viscarra Rossel R.A., McBratney A.B., Minasny B. (eds.), *Proximal Soil Sensing*, Springer Netherlands, 2010, 448 p.

УДК 631.48:551.583
DOI: 10.19047/0136-1694-2020-101-19-45

Ссылки для цитирования:
Панкова Е.И., Черноусенко Г.И. Проблема активизации засоления в почвах юга Восточной Сибири и Монголии в связи с аридизацией климата // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2020. Вып. 101. С. 19-45. DOI: 10.19047/0136-1694-2020-101-19-45
Cite this article as:
Pankova E.I., Chernousenko G.I., The problem of salinization activation in soils of the south of Eastern Siberia and Mongolia in connection with climate aridization, Dokuchaev Soil Bulletin, 2020, V. 101, pp. 19-45, DOI: 10.19047/0136-1694-2020-101-19-45

Проблема активизации засоления в почвах юга Восточной Сибири и Монголии в связи с аридизацией климата

© 2020 г. Е. И. Панкова, Г. И. Черноусенко*

[1]*Почвенный институт им. В.В. Докучаева, Россия, 119017, Москва, Пыжевский пер, 7, стр. 2,*
https://orcid.org/0000-0001-6367-5839, e-mail:chergi@mail.ru.

Поступила в редакцию 30.01.2020, *после доработки* 11.02.2020, *принята к публикации* 04.03.2020

Резюме: В работе рассмотрено влияние климатических изменений, связанных с аридизацией, на засоленность почв в котловинах юга Восточной Сибири и Монголии. Проанализированы данные, характеризующие аридность климата котловин юга Восточной Сибири за 50 лет. На юге Восточной Сибири с 1955 г. по 2015 г. рост температуры воздуха был выше, чем по миру в целом. В котловинах Тувы рост температуры воздуха составил 2.5–3.7 °С; в Минусинской котловине – 1.7–2.8 °С, в котловинах Бурятии – 1.5–1.8 °С; коэффициент детерминации для скользящих средних за 20 лет (R^2) составил 0.9–0.95, изменения достоверны – критерий Стьюдента 19–35. Изменения коэффициента аридности были в пределах 0.02–0.14, согласно критерию Стьюдента они достоверны (t = 7.4– -22), при этом в Минусинской котловине наблюдалось снижение аридизации, а в остальных регионах – ее рост. Таким образом, в целом для изучаемых регионов констатирована разнонаправленность процессов аридизации климата. В Минусинской котловине, несмотря на некоторое понижение аридизации, изменения

категории (по классификации Лобовой и др. (1977)) за этот период не произошло, территория осталась в категории аридной и субаридной. Несмотря на рост аридизации климата в котловинах Тувы и Бурятии, в большинстве из них также не отмечен переход в другую более аридную категорию. Тем не менее в ряде котловин юга Восточной Сибири констатирован рост аридизации с переходом в более аридную категорию. Это относится к Еравненской и Баргузинской котловинам Бурятии, перешедших из слабо аридных в субаридные, а также к Убсунурской котловине Тувы, которая из аридной перешла в сильно аридную. Для котловин юга Восточной Сибири, где зафиксирована аридизация климата, возник вопрос о возможной активизации процесса засоления почв. Для решения этой проблемы были привлечены материалы по засоленности почв аридных регионов Монголии. Было установлено, что повышение аридности климата даже в крайнеаридных пустынях Гоби, где почвообразующие породы не засолены, в автоморфных условиях почвы практически не засолены (сумма солей не превышает 0.1%). В районах распространения засоленных мел-палеогеновых красноцветных отложений автоморфные почвы засолены, при этом сумма солей может превышать 2.5%. Таким образом, в крайнеаридных климатических условиях засоление автоморфных почв может колебаться от незасоленных до сильно засоленных. В гидроморфных условиях котловин юга Восточной Сибири, так же, как и в Монголии, аридизация климата неизбежно приводит к активизации процесса соленакопления, поэтому в котловинах Тувы и Бурятии, испытывающих аридизацию климата, следует ожидать процесса засоления почв в гидроморфных ландшафтах.

Ключевые слова: изменение климата, индекс аридности, засоление автоморфных и гидроморфных почв, Хакасия, юг Красноярского края, Тува, Бурятия, Монголия.

The problem of salinization activation in soils of the south of Eastern Siberia and Mongolia in connection with climate aridization

E. I. Pankova, G. I. Chernousenko[*]

[1]*V.V. Dokuchaev Soil Science Institute,*
7 Bld. 2 Pyzhevskiy per., Moscow 2119017, Russian Federation,
[*]*https://orcid.org/0000-0001-6367-5839, e-mail: chergi@mail.ru.*

Received 30.01.2020, *Revised* 11.02.2020, *Accepted* 04.03.2020

Abstract: The influence of climate aridization on soil salinity in the basins of the south of Eastern Siberia and Mongolia is considered in the article. The data characterizing the climate aridity of the basins of the south of Eastern Siberia over 50 years are analyzed. In the south of Eastern Siberia from 1955 to 2015, the increase in air temperature was higher than in the whole world. In the basins of Tuva, the increase in air temperature was 2.5–3.7 °C; in the Minusinsk depression – 1.7–2.8 °C, in the basins of Buryatia – 1.5–1.8 °C; the coefficient of determination for moving averages over 20 years (R^2) was 0.9–0.95, the changes are significant – Student's criterion 19–35. Changes in the aridity coefficient were in the range of 0.02–0.14; according to the Student criterion, they were significant (t = 7.4 – -22), while a decrease in aridization was observed in the Minusinsk depression and its growth in other regions. Thus, in general, for the studied regions, the multidirectionality of the processes of climate aridization has been ascertained. In the Minusinsk depression, despite a slight decrease in aridization, category changes (according to the classification of Lobova et al., 1977) did not occur during this period, the territory remained in the arid and subarid categories. Despite the increase in climate aridization in the basins of Tuva and Buryatia, most of them also did not show a tendency to more arid category. Nevertheless, in a number of hollows in the south of Eastern Siberia, an increase in aridization with a transition to a more arid category was observed. This applies to the Eravnensky and Barguzinsky basins of Buryatia, which switched from weakly arid to subarid, as well as to the Ubsunur basin of Tuva, which turned from arid to strongly arid. For the basins of the south of Eastern Siberia, where climate aridization was recorded, the question arose about the possible activation of the process of soil salinization. To solve this problem, materials were collected on soil salinity in the arid regions of Mongolia. It was found that an increase in climate aridity even in the extreme arid deserts of the Gobi, where parent rocks are not saline, under automorphic conditions, the soil is practically not saline (the amount of salts does not exceed 0.1%). In areas where saline Cretaceous-Paleogene red sediments are spread, automorphic soils are saline, and the amount of salts may exceed 2.5%. Thus, in extremely arid climatic conditions, salinization of automorphic soils can range from non-saline to highly saline. Under the hydromorphic conditions of the basins of the south of Eastern Siberia, as well as in Mongolia, climate aridization inevitably leads to an intensification of the salt accumulation process, therefore, in the basins of Tuva and Buryatia experiencing climate aridization, a process of soil salinization in hydromorphic landscapes should be expected.

Keywords: climate change, aridity index, salinization of automorphic and hydromorphic soils, Khakassia, south of the Krasnoyarsk Territory, Tuva, Buryatia, Mongolia.

ВВЕДЕНИЕ

В последние десятилетия в мире широко обсуждается проблема аридизации климата и процесса опустынивания, а также их последствия, вызывающие деградацию земель, в частности, связанную с усилением засоления почв в аридных и семиаридных регионах (Конвенция ООН…, 1994; Ковда, 1980; Зонн, 1997; Розанов, 1992; Залибеков, 2011; Behnke, 2012; Climate and Land Degradation, 2005; Dregne, 2002; Geist, 2005; Le Hou´erou, 1996 и др.). Разрабатываются десятки возможных сценариев развития климата на планете (IPCC, 2001; Mitchell et al., 2004).

По данным А.Н. Золотокрылина (2005), анализирующего климатические условия на равнинах Центральной Азии, "характерной особенностью климатических изменений указанного региона является одновременное уменьшение осадков в одном регионе и увеличение в другом". Автор приходит к выводу, что изменение регионального климата в Центральной Азии колеблется согласно специфике субрегионов, и потому нет оснований предполагать, что тенденция аридизации будет распространяться по всей территории в течение следующих десятилетий. В другой работе (Золотокрылин и др., 2007) говорится о том, что "нет основания утверждать о систематическом расширении аридизации и усилении ее интенсивности на территории Монголии", хотя в отдельных регионах Центральной Азии она локально проявляется. Это подтверждают и данные других публикаций (Национальный доклад…, 2019).

Ранее авторами были подробно изучены климатические особенности территории и гранулометрический состав автоморфных почв сухостепной зоны юга Восточной Сибири и их влияние на своеобразие почв региона (Рухович и др., 2019). Было установлено, что здесь господствуют почвы легкого гранулометрического состава, редко засоленные в автоморфных ландшафтах (Панкова, Черноусенко, 2018; Черноусенко, Курбатская, 2017).

Цель данной статьи – рассмотрение проблемы, связанной с изменением климата в степных, сухостепных и пустынных регионах юга Восточной Сибири и Монголии, и выявление возможного влияния этого процесса на засоленность почв данных регионов.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Для решения этой проблемы на территорию юга Восточной Сибири в местах распространения засоленных почв были собраны и проанализированы материалы, характеризующие климатические показатели за последние 50–60 лет по 11 метеостанциям, расположенным в 8 межгорных котловинах (Минусинская, Улугхемская, Убсунурская, Каргынская, Баргузинская, Тункинская, Еравненская, Удинская) и на юге Бурятии в Селенгинском среднегорье (Кяхта). Расположение метеостанций и их синоптические индексы (пятизначный уникальный цифровой индивидуальный идентификатор метеостанции, утверждаемый Всемирной Метеорологической Организацией (№ ВМО)) показаны на рисунке 1. Все метеостанции расположены в районах, на территории которых распространены засоленные почвы.

Анализировались следующие климатические показатели: среднегодовая температура воздуха, испаряемость, суммарное годовое количество осадков, коэффициент увлажнения и континентальность климата (Черноусенко, Хитров, 2019). В данной работе дополнительно был рассчитан и проанализирован коэффициент (индекс) аридности климата, позволяющий оценить направленность процесса аридизации в котловинах юга Восточной Сибири, а также установить, как этот процесс будет сказываться на засолении почв этих регионов. Индекс аридности рассчитывался по формуле: $IA=\Sigma P_{1\text{-}12} / (5.12 \cdot \Sigma t_{4\text{-}10} + 306)$ (Мезенцев, Карнацевич, 1969). Где IA – индекс аридности, $\Sigma P_{1\text{-}12}$ –сумма осадков за год в мм, $\Sigma t_{4\text{-}10}$ – сумма среднемесячных температур теплого периода (апрель – октябрь). Расчет по этой формуле приведен по нескольким причинам. Используемые для расчетов данные есть на всех метеостанциях, в отличие от данных по эвапотранспирации, которые используются в расчетах западных исследователей (UNESCO, 1977; Le Hou´erou, 1996; Trabucco, Zomer, 2009; https://csidotinfo.files.wordpress.com/2019/01/global-aridity-and-global-pet-methodology.pdf).

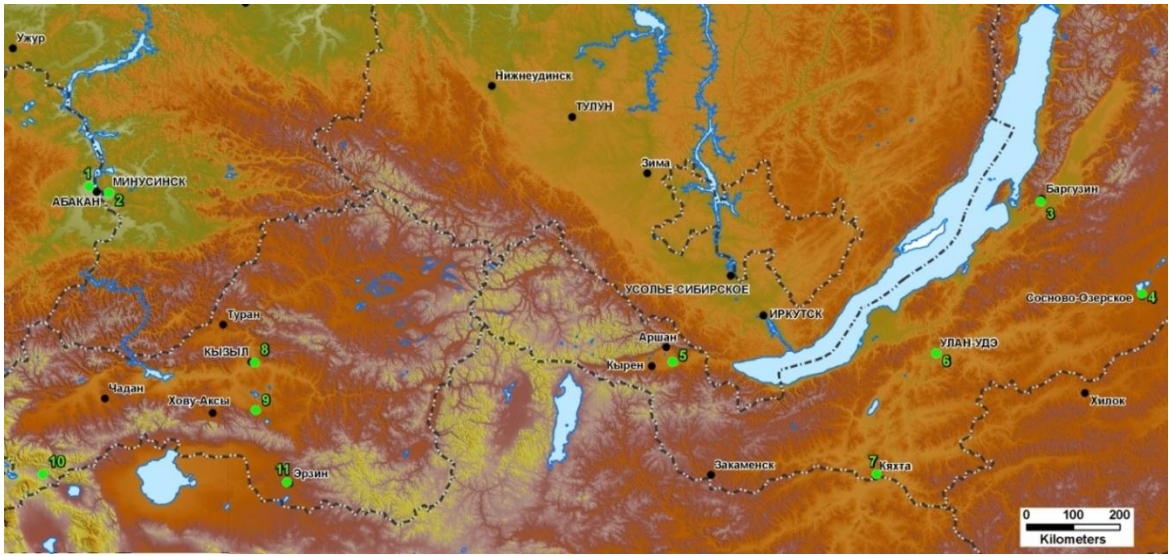


Рис. 1. Расположение метеостанций юга Восточной Сибири, данные которых были использованы в работе. 1 – № 29862 Абакан; 2 – № 29866 Минусинск; 3 – № 30636 Баргузин; 4 – № 30745 Сосново-Озерское; 5 – № 30811 Тунка; 6 – № 30823 Улан-Удэ; 7 – № 30925 Кяхта; 8 –№ 36096 Кызыл; 9 – № 36099 Сосновка; 10 – № 36278 Мугур-Аксы; 11 – № 36307 Эрзин.

Fig. 1. Location of weather stations in the south of Eastern Siberia, the data of which were used in the work. 1 – No. 29862 Abakan; 2 – No. 29866 Minusinsk; 3 – No. 30636 Barguzin; 4 –No. 30745 Sosnovo-Ozerskoye; 5 – No. 30811 Tunka; 6 – No. 30823 Ulan-Ude; 7 – No. 30925 Kyakhta; 8 – No. 36096 Kyzyl; 9 – No. 36099 Sosnovka; 10 – No. 36278 Mugur-Aksy; 11 – No. 36307 Erzin.

Кроме того, расчет с использованием данных по эвапотранспирации не всегда приводит к удовлетворительным результатам, тогда как данные, полученные по формуле Мезенцева, Карнацевича (1969), разделили исследуемую территорию более логично и соответственно их ландшафтам.

Оценка степени аридности территории проводилась по классификации, предложенной Лобовой с соавт. (1977), на основе этого индекса аридности (IA): крайне аридные – < 0.16; сильно аридные – 0.16–0.30; аридные – 0.31–0.45; субаридные – 0.46–0.60; слабо аридные – 0.61–0.80; периодически аридные – 0.8–1.0.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Климат котловин юга Восточной Сибири очень и резко континентальный. Это криоаридные территории, где среднегодовые температуры воздуха отрицательные, хотя в некоторых районах в последние годы наблюдается переход среднегодовых температур в положительные значения (Улан-Удэ, Кяхта (Бурятия)). В районах распространения засоленных почв юга Восточной Сибири наблюдается значительный (выше, чем по миру в целом) достоверный тренд увеличения среднемноголетних среднегодовых температур воздуха. Так, с 1950 г. по 2012 г. рост приповерхностной среднегодовой температуры над сушей по миру в целом составил 0.9–1.2 °С, по России он был выше – 1.2–1.4 °С (Второй оценочный доклад..., 2014). На юге Восточной Сибири с 1955 г. по 2015 г. максимальный рост температуры воздуха наблюдался в Туве – 2.5–3.7 °С; ниже в Минусинской котловине – 1.7–2.8 °С, еще ниже в Бурятии – 1.5–1.8 °С; коэффициент детерминации для скользящих средних за 20 лет (R^2) составил 0.9–0.95, критерий Стьюдента 19–35, т.е. изменения достоверны (Черноусенко, Хитров, 2019). Максимальная скорость роста температуры воздуха в Туве приближается к наибольшей скорости, отмеченной на Арктическом побережье России, где она составила более 0.7 °С за 10 лет (Второй оценочный доклад..., 2014).

Изменение суммарного годового количества осадков не имеет однозначной тенденции. В ряде котловин наблюдалось их достоверное снижение (Убсунурская, Каргынская котловины Тувы). Однако в большинстве котловин изменение осадков было не

достоверно, т. е. практически не изменилось, а в Минусинской котловине наблюдался небольшой, но достоверный тренд роста годовых осадков. Изменение испаряемости и КУ (по Высоцкому – Иванову) было разнонаправлено. Коэффициент увлажнения в ряде котловин Тувы (Убсунурская) и Бурятии (Еравненская, Удинская) снижался, в других, наоборот, возрастает (Баргузинская, Тункинская котловины Бурятии и Минусинская котловина). В остальных котловинах КУ практически не изменился (Черноусенко, Хитров, 2019). Таким образом, судя по КУ, однозначной направленности процесса аридизации климата в котловинах юга Восточной Сибири не наблюдалось. Более точно это определяется по коэффициенту аридизации, который и был нами рассчитан.

Расчет коэффициента (индекса) аридизации климата в целом подтвердил этот факт, хотя в большинстве котловин, за исключением Минусинской, наблюдалась тенденция к росту аридизации (рис. 2, 3 и 4). Как видно из рисунка 2, в Туве коэффициент аридности ($К_{ар}$) падал, что свидетельствует о росте аридизации, особенно сильном в Убсунурской (Эрзин) и Каргынской (Мугур-Аксы) котловинах юга Тувы. Изменения $К_{ар}$, согласно критерию Стьюдента, достоверны (t=-11 – -22).

Рисунок 3 демонстрирует достоверный тренд снижения аридизации в Минусинской котловине на территории Хакасии и на юге Красноярского края.

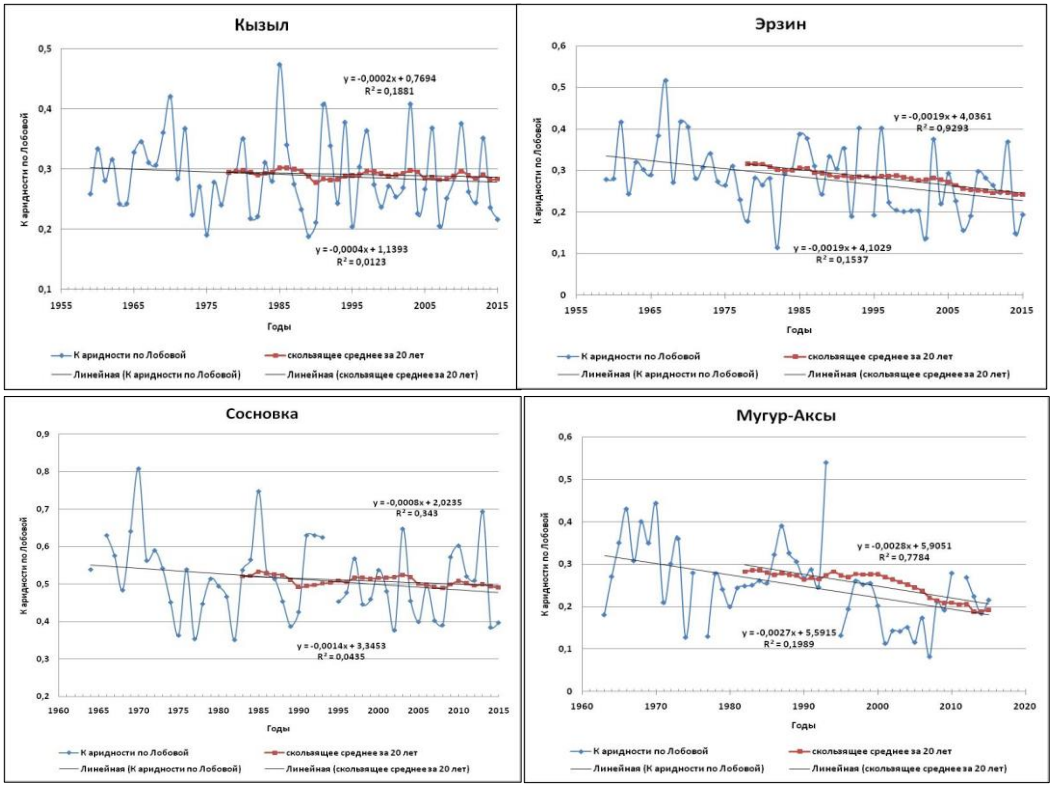


Рис. 2. Динамика коэффициента аридности и тренд скользящих среднемноголетних значений коэффициента аридности за 20 лет в разных котловинах Тувы.

Fig. 2. Dynamics of the aridity coefficient and the trend of moving average long-term values of the aridity coefficient over 20 years in different basins of Tuva.

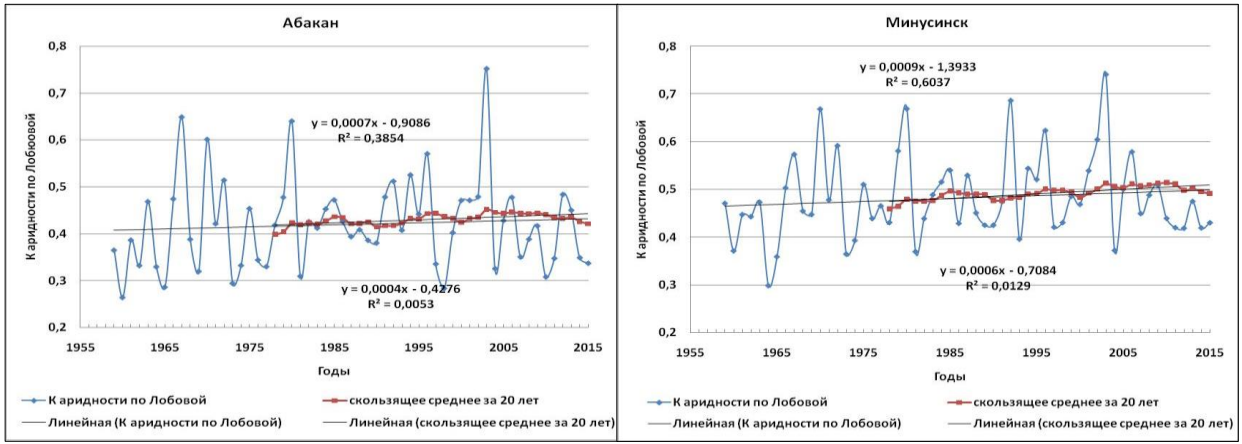


Рис. 3. Динамика коэффициента аридности и тренд скользящих среднемноголетних значений коэффициента аридности за 20 лет на юге Минусинской котловины.
Fig. 3. Dynamics of the aridity coefficient and the trend of moving average long-term values of the aridity coefficient over 20 years in the south of the Minusinsk depression.

Критерий Стьюдента (t) угла наклона регрессии составил для Минусинской котловины (t = 4.8 – 7.4 для Абакана и Минусинска соответственно), что свидетельствует об уменьшении аридности климата в этом регионе за последние 50 лет.

Изменение $К_{ар}$ в Бурятии показано на рисунке 4. За исследованный период $К_{ар}$ во всех котловинах Бурятии, кроме Тункинской, несколько снизился, что говорит о росте аридизации климата за последние 60 лет. Наиболее сильно это проявилось в Удинской котловине (Улан-Удэ). В Баргузинской и особенно в Еравненской котловине рост аридизации был не столь велик, но значения $К_{ар}$ перешли через границу диапазона (по классификации Лобовой с соавт., 1977), и эти котловины перешли в более аридную категорию к настоящему времени.

Согласно классификации, предложенной Лобовой с соавт. (1977), категория аридности имеет некоторый диапазон, поэтому, несмотря на тренд роста или снижения аридизации, в большинстве котловин за последние 50–60 лет смены категории аридности не произошло. Так, несмотря на снижение аридизации, Минусинская котловина осталась в категории аридных (центральная часть) и субаридных (наветренные предгорья). Несмотря на рост аридности, Каргынская высокогорная котловина Тувы и Улугхемская (центральная часть) остались в категории сильноаридных; Удинская (Бурятия) – аридных; Тункинская (Бурятия) – слабоаридных. Тем не менее, ряд котловин изменили категорию аридности– Еравненская и Баргузинская котловины Бурятии из слабоаридных перешли в категорию субаридных; Убсунурская – из аридной в сильноаридную.

Согласно критерию Стьюдента (t) угла наклона регрессии, увеличение степени аридности при уменьшении $К_{ар}$, достоверны (t колеблется в пределах -3 – -22).

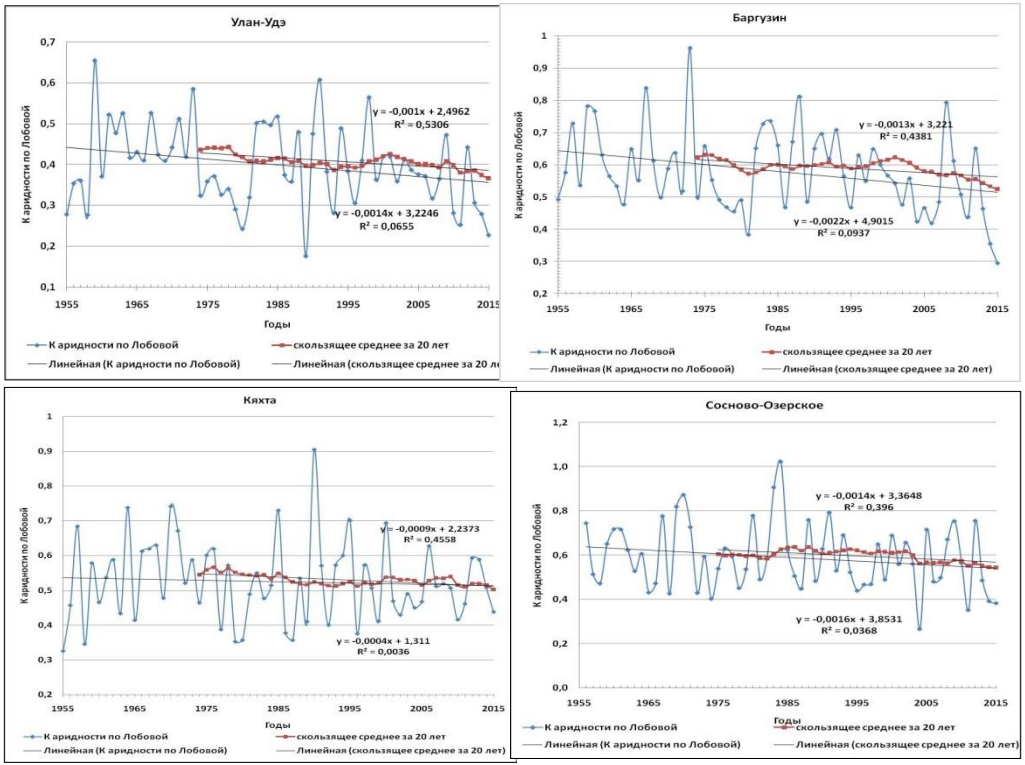


Рис. 4. Динамика коэффициента аридности и тренд скользящих среднемноголетних значений коэффициента аридности за 20 лет в разных котловинах Бурятии.

Fig. 4. Dynamics of the aridity coefficient and the trend of moving average long-term values of the aridity coefficient over 20 years in different basins of Buryatia.

Таким образом, статистическая обработка климатических параметров по данным 11 метеостанций юга Восточной Сибири показала, что однонаправленного процесса аридизации климата в котловинах этого региона не наблюдается. Этот вывод подтверждает вывод А.Н. Золотокрылина (2005) о разнонаправленности климатических изменений и в других регионах Центральной Азии.

Для того чтобы решить проблему возможной активизации процесса засоления на территории котловин юга Восточной Сибири, испытывающих аридизацию климата, авторами были привлечены материалы по семиаридным и аридным территориям Монголии, где проблема засоления и ее связь с климатическими показателями, в первую очередь с аридностью климата, была рассмотрена ранее (Панкова, 1992; Панкова, Конюшкова, 2013; Панкова, Конюшкова, 2013а; Гунин и др., 2018). Монголия рассматривалась авторами как природная модель, по которой анализировалось распространение и особенности засоления автоморфных и гидроморфных почв и климатических показателей сухих степей и пустынь Монголии.

Как показали данные исследования, площади распространения засоленных почв в аридных (пустынных), субаридных (полупустынных), а также в сухостепных зонах Монголии не связаны напрямую с климатическими показателями, характеризующими климат аридных территорий Монголии (Панкова, 1992). Было показано, что чрезвычайно высокая аридность климата не приводит к широкому развитию засоления в автоморфных пустынных и сухостепных почвах Монголии, что продемонстрировано на рисунке 5.

Как было показано ранее (Панкова, 1992; Панкова, Рубцова, 1983), небольшой процент участия засоленных почв в пустынных и сухих степях Монголии в первую очередь связан с малым распространением соленосных пород, а не с современным климатом. В Монголии формирование засоленных автоморфных почв происходит на мел-палеогеновых здасоленных породах (рис. 6, р. 225П) и практически отсутствует в почвах, формирующихся на пролювиальных незасоленных отложениях. Эта же закономерность наблюдается в котловинах юга Восточной Сибири.

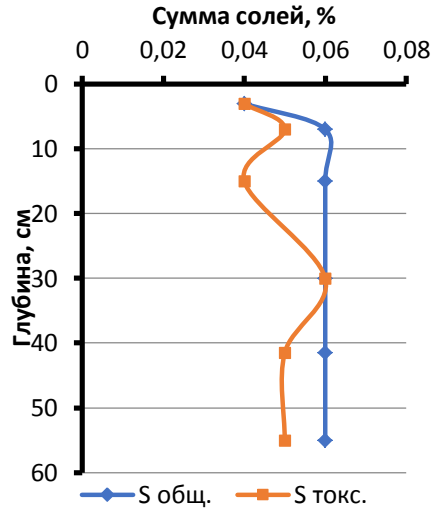


Рис. 5. Разрез 225Е. Монголия, низкая равнина Галбын-Гоби (восточная часть). Серо-бурая на аллювиально-пролювиальных отложениях (Панкова, 1992).
Fig. 5. Profile 225E. Mongolia, the low plain of Galbyn-Gobi (eastern part). Gray-brown on alluvial-proluvial deposits (Pankova, 1992).

Засоленность в автоморфных почвах аридных регионов проявляется в районах распространения девонских гипсоносных красноцветов. В качестве примера приведен солевой профиль южного чернозема, Минусинская котловина, юг Восточной Сибири (рис. 6, р. 40Х-12).

Иная картина наблюдается в почвах гидроморфных ландшафтов. Здесь процесс соленакопления напрямую связан с гидроморфизмом и аридностью климата. Изучение засоленных гидроморфных почв пустынь Монголии позволило утверждать, что они приурочены к природным оазисам, озерным котловинам и к долинам рек, а их засоленность в первую очередь определяется аридностью климата и увеличивается с ее ростом. При изучении засоления гидроморфных почв в оазисе Эйхийн-Гол в крайнеаридных пустынях Монголии авторами было зафиксировано наличие злостных солончаков, содержащих до 40–60% легкорастворимых солей в поверхностных горизонтах (рис. 7).

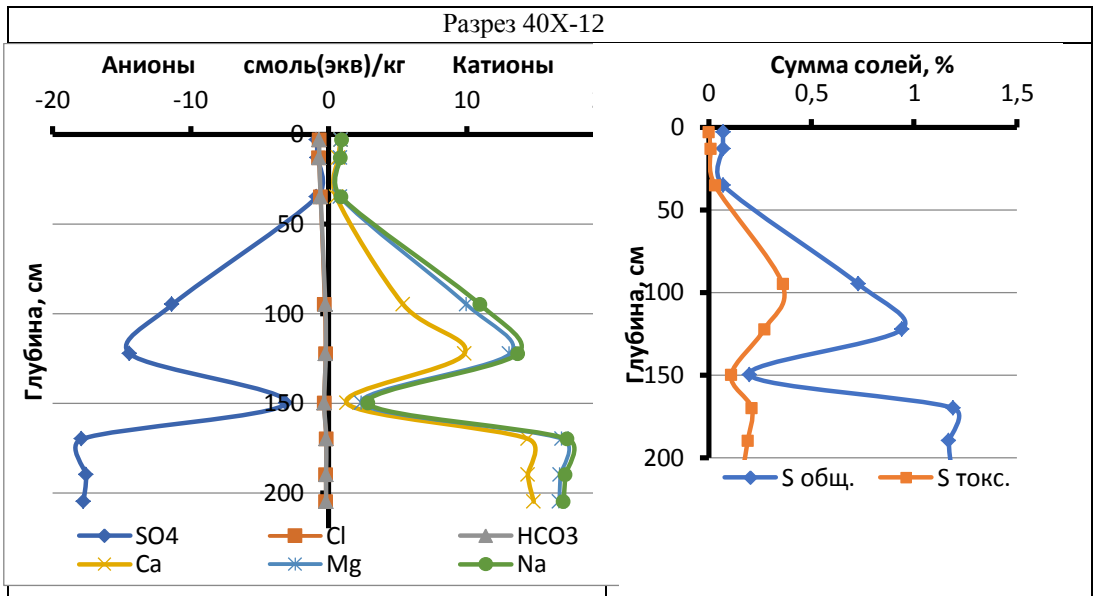


Рис. 6а. Солевые профили засоленных автоморфных почв. Разрез 40Х-12. Юг Восточной Сибири, Минусинская котловина, Хакасия. Чернозем южный солончаковый сульфатный с гипсом средней степени засоления на элювии плотных гипсов 53.522 с. ш., 90.9327 в. д., 324 м н.у.м. (Черноусенко Г.И.).

Fig. 6a. Salt profiles of saline automorphic soils. Profile 40X-12. South of Eastern Siberia, Minusinsk depression, Khakassia. Southern solonchak sulfate chernozem with gypsum of medium salinity on eluvium of dense gypsum (Chernousenko G.I.).

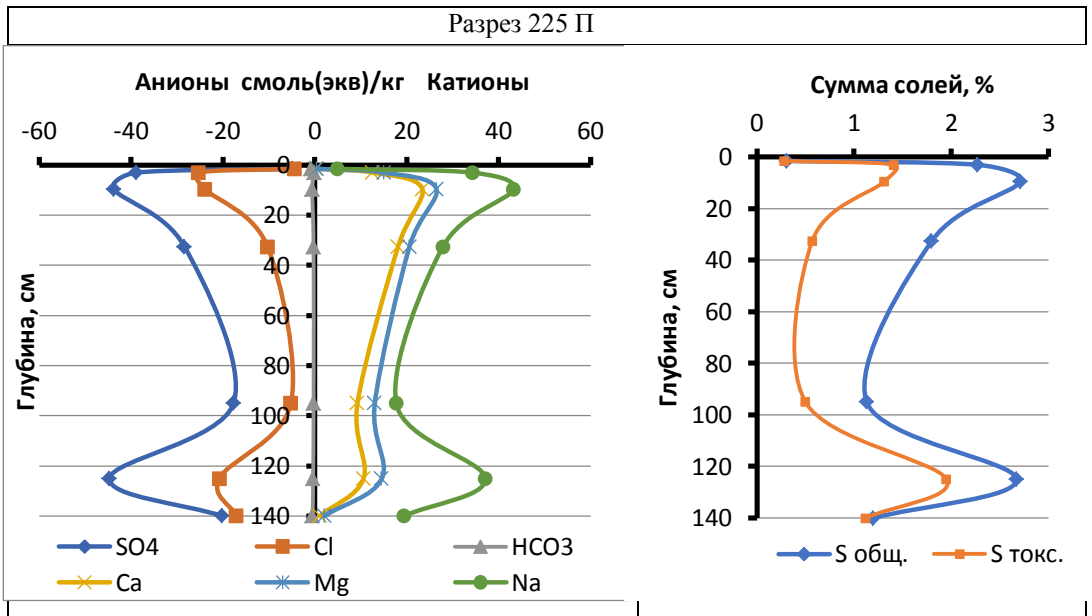


Рис. 6б. Солевые профили засоленных автоморфных почв. Разрез 225П. Монголия, Заалтайское Гоби. Древняя терраса сложенная красноцветами. Крайнеаридная на красноцветах мел-палеогеновых отложений (Панкова, 1992).

Fig. 6b. Salt profiles of saline automorphic soils. Profile 225P. Mongolia, Trans-Altai Gobi. Ancient terrace folded by red beds. Extreme arid on the red beds of the Cretaceous-Paleogene deposits (Pankova, 1992).

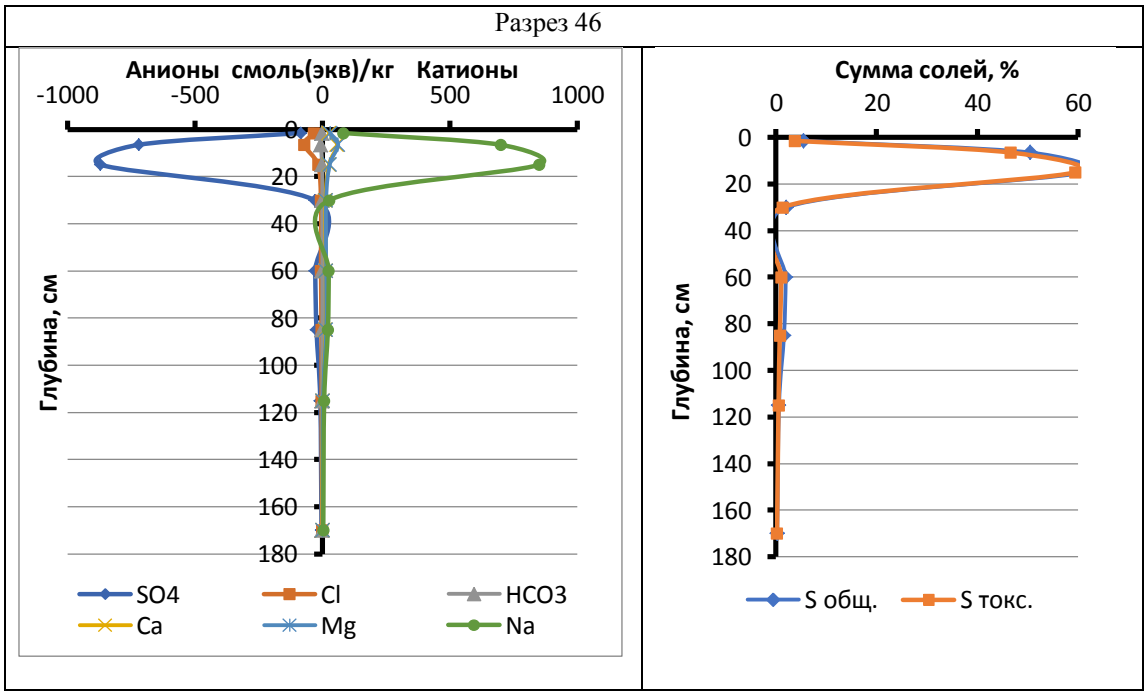


Рис. 7а. Монголия, оазис Эйхийн-Гол. Солончаки – разрез 46 (Панкова, 1992).
Fig. 7a. Mongolia, oasis Eihiyn-Gol. Solonchaks – profile 46 (Pankova, 1992).

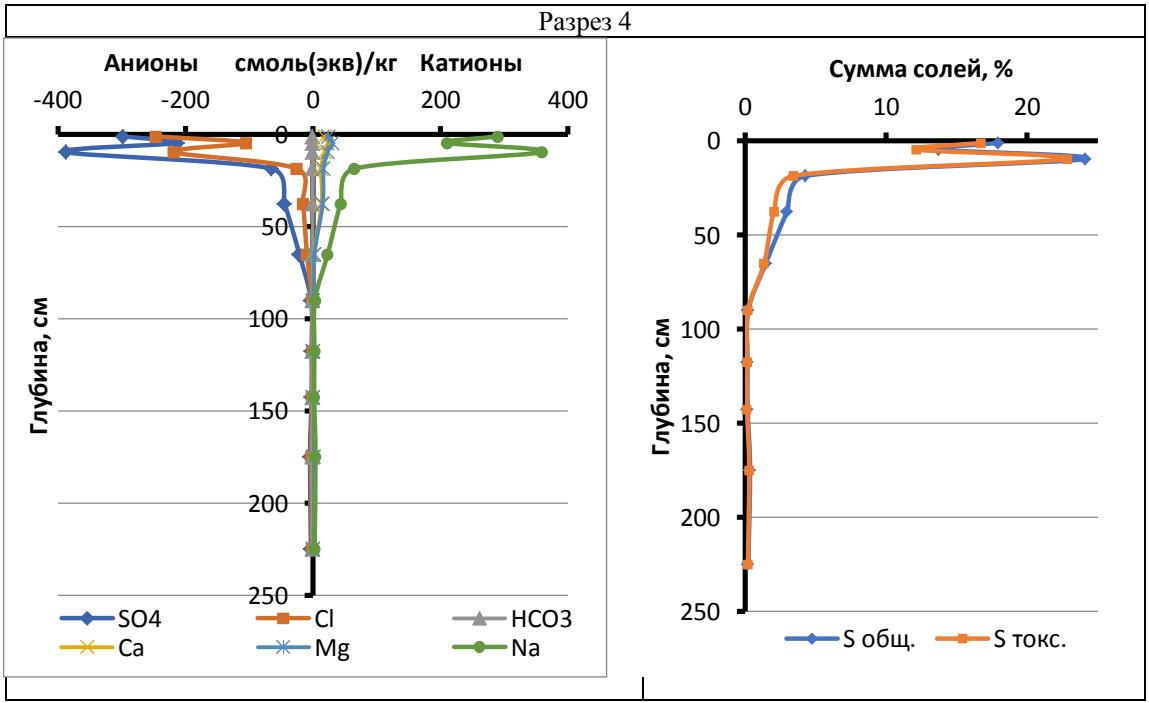


Рис. 7б. Монголия, оазис Эйхийн-Гол. Солончаки – разрез 4 (Панкова, 1992).
Fig. 7b. Mongolia, oasis Eihiyn-Gol. Solonchaks – profile 4 (Pankova, 1992).

При этом данные почвы формируются на слабоминерализованных, почти пресных грунтовых водах (Панкова и др., 2015).

Ранее для степной зоны по всей территории России был проведен сравнительный анализ распространения засоленных почв и климатических параметров по широте 53°44′ (Калинина и др., 2016). Из всех анализируемых климатических показателей наибольшая связь с наличием засоления почв выявилась с КУ Высоцкого – Иванова. Зависимость процента засоленных почв и КУ обратно пропорциональная. При этом $0.5 \leq КУ \leq 0.85$ является необходимым, обязательным, но недостаточным условием для развития засоления, т. к. в ряде случаев при высокой дренированности даже при КУ = 0.6 засоление почв отсутствует. При КУ больше 0.85 засоление почв обычно не встречается (Калинина и др., 2016).

Таким образом, проявление процесса засоления в гидроморфных ландшафтах напрямую связано с аридностью климата и дренированностью территории, на широту распространения засоленных автоморфных почв большое влияние оказывает палеогеографические особенности региона (Панкова, 2007).

Роль континентальности климата в процессах современного соленакопления в настоящее время относительно слабо изучена. Картографический анализ, проведенный авторами ранее по широте 53°44′, показал отсутствие зависимости доли засоленных почв от коэффициента континентальности (Калинина и др., 2016). Тем не менее, очевидно, что низкие температуры в условиях аридного и континентального климата приводят к сильному промерзанию почв, трансформации солевых новообразований и подтягиванию солей к зоне промерзания. Проблема роли промерзания почв в процессах соленакопления пока недостаточно изучена.

Анализ материалов, характеризующих засоленность почв котловин юга Восточной Сибири, в целом подтверждает вышеприведенные выводы, полученные при изучении почв Монголии. Здесь также широко распространены гидроморфные засоленные почвы, которые в основном приурочены к озерным депрессиям, нередко бессточным, и долинам рек. Питание этих озер часто происходит за счет разгрузки подземных минерализованных вод (озера Хакасии, Тувы, Бурятии). Значительный вклад подземного пи-

тания был отмечен и для почв Казахстана (Иванов, Глазовский, 1979). Автоморфные засоленные почвы имеют незначительное распространение, и их наличие определяется присутствием засоленных пород.

В заключение остановимся на возможных особенностях формирования засоленных территорий котловин в свете влияния аридизации климата на водный режим почв. При аридизации климата можно ожидать сокращение влаги в почвенной толще, поступающей за счет осадков. При этом важным моментом является ритм выпадения осадков и длительность периодов в году, когда КУ < 1 (Рухович и др., 2019). В рассматриваемых регионах выпадение осадков имеет четкий максимум (июль, август), причем в ряде котловин (Улугхемская, Тува) в летний период, несмотря на аридизацию, количество осадков возросло (Черноусенко, Хитров, 2019). При равномерном в течение года снижении КУ можно ожидать общего уменьшения нисходящих потоков почвенной влаги и уменьшения питания грунтовых вод за счет атмосферных осадков. В этом случае возможно расширение площадей почв, где капиллярная кайма опустится, и восходящее движение влаги прекратится (разрыв капиллярной каймы). При этом нарушается один из механизмов накопления солей в верхних почвенных горизонтах, что, впрочем, не означает их отсутствия в нижней части профиля почв. Такой механизм снижения площадей распространения процессов засоления предполагает значимое влияние атмосферных осадков на УГВ. В данной работе рассматриваются почвы межгорных котловин. Основным источником питания гидроморфных территорий здесь является речной сток и выклинивающиеся подземные воды. Оба источника формируются накоплением влаги в горах и не связаны напрямую с аридизацией климата котловин. В связи с этим авторы считают, что уменьшение атмосферного питания грунтовых вод гидроморфных почв котловин не скажется на уровне их гидроморфизма. Это отличает водные режимы котловин от обширных равнинных территорий (Казахстан, юг Европейской России и др.), где аридизация климата может привести к снижению УГВ, разрыву капиллярной каймы и, как следствие, к снижению площадей распространения засоления почв (Иванов, 1992). Этот процесс может проявиться, главным образом, в полугидромофных

почвах, которые имеют незначительное распространение на юге Восточной Сибири и в Монголии и в данной статье не рассматривались.

ВЫВОДЫ

1. В настоящее время в котловинах юга Восточной Сибири, так же, как и в регионах южной Монголии, однонаправленного изменения климата в связи аридизацией не наблюдается. В ряде регионов за последние 50–60 лет (Минусинская котловина) наблюдается снижение аридизации, хотя изменения категории (степени аридности) не произошло. В других котловинах, несмотря на тенденцию роста аридности за этот период времени, территории не изменили категорию аридности (Каргынская и Улугхемская котловины Тувы, Удинская, Тункинская Бурятии). Тем не менее ряд котловин перешел в более аридную категорию: Еравненская и Баргузинская котловины Бурятии из слабоаридных перешли в категорию субаридных; Убсунурская – из аридной в сильно аридную (по классификации Лобовой с соавт., 1977).

2. Анализ материалов, характеризующих засоленность автоморфных почв, свидетельствует о том, что проявление засоления как в Монголии, так и в котловинах юга Восточной Сибири связано в первую очередь с засоленностью почвообразующих пород, а не с аридностью климата.

3. Современный процесс засоления в условиях межгорных котловин юга Восточной Сибири и Монголии, определяемый аридностью климата, связан с гидроморфизмом, поэтому усиление аридности климата в этих условиях, вероятнее всего, приведет к активизации засоления почв.

4. Проблема влияния континентальности климата на процесс соленакопления требует дальнейшего изучения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Второй оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. М.: Росгидромет, 2014. 1008 с.

2. *Гунин П.Д., Панкова Е.И., Голованов Д.Л., Мандахбаяр Ж.* Экосистемы природных оазисов пустынной зоны Центральной Азии.

Часть 1. Эхийн-гол – природниковый оазис Заалтайской Гоби. М.: Тов-во научных изданий КМК, 2018. 216 с.
3. *Залибеков З.Г.* Аридные земли мира и их динамика в условиях современного климатического потепления // Аридные экосистемы. Т. 17. № 1 (46). 2011. С. 5–13.
4. *Золотокрылин А.Н.* Гетерогенность аридизации в центральной Азии в конце 20 века // Аридные экосистемы. 2005. Т. 11. № 26–27. С. 100–105.
5. *Золотокрылин А.Н., Гунин П.Д., Виноградова В.В., Бажа С.В.* Изменение климата и состояние растительного покрова Монголии в 20 веке // Экосистемы Внутренней Азии: вопросы исследования и охрана. М.: Типография Россельхозакадемии, 2007. С. 89–100.
6. *Зонн И.С.* Конференция ООН в Найроби: проблема опустынивания 20 лет спустя // Аридные экосистемы. 1997. Т. 3. № 6–7. С. 12–27.
7. *Иванов И.В.* Эволюция степных почв в галоцене. М.: Наука, 1992. 142 с.
8. *Иванов И.В., Глазовский Н.Ф.* Геохимический анализ почвенного покрова степей и пустынь. М.: Наука, 1979. 135 с.
9. *Калинина Н.В., Рухович Д.И, Панкова Е.И., Черноусенко Г.И, Королева П.В.* Картографический анализ зависимости распространения засоленных почв на территории России от ряда климатических характеристик (по широте 53°44′) // Почвоведение. 2016. № 11. С. 1–19. DOI: 10.7868/S0032180X16110046.
10. *Ковда В.А.* Аридизация суши и борьба с засухой. М.: Наука, 1980. 112 с.
11. Конвенция Организации Объединенных Наций по борьбе с опустыниванием в тех странах, которые испытывают серьезную засуху и/или опустынивание, особенно в Африке. 1994. 66 с.
12. *Лобова Е.В., Островский И.М., Хабаров А.В.* Об определении засушливости аридных областей мира // Проблемы освоения пустынь. Ашхабад: изд-во Ылым, 1977. № 4. С. 31–40.
13. *Мезенцев В.С., Карнацевич И.В.* Увлажненность Западно-Сибирской равнины. Л.: Гидрометеоиздат, 1969. 168 с.
14. Национальный доклад “Глобальный климат и почвенный покров России: опустынивание и деградации земель, институциональные, инфраструктурные, технологические меры адаптации (сельское и лесное хозяйство)” (под ред. Р.С.-Х. Эдельгериева). Т. 2. М.: ООО “Изд-во МБА”, 2019. 476 с.
15. *Панкова Е.И.* Генезис засоления почв пустынь. М.: Почвенный ин-т им. В.В. Докучаева, 1992. 136 с.
16. *Панкова Е.И.* Засоленность почв пустынь Монголии и Средней Азии как отражение современных и прошлых этапов развития пустынных

экосистем // Сб. тр. Экосистемы Внутренней Азии: вопросы исследования и охрана. М.: Типография Россельхозакадемии, 2007. С. 215–236.
17. *Панкова Е.И., Айдаров И.П., Голованов Д.Л., Ямнова И.А.* Засоление как основной почвообразовательный процесс в почвах природных оазисов Гобийских пустынь // Почвоведение. 2015. № 10. С. 1155–1167. DOI: 10.7868/S0032180X15100081.
18. *Панкова Е.И., Конюшкова М.В.* Влияние глобального потепления на засоленность почв аридных регионов // Бюл. Почвенного ин-та им. В.В. Докучаева. 2013. Вып. 71. С. 3–15. DOI: 10.19047/0136-1694-2013-71-3-15.
19. *Панкова Е.И., Конюшкова М.В.* Климат и засоленность почв Центральной Азии // Почвоведение. 2013а. № 7. С. 771–777. DOI: 10.7868/S0032180X13070071.
20. *Панкова Е.И., Рубцова Л.П.* Засоление почв сухих и опустыненных степей Монголии // Почвоведение. 1983. № 9. С. 13–21.
21. *Панкова Е.И., Черноусенко Г.И.* Сопоставление каштановых почв Центральной Азии с их аналогами в других почвенно-географических провинциях сухостепной зоны суббореального пояса Евразии // Аридные экосистемы. 2018. Т. 24. № 2 (75). С. 13–22. DOI: 10.24411/1993-3916-2018-00013.
22. *Розанов Б.Г.* Пустыня и опустынивание // Проблемы освоения пустынь. 1992. № 3. С. 45–48.
23. *Рухович Д. И., Панкова Е. И., Калинина Н. В., Черноусенко Г.И.* Количественный расчет параметров выделения зон и фаций каштановых почв России на основе почвенно-гранулометрических показателей // Почвоведение. 2019. № 3. С. 304–316. DOI: 10.1134/S0032180X1901012X.
24. *Черноусенко Г.И., Курбатская С.С.* Засоленность почв разных природных зон котловинных ландшафтов Тувы // Почвоведение. 2017. № 11. С. 1296–1311. DOI: 10.7868/S0032180X17110041.
25. *Черноусенко Г.И., Хитров Н.Б.* Изменение климата в зоне распространения засоленных почв криоаридных регионов на юге Восточной Сибири. // Экосистемы: экология и динамика. 2019. Т. 3. № 3. С. 5–57. DOI: 10.24411/2542-2006-2019-10038.
26. *Behnke R.H.* Desertification: causes, impacts and consequences. Spinger, 2012. 600 p.
27. *Climate and Land Degradation* // World Meteorological Organization WMO. 2005. No. 989. 34 p.
28. *Dregne H.E.* Land degradation in the dry lands // Arid Land Research and Management. 2002. Vol. 16. Iss. 2. P. 99–132.

29. *Geist H.* The causes and progression of desertification. Ashgate. 2005. 272 p.
30. IPCC. Climate Change 2001: The Scientific Basis // Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change / *J.T. Houghton, Y. Ding, D.J. Griggs, M. Noguer, P.J. van der Linden, X. Dai, K. Maskell, C.A. Johnson* (Eds.). Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2001. 881 p.
31. *Le Hou´erou Henry N.* Climate change, drought and desertification // Journal of Arid Environments. 1996. Vol. 34. Iss. 2. P. 133–185.
32. *Mitchell T.D., Carter T.R., Jones P.D., Hulme M., New M.* A comprehensive set of high-resolution grids of monthly climate for Europe and the globe: the observed record (1901–2000) and 16 scenarios (2001–2100) // Working Paper 55. Tyndall Centre for Climate Change Research, University of East Anglia, Norwich, 2004.
33. *Trabucco A., Zomer R.J.* Global aridity index (Global-Aridity) and global potential evapotranspiration (Global-PET) geospatial database. CGIAR Consortium for Spatial Information. URL: http://www.csi.cgiar.org. 2009.
34. UNESCO. Map of the World Distribution of Arid Regions. Techn. Notes No. 7. Paris. 1977. 54 p.
35. Global Geospatial Potential EvapoTranspiration and Aridity Index Methodology and Dataset Description. URL: https://csidotinfo.files.wordpress.com/2019/01/global-aridity-and-global-pet-methodology.pdf.

REFERENCES

1. *Vtoroi otsenochnyi doklad Rosgidrometa ob izmeneniyakh klimata i ikh posledstviyakh na territorii Rossiiskoi Federatsii* (The second assessment report of Roshydromet on climate change and its consequences on the territory of the Russian Federation), Moscow: Rosgidromet, 2014, 1008 p.
2. Gunin P.D., Pankova E.I., Golovanov D.L., Mandakhbayar Zh., *Ekosistemy prirodnykh oazisov pustynnoi zony Tsentral'noi Azii. Chast' 1. Ekhiin-gol – prirodnikovyi oazis Zaaltaiskoi Gobi* (Ecosystems of natural oases of the desert zone of Central Asia. Part 1. Ekhiyn-gol – a natural oasis of the Trans-Alta Gobi), Moscow: Tov-vo nauchnykh izdanii KMK, 2018, 216 p.
3. Zalibekov Z.G., Aridnye zemli mira i ikh dinamika v usloviyakh sovremennogo klimaticheskogo potepleniya (Arid lands of the world and their dynamics in the context of modern climate warming), *Aridnye ekosistemy*, 2011, Vol. 17, No. 1 (46), pp. 5–13.

4. Zolotokrylin A.N., Geterogennost' aridizatsii v tsentral'noi Azii v kontse 20 veka (Heterogeneity of Aridization of Central Asia at the End of the 20th Century), *Aridnye ekosistemy*, 2005, Vol. 11, No. 26–27, pp. 100–105.
5. Zolotokrylin A.N., Gunin P.D., Vinogradova V.V., Bazha S.V., Izmenenie klimata i sostoyanie rastitel'nogo pokrova Mongolii v 20 veke (Climate change and the state of vegetation in Mongolia in the 20th century), *Ekosistemy Vnutrennei Azii: voprosy issledovaniya i okhrana*, Moscow: Tipografiya Rossel'khozakademii, 2007, pp. 89–100.
6. Zonn I.S., Konferentsiya OON v Nairobi: problema opustynivaniya 20 let spustya (Conference in Nairobi: Desertification 20 Years Later), *Aridnye ekosistemy*, Vol. 3, No. 6–7, 1997, pp. 12–27.
7. Ivanov I.V., *Evolyutsiya stepnykh pochv v galotsene* (The evolution of steppe soils in the Halocene), Moscow: Nauka, 1992, 142 p.
8. Ivanov I.V., Glazovskii N.F., *Geokhimicheskii analiz pochvennogo pokrova stepei i pustyn'* (Geochemical analysis of the soil cover of steppes and deserts), Moscow: Nauka, 1979, 135 p.
9. Kalinina N.V., Rukhovich D.I., Pankova E.I., Chernousenko G.I., Koroleva P.V., Cartographic Analysis of the Distribution of Saline Soils in Russia Depending on Some Climatic Parameters, *Eurasian Soil Science*, 2016, Vol. 49, No. 11, pp. 1211–1227, DOI: 10.1134/S1064229316110041.
10. Kovda V.A., *Aridizatsiya sushi i bor'ba s zasukhoi* (Land Aridization and Drought Management), Moscow: Nauka, 1980, 112 p.
11. *Konventsiya Organizatsii Ob'edinennykh Natsii po bor'be s opustynivaniem v tekh stranakh, kotorye ispytyvayut ser'eznuyu zasukhu i/ili opustynivanie, osobenno v Afrike* (United Nations Convention to Combat Desertification in Those Countries Experiencing Serious Drought and/or Desertification, Especially in Africa), 1994, 66 p.
12. Lobova E.V., Ostrovskii I.M., Khabarov A.V., Ob opredelenii zasushlivosti aridnykh oblastei mira (About determination of aridity of arid regions of the world), In: *Problemy osvoeniya pustyn'* (Problems of desert-land development), Ashkhabad: izd-vo Ylym, 1977, No .4, pp. 31–40.
13. Mezentsev V.S., Karnatsevich I.V., *Uvlazhnennost' Zapadno-Sibirskoi ravniny* (Humidity of the West Siberian Plain), Leningrad: Gidrometeoizdat, 1969, 168 p.
14. *Natsional'nyi doklad "Global'nyi klimat i pochvennyi pokrov Rossii: opustynivanie i degradatsii zemel', institutsional'nye, infrastrukturnye, tekhnologicheskie mery adaptatsii* (sel'skoe i lesnoe khozyaistvo)", R.S.-Kh. Edel'geriev (ed.), (National report "Global climate and soil cover of Russia: desertification and land degradation, institutional, infrastructural, technological adaptation measures (agriculture and forestry)"), Vol. 2, Moscow: OOO "Izd-vo MBA", 2019, 476 p.

15. Pankova E.I., *Genezis zasoleniya pochv pustyn'* (Desert Salinization Genesis), Moscow: V.V. Dokuchaev Soil Science Institute, 1992, 136 p.
16. Pankova E.I., Zasolennost' pochv pustyn' Mongolii i Srednei Azii kak otrazhenie sovremennykh i proshlykh etapov razvitiya pustynnykh ekosistem (Salinity of deserts in the deserts of Mongolia and Central Asia as a reflection of modern and past stages of development of desert ecosystems), *Sb. tr. Ekosistemy Vnutrennei Azii: voprosy issledovaniya i okhrana*, Moscow: Tipografiya Rossel'khozakademii, 2007, pp. 215–236.
17. Pankova E.I., Yamnova I.A., Aidarov I.P., Golovanov D.L., Salinization as the main soil-forming process in soils of natural oases in the Gobi Desert, *Eurasian Soil Science*, 2015, Vol. 48, No. 10, pp. 1017–1028, DOI: 10.1134/S1064229315100087.
18. Pankova E.I., Konyushkova M.V., Vliyanie global'nogo potepleniya na zasolennost' pochv aridnykh regionov (The Effect of Global Warming on Soil Salinity in Arid Regions), *Dokuchaev Soil Bulletin*, 2013, Vol. 71, pp. 3–15, DOI: 10.19047/0136-1694-2013-71-3-15.
19. Pankova E.I., Konyushkova M.V., Climate and soil salinity in the deserts of Central Asia, *Eurasian Soil Science*, 2013, Vol. 46, No. 7, pp. 721–727, DOI: 10.1134/S1064229313070065.
20. Pankova E.I., Rubtsova L.P., Zasolenie pochv sukhikh i opustynennykh stepei Mongolii (Salinization of Mongolian dry and desert steppes soils), *Pochvovedenie*, 1983, No. 9, pp. 13–21.
21. Pankova E.I., Chernousenko G.I., Comparison of Chestnut Soils of Central Asia with Their Analogs in Other Soil-Geographical Provinces of the Dry-Steppe Zone of the Eurasian Subboreal Belt, *Arid Ecosystems*, 2018, Vol. 8, No. 2, pp. 89–96, DOI: 10.1134/S2079096118020051.
22. Rukhovich D.I., Pankova E.I, Kalinina N.V., Chernousenko G.I., Quantitatification of the Parameters of Zones and Facies of Chestnut Soils in Russia Basing on the Climatic-Soil-Textural Index, *Eurasian Soil Science*, 2019, Vol. 52, No. 3, pp. 271–282, DOI: 10.1134/S1064229319010125.
23. Rozanov B.G., Pustynya i opustynivanie (Desert and desertification), *Problemy osvoeniya pustyn'*, 1992, No. 3, pp. 45–48.
24. Chernousenko G.I., Kurbatskaya S.S., Soil Salinization in Different Natural Zones of Intermontane Depressions in Tuva, *Eurasian Soil Science*, 2017, Vol. 50, No. 11, pp. 1255–1270. DOI: 10.1134/S1064229317110047.
25. Chernousenko G.I., Khitrov N.B., Izmenenie klimata v zone rasprostraneniya zasolennykh pochv krioaridnykh regionov na yuge Vostochnoi Sibiri (Climate Change in the Zone of Distribution of Salted Soils of Cryoarid Regions in South of East Siberia), *Electronic scientific journal "Ecosystems: Ecology and Dynamics"*, 2019, Vol. 3, No. 3, pp. 5–57, DOI: 10.24411/ 2542-2006-2019-10038.

26. Behnke R.H., *Desertification: causes, impacts and consequences*, Spinger, 2012, 600 p.
27. Climate and Land Degradation, In: *World Meteorological Organization WMO*, 2005, No. 989, 34 p.
28. Dregne H.E., Land degradation in the dry lands, *Arid Land Research and Management*, 2002, Vol. 16, Iss. 2, pp. 99–132.
29. Geist H., *The causes and progression of desertification*, Ashgate, 2005, 272 p.
30. IPCC. Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, *J.T. Houghton, Y. Ding, D.J. Griggs, M. Noguer, P.J. van der Linden, X. Dai, K. Maskell, C.A. Johnson* (Eds.), Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2001. 881 p.
31. Le Hou´erou Henry N., Climate change, drought and desertification, *Journal of Arid Environments*, 1996, Vol. 34, Iss. 2, pp. 133–185.
32. Mitchell T.D., Carter T.R., Jones P.D., Hulme M., New M., *A comprehensive set of high-resolution grids of monthly climate for Europe and the globe: the observed record (1901–2000) and 16 scenarios (2001–2100)*, In: Working Paper 55. Tyndall Centre for Climate Change Research, University of East Anglia, Norwich, 2004.
33. Trabucco A., Zomer R.J., *Global aridity index (Global-Aridity) and global potential evapotranspiration (Global-PET) geospatial database*, CGIAR Consortium for Spatial Information, 2009, URL: http://www.csi.cgiar.org.
34. UNESCO, *Map of the World Distribution of Arid Regions*, Techn. Notes No. 7, Paris, 1977, 54 p.
35. *Global Geospatial Potential EvapoTranspiration and Aridity Index. Methodology and Dataset Description*, URL: https://csidotinfo.files.wordpress.com/2019/01/global-aridity-and-global-pet-methodology.pdf.

УДК 630.48
DOI: 10.19047/0136-1694-2020-101-46-75

Ссылки для цитирования:
Ананко Т.В., Герасимова М.И., Конюшков Д.Е. Арктические и тундровые почвы на новой цифровой почвенной карте России масштаба 1 : 2.5 млн // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2020. Вып. 101. С. 46-75. DOI: 10.19047/0136-1694-2020-101-46-75
Cite this article as:
Ananko T.V., Gerasimova M.I., Konyushkov D.E., Arctic and tundra soils on the new digital soil map of Russia, 1 : 2.5 M scale, Dokuchaev Soil Bulletin, 2020, V. 101, pp. 46-75, DOI: 10.19047/0136-1694-2020-101-46-75

Арктические и тундровые почвы на новой цифровой почвенной карте России масштаба 1 : 2.5 млн

© 2020 г. Т. В. Ананко[1*], М. И. Герасимова[1,2], Д. Е. Конюшков[1***]**

[1]Почвенный институт им. В.В. Докучаева, Россия, 119017, Москва, Пыжевский пер, 7, стр. 2,
[*]e-mail: tatyana@ananko.ru,
[***]e-mail: dkonyushkov@yandex.ru.

[2]МГУ им. М.В. Ломоносова, Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, 1,
[**]https://orcid.org/0000-0002-1815-4476,
e-mail: maria.i.gerasimova@gmail.com.

Поступила в редакцию 06.02.2020, *принята к публикации* 04.03.2020

Резюме: Почвенный институт им. В.В. Докучаева ведет работу по созданию новой цифровой Почвенной карты России на основе базовой информации Почвенной карты РСФСР (ПКРФ) масштаба 1 : 2.5 млн (1988), представленной в идеологии и номенклатуре субстантивно-генетической классификации почв России (КПР). На первом этапе уточняется и переводится в новую классификацию содержание всех контуров ПКРФ; на втором этапе методами цифровой почвенной картографии создается цифровая модель почвенного покрова с учетом новых данных. В разделе легенды “Почвы тундр” ПКРФ – 16 почвенных единиц, входящих в состав различных комплексов или выделенных отдельными ареалами. В статье рассмотрены особенности их перевода в

систему КПР. В результате уточнения диагностики арктических и тундровых почв, основанной на строении профиля и почвенных свойствах, их отражение на карте будет более дифференцированным. Наиболее существенные изменения касаются почв, относимых в легенде ПКРФ к глеевым: из них выделены криоземы и криометаморфические почвы. Новыми для карты являются также почвы отделов литоземов и слаборазвитых почв (петроземы, псаммоземы и пелоземы). По результатам работы оформился ряд предложений по уточнению диагностики и номенклатуры мерзлотных почв для их включения в КПР.

Ключевые слова: классификация почв России, глееземы, криоземы, криотурбированные почвы, криоабрадированные почвы.

Arctic and tundra soils on the new digital soil map of Russia, 1 : 2.5 M scale

T. V. Ananko[1*], M. I. Gerasimova[1,2], D. E. Konyushkov[1***]**

[1]V.V. Dokuchaev Soil Science Institute,
7 Bld. 2 Pyzhevskiy per., Moscow 2119017, Russian Federation,
[*]e-mail: tatyana@ananko.ru,
[***]e-mail: dkonyushkov@yandex.ru.

[2]Lomonosov Moscow State University,
1 Leninskie Gori, Moscow 119234, Russian Federation,
[**]https://orcid.org/0000-0002-1815-4476,
e-mail: maria.i.gerasimova@gmail.com.

Received 06.02.2020, *Accepted* 04.03.2020

Abstract: V.V. Dokuchaev Soil Science Institute has initiated a project on compilation of a new Digital Soil Map of Russia on the basis of the Soil Map of the Russian Federation (SMRF) 1 : 2.5 M scale (1988) revised and interpreted in ideology and nomenclature of the new substantive-genetic *Classification System of Russian Soils* (CSRS). The first stage implies the conversion of soil mapping units on the original map into the CSRS with a corresponding renaming of soils in the attribute database to the digitized version of the map for each soil polygon. During the second stage, a new digital model of the soil cover is developed with the use of digital soil mapping technologies, basic soil map, and new materials, including satellite images and digital elevation models. The legend section "Tundra Soils" contains 16 soil units forming their own areas or found in various combinations (soil complexes). As a result of the reclassification and careful analysis of each soil polygon, the soils of Arctic and Subarctic tundra have obtained a more detailed and differential representation on the new map, and

their diagnostics based on the morphology of the profiles and major soil properties have been specified. The most significant changes in the initial content of the map concern the soils referred to as gley soils on the SMRF. A separate group of cryozemic soils has been specified. Weakly developed soils (petrozems, psammozems, and pelozems) and lithozems have been introduced on the map for the first time. Differential decisions are suggested for the soils of "spotty tundra" with sorted and nonsorted circles and for the soils of cryogenic fissures and cracks. The results of the study have made it possible to refine the diagnostics and nomenclature of soils in the CSRS.

Keywords: classification system of Russian soils, gleyzems, cryozems, cryoabraded soils, cryoturbozems.

ВВЕДЕНИЕ

Почвенный институт им. В.В. Докучаева начал работу по созданию новой цифровой Почвенной карты России на основе базовой информации Почвенной карты РСФСР масштаба 1 : 2.5 млн, составленной под руководством В.М. Фридланда и опубликованной в 1988 г. (Почвенная карта…, 1988). С тех пор накопились новые материалы о малоизученных территориях, разработаны варианты субстантивно-генетической классификации почв России (Классификация…, 2004; Полевой определитель…, 2008), появились технологии цифрового картографирования почв.

На первом этапе проводится уточнение состава контуров (полигонов) с учетом материалов последних десятилетий и поконтурный перевод названий почв в формат классификации почв России 2004/2008 (КПР). В содержание карты вводятся агрогенные и городские почвы, почвы с техногенными нарушениями. В случае отсутствия аналогов уточненным единицам легенды в КПР вносятся предложения о введении в КПР новых элементов (Герасимова и др., 2018). Параллельно ведется работа по созданию новой контурной части карты на основе технологий цифровой почвенной картографии (Жоголев, Савин, 2016). Итогом должна быть цифровая Почвенная карта России, основанная на современных почвенно-генетических и классификационных концепциях и дающая адекватное (на данном этапе знаний о почвах) представление о почвенном покрове и почвенных ресурсах России (Савин и др., 2017; Единый…, 2014).

В статье рассмотрен один из объектов общей работы по об-

новлению содержания карты – арктические и тундровые почвы.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Объектами рассмотрения являются почвы, входящие в блок легенды ПКРФ “Почвы тундр”. На карте они образуют отдельные ареалы или являются компонентами криогенных почвенных комплексов, перечисленных в блоке “Почвенные комплексы Арктики, тундры и тайги”. Названия почв содержат ландшафтные характеристики, например, арктические, тундровые, тундровых луговин, что подразумевает специфику их свойств, но противоречит принципам КПР и требует поиска адекватных диагностических признаков почв для их классификационного разделения. В программе карты в названиях тундровых почв упоминалось наличие многолетней мерзлоты в пределах профиля: немерзлотные, мерзлотные, надмерзлотно-глеевые (Фридланд и др., 1972). Это разделение не вошло в окончательную легенду карты, но его предлагается учитывать на уровне признаков в системе КПР (Лупачев и др., 2019).

Методика перевода почв легенды ПКРФ в КПР сложилась в ходе работ с почвами таежно-лесных и лесостепных территорий (Ананко и др., 2017). Основой ее является анализ строения профиля и свойств почв по первичным описаниям в программе карты (Фридланд и др., 1972), обобщающей монографии (Почвенный покров…, 2001) и региональных источниках. Информация по каждой почве – единице легенды – интерпретируется с точки зрения ее соответствия имеющимся в КПР диагностическим горизонтам и генетическим признакам для создания “формулы профиля”, на основании которой определяется новое название почвы. Для почв, формирующихся в разных климатических и литологических условиях, рассматриваются возможные различия в диагностических свойствах. Если они подтверждаются региональными материалами, почва – единица легенды – делится на несколько единиц, вводимых в атрибутивную базу данных (БД) оцифрованной версии карты.

В работе использованы бумажные листы ПКРФ, векторный слой с БД и программа Q-GIS, позволяющая визуализировать почвенные контуры, уточнять их содержание, проводить их совместный анализ с космическими снимками и различными тематиче-

скими картами. Учитывался опыт других исследователей по переводу региональных почвенных материалов в номенклатуру КПР (Воробьева, 2009; Горячкин, 2010; Губин, Лупачев, 2017; Почвы и почвенный покров…, 2013).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Почвы арктической области. В легенду ПКРФ входят арктические пустынные, типичные, карбонатные и гидроморфные неглеевые почвы, а также глееземы арктические.

Арктические пустынные почвы включены в программу и легенду карты, однако на самой карте не выделены. По имеющимся описаниям, это так называемые почвы-пленки (Михайлов, 1970; Ливеровский, 1983; Горячкин, 2010), которые по КПР относятся к отделу слаборазвитых: *пелоземы, псаммоземы* и *петроземы* с подтиповым признаком *“корочковые”* по аналогии с корково-подкорковым микропрофилем в почвах аридных территорий. Характеристика *“корочковые”* отражает результат воздействия на породу листоватых и накипных лишайников и рассматривается как почвенный признак (ak), отделяющий эти почвы от пород. Почвы введены в полигоны с преобладанием выходов пород в высокой Арктике в качестве сопутствующих компонентов почвенного покрова.

Арктические типичные почвы распространены на островах Северного Ледовитого океана в Европейском и Сибирском секторах Арктики под диффузными куртинами растительности. Они характеризуются маломощным гумусовым горизонтом (1–3 см), переходящим в неоглеенную недифференцированную толщу со слабощелочной или нейтральной реакцией, сухой или малольдистой мерзлотой (Фридланд и др., 1972). В зависимости от географической локализации, характера пород и криогенных процессов они переводятся на обновленную карту по-разному. В составе комплексов на мелкоземистых субстратах они соответствуют по КПР *серогумусовым глееватым* почвам с гумусовым горизонтом мощностью до 10 см. Наличие гумусового горизонта в суровых арктических условиях объясняется его приуроченностью к почвам понижениям микрорельефа – трещинам или западинам, где аккумулируется гумусированный мелкозем и растительный детрит

(Горячкин, 2010, Михайлов, 1960). Разная интенсивность этого процесса определяет возможность образования верхнего горизонта как гумусово-слаборазвитого W вплоть до серогумусового AY и, соответственно, почв: петроземов и литоземов или серогумусовых[1]. Вне комплексов арктические типичные почвы на суглинках характеризуются гумусовым горизонтом < 5 см, переходящим в почвообразующую породу, и переводятся в *пелоземы гумусовые*. На маломощных щебнистых и плотных породах они отнесены по КПР к *петроземам (грубо)гумусовым* в составе каменно-многоугольниковых комплексов и без них.

Арктические типичные почвы Сибирского сектора близки к серогумусовым европейской провинции, но по ряду показателей: отсутствию серых тонов в окраске (коричнево-бурые), близкой к нейтральной реакции, насыщенному поглощающему комплексу, гуматно-фульватному составу гумуса (Сг/Сф = 0.7–0.9) и высокому (40–45%) содержанию в его составе нерастворимого остатка (Михайлов, 1960), – их гумусовые горизонты приближаются к криогумусовым.

Все арктические и почти все тундровые почвы относятся к подтипу *мерзлотных*, что настолько очевидно, что не приводится в названиях, но индексы малольдистой (↓) и льдистой мерзлоты (⊥) введены в формулу профиля (табл. 1). Признак "*криотурбированный*" не вводится в названия почв с сухой мерзлотой; для них характерны процессы мерзлотной сортировки мелкозема и щебня с образованием каменных многоугольников и колец.

Арктические карбонатные почвы на ПКРФ выделены на выходах плотных карбонатных пород в единственном полигоне на о-вах Северной Земли. Переводятся на обновленную карту как *карбопетроземы гумусовые*. Среди почв на карбонатных породах на архипелаге Новой Земли описаны (Горячкин, 2010) также *карболитоземы перегнойно-(темно)гумусовые* и *перегнойно-(темно)гумусовые остаточно-карбонатные* почвы отдела органо-аккумулятивных почв (при залегании плотных карбонатных пород глубже 30 см). Их площади малы, они показаны как сопутствую-

[1] Литоземы отделяются от почв органо-аккумулятивного отдела глубиной залегания плотной породы – 30 см.

щие компоненты почвенного покрова. Заметим, что название и сущность перегнойно-темногумусового диагностического горизонта АН в КПР предлагается сделать более широкими, исключив привязку к свойствам темногумусового горизонта. Анализ информации по горным почвам показал разнообразие свойств этого горизонта, в первую очередь величин pH (Ананко и др., 2017).

Арктические гидроморфные неглеевые почвы в программе карты не выделялись, но были введены в легенду и показаны сопутствующими компонентами на Новосибирских островах, Северной Земле и северо-востоке Таймыра как почвы нижних частей склонов на проточном увлажнении из-под снежников на суглинистом элюво-делювии (Михайлов, 1960, 1970, 2020). Почвы подвержены криотурбациям; гумусовый горизонт маломощный (< 5 см), содержание гумуса < 3%; реакция нейтральная, оглеение не выражено, несмотря на постоянное переувлажнение (Почвенный покров…, 2001). Гумусовый горизонт отвечает критериям слаборазвитых почв (W < 5 см), однако срединный криотурбированный горизонт (CR) отчетлив, что позволяет отнести данные почвы к отделу криоземов. В КПР почвы с таким строением профиля отсутствуют, но могут быть выделены как самостоятельный тип *криоземов гумусово-слаборазвитых*. Отметим, что центральная концепция криоземов (Соколов, 1980), положенная в основу их выделения в КПР, не предусматривает проточного склонового увлажнения как необходимого условия их формирования, поскольку такие почвы, как правило, не оглеены и в более южных немерзлотных районах. Вопрос о выделении группы минеральных гидроморфных неоглеенных почв нуждается в дальнейшем рассмотрении.

Глееземы арктические показаны в составе комплексов на юге Новой Земли на суглинисто-глинистых породах и как сопутствующие почвы во всех секторах Арктики. В комплексах на автономных позициях они соответствуют *криоземам грубогумусированным глееватым* (Горячкин, 2010). В полугидроморфных и гидромофных условиях вне комплексов выделяются как *глееземы типичные* с дополнительными подтиповыми признаками *“криогенно-ожелезненные”* и *“криотурбированные”* (Горячкин, 2010) и *глееземы перегнойные окисленно-глеевые криотурбированные*

(Караваева, 1969). Важным, но не учтенным в КПР признаком, является *тиксотропность* минеральных горизонтов глееземов. Вероятно, ее также следует рассматривать как подтиповой признак. Однако проявляется она не везде и на карте не отражается.

Арктотундровые и тундровые слабоогленные гумусные почвы (глееземы и слабоглеевые гумусные) на ПКРФ выделены в разных провинциях арктической и субарктической тундры под разреженной мохово-лишайниково-травянистой растительностью преимущественно в составе комплексов. Приурочены к вершинам высоких холмов и увалов. Общими диагностическими свойствами являются слабая оглеенность профиля (цветовая гамма – сероватобурая, бурая, оливково-бурая), относительно высокая степень разложения растительных остатков, нарушенность почвенного профиля криогенными процессами трещинообразования или пучения, льдистая мерзлота, замыкающая профиль на глубине 50–70 см. Верхние горизонты соответствуют критериям *серогумусовых грубогумусированных* (AYao) или *грубогумусовых* (AO). Вместе с тем в разных частях ареала фиксируются различия между почвами. Так, в европейской северной тундре мощность верхнего горизонта составляет 5–10 см, в надмерзлотных горизонтах с глубины около 25 см оглеение выражено отчетливо: на буровато-сизом фоне крупные голубовато-сизые и охристые пятна (Игнатенко, 1979). Характер оглеения свидетельствует о смене анаэробных условий периодически аэробными с окислительными процессами. Формируются окисленно-глеевые (Gox) горизонты, и почвы классифицируются как *глееземы грубогумусовые окисленно-глеевые*. В тундрах Восточной Сибири мощность гумусового горизонта не превышает 2–5 см, слабое оглеение появляется только в надмерзлотной части профиля, и почвы отнесены к *криоземам грубогумусовым глееватым*. В средней части профиля криоземов иногда отмечается неясно выраженная зернистая или угловато-крупитчатая структура (Васильевская, 1980; Караваева, 1969), что позволяет предложить необязательный подтиповой признак *“криометаморфизованный”*.

Арктотундровые перегнойно-глеевые почвы (глееземы перегнойные тундровые) в составе комплексов распространены по всей субарктической и реже арктической тундре, формируясь

под кустарничково- и ивняково-моховыми сообществами на плоских водоразделах, надпойменных террасах, склонах холмов и увалов. Отличаются от предыдущей группы почв большей оглеенностью профиля и более выраженным накоплением органических остатков. Анализ их свойств по разным провинциям показал целесообразность разделения этой группы почв. В европейских и западносибирских типичных тундрах преобладают глееземы не с перегнойными, а с подстилочно-торфяными горизонтами мощностью до 10 см (Игнатенко, 1979; Атлас Арктики, 1985; Атлас почв Республики Коми, 2010, Тонконогов, 2010). По критериям КПР они соответствуют *глееземам типичным. Глееземы перегнойные* остаются лишь в пределах арктической и севера субарктической тундры (Вайгач, север Югорского п-ва, северо-восток Гыдана), в том числе на слабо карбонатных суглинках.

В западносибирских тундрах под торфяно-подстилочным горизонтом на суглинках часто формируется охристая кайма вокруг сизо-голубого глеевого горизонта, диагностируемая в КПР как признак "*криогенно-ожелезненный*". Несколько иные формы железистых новообразований были описаны на супесях и двучленах: более интенсивная пропитка типа альфегумусового иллювиирования (Тонконогов, 1977; 2010; Иванова, 1962). На Таймыре выявляются оба типа органогенных горизонтов; верхний минеральный горизонт часто имеет окисленно-глеевый характер (Васильевская, 1980). На севере Якутии окисленно-глеевые горизонты преобладают; выделяются *глееземы перегнойные* и *грубогумусовые окисленно-глеевые.* На щебнистых суглинистых отложениях собственно глеевые горизонты не формируются, и исходные глееземы отнесены к *криоземам грубогумусовым глееватым* (Еловская и др., 1979; Еловская, 1987).

Почвы субарктической (типичной и южной) тундры и лесотундры.

Тундровые глеевые торфянистые и торфяные почвы (глееземы торфянистые и торфяные тундровые). Мощность торфяного или торфяно-перегнойного горизонта составляет от 5–15 до 30–40 см; профиль оглеен; его верхняя часть часто имеет ржаво-бурую окраску (Фридланд и др., 1972). Встречаются во всех

провинциях, на разных элементах рельефа и почвообразующих породах. В европейских бугорковых тундрах дренированных автономных позиций эти почвы на суглинках отвечают диагностике *глееземов типичных*, образующих комплексы с *торфяно-глееземами* бугорков. В менее дренированных условиях плоских водоразделов, на склонах и в ложбинах с дополнительным поверхностным увлажнением, в депрессиях по периферии болот торфяно-глееземы преобладают (Игнатенко, 1979; Атлас Арктики, 1983). На песчаных отложениях оглеение выражено слабее; под торфяным горизонтом часто выделяется перегнойный горизонт, а ниже – горизонт с признаками иллювиирования железо-гумусовых соединений (Игнатенко, 1979). Такие почвы соответствуют *глееземам перегнойно-торфяным иллювиально-ожелезненным окисленно-глеевым.* В Западной Сибири преобладают торфяно-глееземы с мощностью торфяного горизонта не менее 10–15 см. На супесях и суглинках к их подтиповым характеристикам относятся потечность гумуса и криогенное ожелезнение, на песках – проявление иллювиального ожелезнения (Тонконогов, 1977, 2010). На карте они выделены как *торфяно-глееземы криогенно-ожелезненные и иллювиально-ожелезненные.*

В Средней и Восточной Сибири торфонакопление менее выражено; мощность подстилочно-торфяного горизонта обычно менее 10 см. Оглеение усиливается над мерзлотой, а верхняя часть минерального профиля с пестрой ржаво-бурой окраской соответствует окисленно-глеевому горизонту. Такие почвы выделяются как *глееземы типичные поверхностно-окисленно-глеевые.* Торфяно-глееземы с мощностью торфа 15–25 см формируются только в слабодренированных тундрово-болотных ландшафтах.

Тундровые глеевые торфянисто-перегнойные почвы (глееземы торфянистые и перегнойные тундровые) преобладают в типичной и южной бугорковатой тундре приморских низменностей Средней и Восточной Сибири. Органогенные горизонты в пределах лучше прогреваемых бугорков имеют перегнойный (или торфянисто-перегнойный) характер, соседствуя с торфяными горизонтами межбугорковых понижений (Еловская и др., 1979; Васильевская, 1980). На новой карте почвы бугорков выделены как *глееземы перегнойно-торфянистые окисленно-глеевые*. В ев-

ропейской и западносибирской тундрах процесс торфонакопления выражен сильнее; формируются *глееземы перегнойно-торфянистые поверхностно-глеевые, в т. ч. криогенно-ожелезненные* (бугорков) в комплексе с *глееземами типичными*.

Таблица 1. Тундровые почвы на ПКРФ (1988) и обновляемой карте, основанной на Классификации почв России (2004/2008)
Table 1. Tundra soils on the Soil Map of the Russian Federation (1988) and on the new digital map based on Classification System of Russian Soils (2004/2008)

Название и профиль почвы согласно легенде ПКРФ	**Название и профиль почвы согласно КПР с дополнениями* в новой легенде**	**Основной ареал новых единиц легенды (провинции)****
Арктические пустынные, **C(Cp)–↓Cca** (на карте нет)	Петроземы гумусовые, **W–↓R**	Высокая Арктика, плотные породы
	Пелоземы / псаммоземы корочковые, **ak–↓C**	Высокая Арктика, суглинки/пески
Арктические типичные, **A1–C–↓Cca**	Петроземы гумусовые, **W–↓R**	Европейская и Восточно-Сибирская
	Литоземы серогумусовые грубогумусированные, **AYao–(C)–↓R**	
	Серогумусовые (крио)грубогумусированные, **AYao–AC–↓(⊥)C**	
Арктические карбонатные, **A1–Bca–↓Cca**	Карбопетроземы гумусовые, **W–↓Rca**	Европейская и Восточно-Сибирская
	Карболитоземы перегнойно-(темно)гумусовые, **AH–↓Rca**	
	Перегнойно-гумусовые остаточно-карбонатные, **AH–AC–↓Cca**	
Арктические гидроморфные неглеевые, **A1–B–⊥C**	Криоземы гумусово-слаборазвитые, **W(ao)–CR–⊥C**	Восточно-Сибирская

Глееземы арктические, **O–G–⊥CG**	Криоземы грубогумусированные глееватые, **Oao–CRg–⊥Cg**	Европейская
	Глееземы криогенно-ожелезненные криотурбированные, **O–Gcf,@–⊥G**	
	Глееземы перегнойные окисленно-глеевые криотурбированные, **H–Gox,@–⊥G**	Восточно-Сибирская
Арктотундровые и тундровые слабооглеенные гумусные (глееземы и слабоглеевые гумусные тундровые), **A1–Bg–⊥C**	Глееземы грубогумусовые окисленно-глеевые криотурбированные, **AO–Gox,@–⊥G**	Европейская
	Криоземы примитивно-гумусовые и грубогумусовые глееватые, в т. ч. криометаморфизованные, **W(AO)–CRg,(crm)–⊥Cg**	Восточно-Сибирская и Чукотская
Арктотундровые и тундровые перегнойно-глеевые (глееземы перегнойные тундровые), **O3–G–⊥G**	Глееземы типичные и перегнойные криотурбированные, **O(H)–G@–⊥Cg**	Европейская
	Глееземы типичные и перегнойные криогенно-ожелезненные криотурбированные, **O(H)–Gcf,@–G–⊥G**	Западно-Сибирская
	Глееземы перегнойные иллювиально-ожелезненные криотурбированные, **H–Gf,@–G–⊥G(Cg)**	
	Глееземы типичные и грубогумусовые окисленно-глеевые криотурбированные, **O(AO)–Gox,@–⊥C(Gox)**	Восточно-Сибирская
	Криоземы грубогумусовые глееватые, **AO–CRg–⊥Cg**	Восточно-Сибирская и Чукотская
Тундровые глеевые торфянистые и торфяные (глееземы торфянистые и торфяные тундровые), **O1–G–⊥G**	Глееземы криотурбированные, **O–G@–⊥Cg(G)**	Европейская и Западно-Сибирская, суглинки
	Торфяно-глееземы криотурбированные, **T–G@–⊥Cg(G)**	

Тундровые глеевые торфянистые и торфяные (глееземы торфянистые и торфяные тундровые), **O1–G–⊥G**	Глееземы перегнойно-торфяные потечно-гумусовые криотурбированные, **Th–Ghi,@–G–⊥Cg(G)**	Европейская и Западно-Сибирская супеси и пески
	Торфяно-глееземы иллювиально-ожелезненные криотурбированные, **T–Gf,@–G–⊥Cg(G)**	
	Глееземы окисленно-глеевые криотурбированные, **O–Gox,@–⊥Cg(G)**	Восточно-Сибирская
Тундровые глеевые торфянисто-перегнойные (глееземы торфянистые и перегнойные тундровые), **O1(O3)–Gd–(⊥)G**	Глееземы перегнойно-торфянистые криогенно-ожелезненные криотурбированные, **O(H)–Gcf,@–G–⊥Cg(G)**	Западно-Сибирская
	Глееземы перегнойно-торфянистые окисленно-глеевые криотурбированные, **Oh–Gox,@–⊥Cg(G)**	Восточно-Сибирская
Тундровые поверхностно-глеевые дифференцированные торфянисто-перегнойные (глееземы дифференцированные, в т. ч. оподзоленные, тундровые), **O–G1A2–G2–(⊥)C**	Глееземы криометаморфические глинисто-дифференцированные, **O–Gel–CRMt,g–G–(⊥)Cg**	Европейская
	Глееземы глинисто-дифференцированные криотурбированные, **O–Gel,@–Gt–⊥Cg(G)**	Западно-Сибирская
	Глееземы окисленно-глеевые глинисто-дифференцированные криотурбированные, **O–Gox,@(e)–Gt–⊥Cg(G)**	Чукотская
Подбуры темные тундровые, **O(AO)–Bh(Bh,f)–C**	Подбуры иллювиально-гумусовые типичные и грубогумусовые, **O(AO)–BH–(↓)C(R)**	Все провинции; пески, плотные породы
	Подбуры иллювиально-гумусовые типичные и грубогумусовые оподзоленные надмерзлотно-глееватые, **O(AO)e–BH–Cg–⊥Cg**	Европейская и Западно-Сибирская, супеси
Подбуры светлые тундровые, **AO(O)–Bf(Bh,f)–C**	Подбуры иллювиально-железистые грубогумусовые и типичные, **AO(O)–BF–(↓)C(R)**	Все провинции; пески, плотные породы
	Литоземы грубогумусовые иллювиально-ожелезненные, **AO–Cf–↓R**	

Подбуры тундровые (без разделения), **O–Bh,f–↓C**	Подбуры (без разделения), **AO(O)–BHF–↓C**	
Перегнойно–карбонатные тундровые, **O3–Bca–BCca–↓Cca**	Карболитоземы перегнойно-(темно)гумусовые, **AH–↓Rca**	Восточно-Сибирская (горная)
	Карбопетроземы гумусовые, **W–↓Rca**	
	Перегнойно-гумусовые остаточно-карбонатные, **AH–ACca–↓Cca**	Восточно-Сибирская
	Криоземы (тиксотропные) остаточно-карбонатные, **O–CRca–⊥Cca**	
Почвы тундровых луговин, **O3–AO–G–⊥G**	Перегнойные дернинные глееватые мерзлотные, **Hrz–ACg⊥Cg**	Западно-Сибирская
Почвы пятен, в т.ч. засоленные, арктические и тундровые слабобиогенные деструктивные (только в составе комплексов), ⊥,↓C	Криоабраземы / пелоземы и псаммоземы абрадированные, **(W)–↓(⊥)C**	Арктика, север субарктики Восточной Сибири
	Криотурбоземы / пелоземы криотурбированные, **TUR[O,AO,CR]@–⊥C / (W)@–⊥C**	Субарктические тундры (все провинции)
Почвы мерзлотных трещин	Торфяные мерзлотные, **T–⊥T**	Субарктические тундры (все провинции
	Торфяно-(перегнойные) глубокомерзлотные, **T–(H)–⊥G**	
	Органоаккумулятивные, **AO(H,AY)–↓C(R)**	Арктика, север субарктической тундры (все провинции)

Примечание. *Дополнения, предлагаемые к введению в КПР даны подчеркиванием.

**Названия провинций даны по Почвенно-экологическому районированию ПКРФ (1988).

Тундровые поверхностно-глеевые дифференцированные (в том числе оподзоленные) торфянисто-перегнойные входят в состав комплексов южной тундры и лесотундры европейского, западносибирского и северо-восточного секторов; реже они показаны вне комплексов, преимущественно на плотных породах Северного и Полярного Урала. Отличаются от рассмотренных выше глееземов ясной элювиально-иллювиальной дифференциацией по илу и валовому содержанию полуторных оксидов (Фридланд и др., 1972; Почвенный покров…, 2001). Разные варианты перевода в КПР связаны с характером срединных горизонтов. В восточной части европейских тундр эти почвы определены как *глееземы криометаморфические глинисто-дифференцированные, в том числе оподзоленные*. В них под верхним голубовато-сизым элювиально-глеевым горизонтом Gel залегает неглеевый (или глееватый) горизонт серовато-бурого цвета с хорошо выраженной творожистой или комковато-ореховатой структурой, иногда – скелетаной по граням структурных отдельностей (Игнатенко, 1979; Тонконогов, 2010). Такие горизонты в КПР выделяются как криометаморфические (CRM). Под ними, в нижней части профиля над мерзлотой часто отмечается второй максимум оглеения. Криометаморфический горизонт может быть и не выражен, особенно при усилении криотурбаций. В Западной Сибири такие почвы отнесены к *глееземам типичным глинисто-дифференцированным в том числе оподзоленным*, а в тундре и лесотундре Северо-Востока добавляется подтиповой признак: *окисленно-глеевые* (Таргульян и др., 1970; Наумов, 1973). Глееземы дифференцированные в дренированных позициях горных тундр Урала на мелкоземисто-щебнистых породах переведены в *подбуры глееватые и глеевые*, а на слабодренированных вершинах и пологих склонах – в *глееземы иллювиально-ожелезненные*.

Завершая рассмотрение тундровых почв, относимых к глееземам на ПКРФ, подведем некоторые итоги их переименования.

1) Часть глееземов со слабыми признаками оглеения (отсутствие горизонта G) переведена в отдел криоземов (*криоземы глееватые*), выделяемых в арктических тундрах европейского сектора и арктических и субарктических тундрах сибирского сектора.

2) Подтиповой признак "*криотурбированные*" характерен практически для всех глееземов, входящих в состав разных мерзлотных комплексов.

3) Для европейского сектора субарктических тундр характерно либо оглеение всего минерального профиля, либо его "двухэтажный" характер с сизыми горизонтами в верхней и нижней (надмерзлотной) частях профиля; в средней части профиля часто выделяется криометаморфический горизонт. В восточносибирском секторе преобладают почвы с окисленно-глеевым горизонтом в верхней части и надмерзлотным глеевым горизонтом.

4) Поверхностное накопление органических остатков с формированием торфяного горизонта разной мощности (часто увеличенной под бугорками) характерно для европейского и западносибирского секторов. В средне- и восточносибирском секторах мощности органогенных горизонтов меньше; они имеют перегнойно-торфянистый и перегнойный характер; увеличение мощности приурочено к пониженным элементам мезо- и микрорельефа.

5) В названиях тундровых глееземов опущен подтиповой признак "*мерзлотны",* однако в формуле профиля указывается присутствие и характер мерзлоты: льдистая (⊥) и малольдистая или сухая (↓).

6) Во многих глееземах присутствуют признаки перераспределения соединений железа в виде зон окисления, особенно в континентальной Сибири. Типизация железистых новообразований проведена с помощью признаков из КПР: "*окисленно-глеевые"* (пестро окрашенные глеевые горизонты с преобладанием охристо-бурых тонов), *"криогенно-ожелезненные"* (с яркой охристой каймой по границе глеевого горизонта) *и "иллювиально-ожелезненные*" (с желтовато-охристыми пленками по граням структурных отдельностей под подстилкой и/или оподзоленным глеевым Ge горизонтом), обозначаемых индексами ox, cf и f соответственно. Последний признак отмечается в почвах легкого гранулометрического состава. Учет этих признаков обеспечивает более детальное разделение единиц исходной легенды.

Подбуры темные тундровые, подбуры светлые тундровые и подбуры тундровые без разделения – почвы, тяготеющие к легким или плотным породам; широко распространены в бугорковатых комплексах европейских тундр; в Западной, Средней и Восточной Сибири выделены на карте преимущественно без комплексов. По мнению В.Д. Тонконогова (2010), особенностью географии альфегумусовых почв является относительно слабая зависимость их типов и подтипов от климатических условий. Разделение на темные (*иллювиально-гумусовые*), светлые (*иллювиально-железистые*) и темные и светлые (*иллювиально-железисто-гумусовые*) подбуры, данное на карте, сохранено. По характеру органогенных горизонтов в тундрах выделяются *типичные* (О), *грубогумусовые* (АО) и, реже, *перегнойные* (О–Н) подбуры (Игнатенко, 1979; Тонконогов, 2010; Еловская и др., 1979; Горячкин, 2010; Таргульян, 1971; Почвы и почвенный покров, 2013, и др.). Торфяно-подбуры относятся к бугоркам. В Большеземельской тундре и на Ямале (Тонконогов, 1977) на тонкопесчаных отложениях с льдистой мерзлотой или на двучленах (песок/суглинок) нижние горизонты часто оглеены. Такие почвы выделены как *подбуры глееватые и глеевые.* Подбуры в горных тундрах Средней и Восточной Сибири формируются на сильно щебнистых субстратах, имеют укороченный профиль (15–30 см) и слабо выраженные признаки иллювиирования органо-минеральных соединений (Васильевская, 1980; Еловская и др., 1979). Они переведены как более “сухие” почвы – *литоземы грубогумусовые иллювиально-ожелезненные.*

Перегнойно-карбонатные тундровые почвы на карте образуют крупные ареалы (без комплексов) на выходах плотных карбонатных пород на Анабаро-Котуйском и Оленекском плато, в горах Бырранга и Восточной Сибири. Специальное изучение почвообразования на карбонатных породах в континентальной субарктике (Конюшков, 1991) показало значительное разнообразие почв и преобладание комплексного почвенного покрова. На высоких денудационных плато под фрагментарным лишайниково-разнотравным покровом преобладают слаборазвитые *карбопетроземы и карболитоземы гумусовые*, приуроченные к полигональ-

ной сети криогенных трещин и образующие комплексы с криоабрадированными карбонатными почвами пятен. На более низких поверхностях и пологих склонах с более мощным чехлом щебнисто-суглинистых дериватов карбонатных пород под мохово-лишайниковой растительностью с участием разнотравья абсолютно преобладают *криоземы остаточно-карбонатные*, образующие пучинно-бугорковатые и полосчатые (на склонах) комплексы с торфяными мерзлотными почвами межбугорковых понижений. Органогенные горизонты бугорков представлены разными типами, но преобладают оторфованные подстилки мощностью до 10 см. Формирование перегнойных, серо- и темногумусовых горизонтов возможны в локальных условиях при обогащении дериватов карбонатных пород примесью легковыветриваемых минералов основных пород, выходящих на поверхность в виде даек, или орнитогенным и зоогенным веществом в хорошо дренированных позициях; формируются *перегнойно-гумусовые остаточно-карбонатные почвы*.

Почвы тундровых луговин на карте показаны как сопутствующие в ареалах подбуров или глееземов перегнойных в Ямало-Гыданских тундрах. Формируются под растительностью, сочетающей черты луговой и тундровой, за что и были выделены. Одной из причин ее формирования считается перевыпас оленей и появление в растительном покрове трав, устойчивых к вытаптыванию (Дегтева, 2008). Согласно приводимому описанию в обобщающей монографии (Почвенный покров…, 2001), почвы могут быть классифицированы, по КПР, как *перегнойные глееватые мерзлотные почвы,* но с дерниной из корней трав, что не свойственно природным тундровым почвам.

Особыми единицами легенды и объектами постоянного обсуждения являются *почвы пятен и почвы трещин*. Его основные направления касаются вопросов самого понятия тундровой криогенной почвы как пространственно неоднородного тела, с одной стороны, разнообразия пятен и соответствующей ему номенклатуры и почв трещин, с другой стороны. Пятна – динамичное образование, и их классификационно значимые свойства непостоянны во времени, а трещины нередко понимаются как пустое простран-

ство, и наличие в них почв вызывает сомнения. В зарубежных исследованиях почвы пятен и трещин при размере цикла до 7 м классификационно рассматриваются как одна почва (Turbic Cryosol – Канада, Turbel – США) с указанием типа структурных грунтов (patterned ground), например, сортированные и несортированные круги (sorted and nonsorted circles). Иными словами, раздельно почвы пятен и трещин не выделяются (Tarnocai, 2004).

Почвы пятен, в том числе засоленные, арктические и тундровые слабобиогенные деструктивные – целесообразно разделить на несколько групп.

Наиболее распространены пятна, связанные с процессами денудации: снежной корразией, дефляцией, эрозией выпуклых частей полигонов и бугорков (Караваева, 1969; Еловская и др., 1979; Васильевская, 1980). Отсутствие верхнего горизонта в результате процессов эрозии или дефляции служит основанием для отнесения почв к отделу абраземов. Почвы пятен, "потерявшие" верхние горизонты в результате криогенных процессов, могут быть выделены как *криоабраземы*, поскольку первопричиной их образования является неравномерное криогенное пучение. Дальнейшее деление определяется свойствами выходящих на поверхность горизонтов. Ими могут быть неоглеенные или глееватые криогенные горизонты (CR(g)) криоземов, глеевые горизонты (G) глееземов, Al–Fe-гумусовые горизонты (BHF) подбуров или подзолов. Соответственно, выделяются *криоабраземы собственно*, *криоабраземы глеевые и криоабраземы альфегумусовые.* Часто под денудационным пятном отчетливы признаки криотурбаций, и в название почвы добавляется признак *"турбированные"*.

Отметим, что эти почвы являются неустойчивыми образованиями. Пятна характеризуются иным, более контрастным гидротермическим режимом по сравнению с задернованной поверхностью. Зарастание свежих пятен начинается с образования корочки накипных или листоватых лишайников, исчезающих по мере появления куртин зеленых мхов и злаков (Иванова, 1962). Под ней формируется хрупкий пористый (ячеистый) корковый и слоеватый подкорковый микрогоризонт, близкий по строению к горизонту

[akl] аридных почв. Образование такого микрогоризонта дает основание к выделению подтипа криоабраземов *корочковых*.

Иной механизм формирования пятен связан с действием криостатического давления и излиянием на поверхность разжиженного минерального материала, перекрывающего органогенные горизонты или, возможно, "раздвигающего" их (Романовский, 1993; Губин, Лупачев, 2017). Заметного выпучивания и денудации поверхности может и не происходить. Почвы пятен такого типа могут быть определены как *криотурбоземы*. В КПР отдел турбоземов включает почвы, измененные плантажной вспашкой с перемещениями горизонтов и морфонов. Предлагаемый для тундровых почв термин "криотурбоземы" указывает на причину турбированности. Криотурбоземы могут быть внесены в КПР либо в отдел турбоземов на правах подтипа, либо в отделы криоземов и глееземов как типы, поскольку в них имеется новый для этих отделов горизонт TUR. Криотурбоземы не формируются на песчаных породах, но могут формироваться уже на тонких супесях и на более тяжелых отложениях. Они характерны для бугорковых кочкарниковых, округло-пятнистых западинных и неупорядоченно-пятнистых комплексов тундры Средней и Восточной Сибири (Васильевская, 1980; Еловская и др., 1979; Губин, Лупачев, 2017).

Несмотря на свою "простоту", почвы пятен оказались сложным объектом при переводе названий почвенных комплексов в систему КПР, поскольку этим общим термином обозначались почвы разного генезиса и свойств. Предлагаемые решения отражают разные механизмы формирования и стадии эволюции почв пятен и могут использоваться при их полевой диагностике. Для карты мелкого масштаба такая детальность, вероятно, является избыточной. Вопрос о целесообразности введения в легенду обновляемой ПКРФ всего спектра почв пятен и о таксономическом уровне отражения их признаков (учитывая их эфемерность и слабую выраженность) остается открытым.

Почвы мерзлотных трещин, как и почвы пятен, связаны исключительно с полигонально-трещинными и полигонально-валиковыми мерзлотными комплексами. Они входят в комплексы как с ксеромезоморфными, так и с гидроморфными почвами. Раз-

личия в морфологии и свойствах почв трещин существенны и требуют их дифференцированного представления. В первом приближении можно выделить четыре группы: *торфяных мерзлотных* почв под моховой растительностью, подстилаемых льдистой мерзлотой или непосредственно ледяными жилами с глубиной протаивания < 0.5 м; *торфяных и торфяно-перегнойных глубокомерзлотных* почв под мохово-осоково-пушициевой растительностью, развивающихся по термокарстовым ложбинам на месте глубоко протаявших ледяных жил в полигонально-валиковых комплексах; своеобразных *аллохтонных детрит-аккумулятивных* почв более сухих местообитаний, представляющих собой засыпанный в трещины материал поверхностных горизонтов соседних почв с разной степенью разложения; и собственно аккумулятивных (*грубогумусовых, перегнойных, серогумусовых*) мелкоземисто-щебнистых почв трещинной зоны, развивающихся за счет поверхностного и корневого опада кустарничково-мохово-разнотравной растительности.

Антропогенно-измененные почвы арктической зоны и субарктических тундр на существующей карте не выделены. В цифровом варианте новой карты с планируемым разрешением 250–500 м/пиксел такие почвы могут быть частично отражены. Речь идет о почвах, измененных выпасом, а также о крайне малых ареалах техногенно измененных почв: урбаноземов, урбо-почв и экраноземов городов и поселков (Прокофьева и др., 2014; Дымов и др., 2013); о почвах в районах добычи и транспортировки нефти (Солнцева, 1998), угля, золота и других рудных полезных ископаемых и мест складирования отходов, в частности, о территориях с “замусоренной” поверхностью и загрязненных техногенными углеводородами (Качинский, 2014). Общее усиление антропогенной нагрузки может сказаться в расширении участия непочвенных поверхностных образований (Тонконогов, 2001), а также массивов развеваемых песков, встречающихся во многих районах Арктической зоны России.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Итак, в легенде новой карты естественные почвы арктической и субарктической тундры представлены отделами альфегумусовых, криоземных, глеевых, органо-аккумулятивных, литоземных, торфяных и слаборазвитых почв, выделенных в соответствии с принципами субстантивно-генетической классификации и образующих самостоятельные ареалы и различные варианты комплексного почвенного покрова. Подтиповые характеристики позволяют отразить разнообразие почвенных условий. Большинство почв подстилаются на небольшой глубине мерзлотой и имеют признаки криотурбаций. По критериям WRB (IUSS…, 2015), они отвечают определению группы Cryosols. Соответственно, вся карта этой зоны, представленная в системе WRB (Soil Atlas…, 2009), окрашена в фиолетовый цвет Cryosols; о дифференциации почвенного покрова можно судить по дополнительным индексам-квалификаторам.

Подчеркнем основные отличия легенды новой карты от легенды ПКРФ. Во-первых, все единицы легенды были разделены на несколько групп и получили более подробную характеристику, основанную на почвенных свойствах. Разукрупнение единиц легенды ПКРФ, определяемое провинциальными особенностями почв, основывалось на региональных материалах. В большинстве случаев новые единицы не выходили за рамки уже выделенных типов почв и представлены сложными подтипами. Во-вторых, принципиально новые решения связаны с выделением различных типов криоземов из массива глеевых почв и самостоятельного выделения органо-аккумулятивных почв, слаборазвитых петроземов, пелоземов и псаммоземов, а также литоземов.

Работа по переводу почв ПКРФ в систему КПР показала необходимость уточнения классификационных решений. В частности, это касается отражения в классификации различных признаков, связанных с криогенными процессами и мерзлотой.

Перевод арктических и тундровых почв в систему КПР сопряжен со значительными трудностями по причине малой изученности, небольшого количества описаний разрезов, на основании которых определялись диагностические свойства почв, часто про-

извольных названий авторами верхних органогенно-гумусовых горизонтов, не согласующихся с их физико-химическими свойствами, неполнотой описаний. Очевидна необходимость нового полевого руководства по изучению и описанию почв, в котором должны быть отражены особенности работы в мерзлотной зоне.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ананко Т.В., Герасимова М.И., Конюшков Д.Е.* Опыт обновления почвенной карты РСФСР масштаба 1:2.5 млн. в системе классификации почв России // Почвоведение. 2017. № 12. С. 1411–1420.
2. *Ананко Т.В., Герасимова М.И., Конюшков Д.Е.* Почвы горных территорий в классификации почв России // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2018. № 92. С. 122–146. DOI: 10.19047/0136-1694-2018-92-122-146.
3. Атлас Арктики. М.: ГУГК, 1985. 204 с.
4. Атлас почв Республики Коми под ред. Г.В. Добровольского и др. Сыктывкар, 2010, 356 с.
5. *Васильевская В.Д.* Почвообразование в тундрах Средней Сибири. М.: Наука, 1980. 233 с.
6. *Воробьева Г.А.* Почвы Иркутской области: вопросы классификации, номенклатуры и корреляции. Иркутск: Изд. Иркутск. Гос. Унив., 2009. 131 с.
7. *Герасимова М.И., Ананко Т.В., Конюшков Д.Е.* Предложения к классификации почв России по итогам анализа почвенной карты РСФСР масштаба 1 : 2.5 М (1988) // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2018. Т. 95. С. 58–70. DOI: 10.19047/0136-1694-2018-95-58-70.
8. *Горячкин С.В.* Почвенный покров Севера. М.: ГЕОС, 2010. 414 с.
9. *Губин С.В., Лупачев А.В.* Роль пятнообразования в формировании и развитии криоземов приморских низменностей севера Якутии // Почвоведение. 2017. № 11. С. 1283–1295. DOI: 7868/S0032180X17110077.
10. *Дегтева С.В.* Сообщества травянистых растений Печоро-Илычского заповедника // Фундаментальные и прикладные проблемы ботаники в начале XXI века: Матер. Всерос. конф. Петрозаводск, 2008. Ч. 5. С. 77–80.
11. *Дымов А.А., Каверин Д.А., Габов Д.Н.* Свойства почв и почвоподобных тел г. Воркута // Почвоведение. 2013. № 2. С. 240–248.
12. Единый государственный реестр почвенных ресурсов России. Версия 1.0. М.: Почвенный институт имени В.В. Докучаева, 2014. 768 с.
13. *Еловская Л.Г., Петрова Е.И., Тетерина Л.В.* Почвы Северной Якутии. Новосибирск: Наука Сиб. Отд., 1979. 301 с.

14. *Еловская Л.Г.* Классификация и диагностика мерзлотных почв Якутии. Якутск, 1987. 172 с.
15. *Жоголев А.В., Савин И.Ю.* Автоматизированное обновление среднемасштабных почвенных карт // Почвоведение. 2016. № 11. С. 1319–1327.
16. *Иванова Е.Н.* Некоторые закономерности строения почвенного покрова в тундре и лесотундре побережья Обской Губы // О почвах Урала, Западной и Центральной Сибири. М.: Изд-во АН СССР, 1962. С. 49–116.
17. *Иванова Е.Н., Полынцева О.А.* Почвы Воркутинских тундр // Тр. Коми филиала АН СССР. Сер. Геогр. Вып. 1. М.: Изд-во АН СССР, 1952. С. 72–112.
18. *Игнатенко И.В.* О почвах пятнистых тундр восточно-европейского Севера // Докл. отд. и комиссий Геогр. об-ва СССР. 1977. Вып. 13. С. 88–106.
19. *Игнатенко И.В.* Почвы Восточно-Европейской тундры и лесотундры. М.: Наука, 1979. 279 с. 23.
20. *Караваева Н.А.* Тундровые почвы Северной Якутии. М.: Наука, 1969. 205 с.
21. *Качинский В.Л.* Техногенные углеводороды в почвах арктотундровых ландшафтов острова Большой Ляховский (Новосибирские острова): Автореф. дисс. … канд. геогр. наук. Москва: МГУ им. М.В. Ломоносова, 2014. 25 с.
22. Классификация и диагностика почв России. Смоленск: Ойкумена, 2004. 342 с.
23. *Конюшков Д.Е.* Почвообразование на карбонатных породах в континентальной субарктике (на примере севера Средней Сибири): Автореф. дисс. … канд. геогр. наук. Москва: Почвенный институт имени В.В. Докучаева, 1991. 24 с.
24. *Ливеровский Ю.А.* Почвы Крайнего Севера и некоторые вопросы их генезиса и классификации // Почвоведение. 1983. № 5. С. 5–15.
25. *Лупачев А.В., Губин С.В., Герасимова М.И.* Проблемы диагностики криогенных почв в современной классификации почв России // Почвоведение. 2019. № 10. С. 1157–1162.
26. *Михайлов И.С.* Некоторые особенности дерновых арктических почв острова Большевик // Почвоведение. 1960. № 6. С. 89–92.
27. *Михайлов И.С.* Почвы / Советская Арктика. М.: Наука, 1970. С. 236–249.
28. *Михайлов И.С.* Изменение почвенно-растительного покрова в Высокой Арктике Средней Сибири // Почвоведение. 2020 (принята в печать).

29. *Наумов Е.М.* Влияние криогенеза на почвенный покров и почвенный профиль // Докл. III междунар. конф. по мерзлотоведению. Якутск, 1973. С. 48–55.
30. Полевой определитель почв. М.: Почвенный институт имени В.В. Докучаева, 2008. 182 с.
31. Почвенная карта РСФСР масштаба 1 : 2 500 000 / под ред. В.М. Фридланда. М.: ГУГК, 1988. 16 листов.
32. Почвенный покров и земельные ресурсы Российской Федерации. М.: Почвенный институт имени В.В. Докучаева, 2001. 400 с.
33. Почвы и почвенный покров Печоро-Илычского заповедника (Северный Урал) / Отв. ред. С.В. Дегтева, Е.М. Лаптева, Сыктывкар: ИБ Коми НЦ УрО РАН, 2013. 328 с.
34. *Прокофьева Т.В., Герасимова М.И., Безуглова О.С., Бахматова К.А., Гольева А.А., Горбов С.Н., Жарикова Е.А., Матинян Н.Н., Наквасина Е.Н., Сивцева Н.Е.* Включение городских почв и почвоподобных образований в классификацию почв России // Почвоведение. 2014. № 10. С. 1155–1164.
35. *Романовский Н.Н.* Основы криогенеза литосферы. М.: Изд. МГУ, 1993. 335 с.
36. *Савин И.Ю., Герасимова М.И., Лебедева И.И., Ананко Т.В., Конюшков Д.Е., Белоусова Н.И., Королюк Т.В., Шубина И.Г., Хохлов С.Ф., Шишконакова Е.А., Савицкая Н.В.* О создании новой версии цифровой почвенной карты России масштаба 1 : 2.5 млн // Современные проблемы изучения почвенных и земельных ресурсов. М.: Почвенный институт имени В.В. Докучаева, 2017. С. 23–26.
37. *Соколов И.А.* Гидроморфное неглеевое почвообразование // Почвоведение. 1980. № 2. С. 21–32.
38. *Солнцева Н.П.* Добыча нефти и геохимия природных ландшафтов. М.: Изд. МГУ, 1998. 376 с.
39. *Таргульян В.О.* Почвобразование и выветривание в холодных гумидных областях. М.: Наука, 1971. 268 с.
40. *Таргульян В.О., Караваева Н.А., Наумов Е.М., Соколов И.А., Розов Н.Н.* Почвы // Север Дальнего Востока. М.: Наука, 1970. С. 234–256.
41. *Тонконогов В.Д.* Почвенный покров. В кн.: Ямало-Гыданская область: физико-географическая характеристика / Под ред. Р.К., Сиско. Л.: Гидрометеоиздат, 1977. С. 169–197.
42. *Тонконогов В.Д.* Эволюционно-генетическая классификация почв и непочвенных поверхностных образований суши // Почвоведение. 2001. № 6. С. 653–659.

43. *Тонконогов В.Д.* Автоморфное почвообразование в тундровой и таежной зонах Восточно-Европейской и Западно-Сибирской равнин. М.: Почвенный институт имени В.В. Докучаева, 2010. 287 с.
44. *Фридланд В.М., Каравaева Н.А., Руднева Е.Н. и др.* Программа Почвенной карты СССР масштаба 1 : 2 500 000. М.: Почвенный институт имени В.В. Докучаева, 1972. 160 с.
45. Soil Atlas of the Northern Circumpolar Region. Europ. Commission Office for Official Publ. Luxembourg, 2010. 142 p.
46. *Tarnocai C.* Classification of Cryosols in Canada / Kimble J.M. (Ed). Cryosols. Permafrost-Affected Soils. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag., 2004. P. 599–610.
47. *IUSS Working Group WRB.* 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, 2015. 202 p.

REFERENCES

1. Ananko T.V., Gerasimova M.I., Konyushkov D.E., Opyt obnovleniya pochvennoi karty RSFSR masshtaba 1 : 2.5 mln. v sisteme klassifikatsii pochv Rossii (Experience in updating the soil map of the Russian Federation on a scale of 1 : 2.5 M with the use of the new Russian soil classification system), *Pochvovedenie*, 2017, No. 12, pp. 1411–1420.
2. Ananko T.V., Gerasimova M.I., Konyushkov D.E., Pochvy gornykh territorii v klassifikatsii pochv Rossii (Soils of mountainous territories in the classification system of Russian soils), *Dokuchaev Soil Bulletin*, 2018, No. 92, pp. 122–146, DOI: 10.19047/0136-1694-2018-92-122-146.
3. *Atlas Arktiki* (Atlas of the Arctic), Moscow: GUGK, 1985, 204 p.
4. *Atlas pochv respubliki Komi* (Soil Atlas of the Komi Republic), Syktyvkar: IB Komi NTs URO RAN, 2010, 356 p.
5. Vasil'evskaya V.D., *Pochvoobrazovanie v tundrakh Srednei Sibiri* (Soil Formation in Tundra of Central Siberia), Moscow: Nauka, 1980, 233 p.
6. Vorob'eva G.A., *Pochvy Irkutskoi oblasti: voprosy klassifikatsii, nomenklatury i korrelyatsii* (Soils of Irkutsk Oblast: Problems of Classification, Nomenclature, and Correlation), Irkutsk: Izd. Irkutsk. Gos. Univ., 2009, 131 p.
7. Gerasimova M.I., Ananko T.V., Konyushkov D.E., Predlozheniya k klassifikatsii pochv Rossii po itogam analiza pochvennoi karty RSFSR mashtaba 1 : 2.5 M (1988) (Proposals to the Russian soil classification system on the basis of the analysis of the Soil Map of the Russian Federation (1 : 2.5

M scale, 1988), *Dokuchaev Soil Bulletin*, 2018, No. 95, pp. 58–70, DOI: 10.19047/0136-1694-2018-95-58-70.
8. Goryachkin S.V., *Pochvennyi pokrov Severa* (Soil Cover of the North), Moscow: GEOS, 2010, 414 p.
9. Gubin S.V., Lupachev A.V., The role of frost boils in the development of Cryozems on coastal lowlands of northern Yakutia, *Eurasian Soil Sci*., 2017, Vol. 50(11), pp. 1243–1254.
10. Degteva S.V., Soobshchestva travyanistykh rastenii Pechoro-Ilychskogo zapovednika (Communities of herbaceous plants of the Pechora-Ilychsky reserve), *Fundamental'nye i prikladnye problemy botaniki v nachale XXI veka: Proc. All-Russian Conf.*, Petrozavodsk, 2008, Ch. 5, pp. 77–80.
11. Dymov A.A., Kaverin D.A., Gabov D.N., Properties of soils and soil-like bodies in the Vorkuta area, *Eurasian Soil Sci.*, 2013, Vol. 46(2), pp. 217–224.
12. Edinyi gosudarstvennyi reestr pochvennykh resursov Rossii. Versiya 1.0. (The Unified State Register of Soil Resources of Russia. Version 1.0.), Moscow: *V.V. Dokuchaev Soil Science Institute*, 2014, 768 p.
13. Elovskaya L.G., Petrova E.I., Teterina L.V., *Pochvy Severnoi Yakutii* (Soils of Northern Yakutia), Novosibirsk: Nauka Sib. Otd., 1979, 301 p.
14. Elovskaya L.G., *Klassifikatsiya i diagnostika merzlotnykh pochv Yakutii* (Classification and Diagnostics of Permafrost Soils in Yakutia), Yakutsk, 1987, 172 p.
15. Zhogolev A.V., Savin I.Yu., Automated updating of medium-scale soil maps, *Eurasian Soil Sci*., 2016, Vol. 49(11), pp. 1241–1249.
16. Ivanova E.N., Nekotorye zakonomernosti stroeniya pochvennogo pokrova v tundre i lesotundre poberezh'ya Obskoi Guby (Some patterns of soil cover structure in the tundra and forest-tundra coast of the Gulf of Ob), In: *O pochvakh Urala, Zapadnoi i Tsentral'noi Sibiri* (Soils of the Urals, Western and Central Siberia), Moscow: Izd-vo AN SSSR, 1962, pp. 49–116.
17. Ivanova E.N., Polyntseva O.A., Pochvy Vorkutinskikh tundr (Soils of the Vorkuta tundra), *Tr. Komi filiala AN SSSR*, Vol. 1, Moscow: Izd-vo AN SSSR, 1952 pp. 71–112.
18. Ignatenko I.V., O pochvakh pyatnistykh tundr vostochno-evropeiskogo Severa (On the soils of the spotted tundra of the East European North), *Dokl. otd. i komissii Geogr. ob-va SSSR*, 1977, Iss. 13, pp. 88–106.
19. Ignatenko I.V., *Pochvy Vostochno-Evropeiskoi tundry i lesotundry* (Soils of the East European Tundra and Forest-Rundra), Moscow: Nauka, 1979, 279 p.
20. Karavaeva N.A., *Tundrovye pochvy Severnoi Yakutii* (Tundra Soils of Northern Yakutia), Moscow: Nauka, 1969, 205 p.
21. Kachinskii V.L., *Tekhnogennye uglevodorody v pochvakh arktotundrovykh landshaftove ostrova Bolshoi Lyakhovskii (Novosibirskie ostrova):* Avtoref.

dis. … kand. geogr. nauk (Technogenic hydrocarbons in soils of artic tundra landscapes of the Bolshoi Lyakhovskii Island (Novosibirskie Islands). Extended abstract of cand. geogr. sci. thesis), Moscow: Lomonosov Moscow State Univ., 2014, 25 p.
22. *Klassifikatsiya i diagnostika pochv Rossii* (Classification and Diagnostic System of Russian Soils), Smolensk: Oikumena, 2004, 342 p.
23. Konyushkov D.E., *Pochvoobrazovanie na karbonatnykh porodakh v kontinental'noi Subarktike (na primere severa Srednei Sibiri): Avtoref. diss. … kand. geogr. nauk* (Soil formation on calcareous rocks in continental Subarctic (by the example of the north of Central Siberia), Extended abstract of cand. geogr. sci. thesis), Moscow: V.V. Dokuchaev Soil Science Institute, 1991. 24 p.
24. Liversovskii Yu.A., Pochvy krainegor severa i nekotorye boprosy ikh genezisa i klassifikatsii (Soils of the Far North and some questions of their genesis and classification), *Pochvovedenie*, 1983, No. 5, pp. 5–15.
25. Lupachev A.V., Gubin S.V., Gerasimova M.I., Problems of the cryogenic soils' diagnostics in the recent Russian soil classification system, *Eurasian Soil Sci.*, 2019, No. 52(10), pp. 1170–1174.
26. Mikhailov I.S., Nekotorye osobennosti dernovykh arkticheskikh pochv ostrova Bol'shevik (Some features of soddy Arctic soils of the Bolshevik island), *Pochvovedenie*, 1960, No. 6, pp. 89–92.
27. Mikhailov I.S., Pochvy, In: *Sovetskaya Arktika* (Soils, In: *Soviet Arctic*), Moscow: Nauka, 1970, pp. 236–249.
28. Mikhailov I.S., Changes in the soil-vegetation cover of the high Arctic of Central Siberia // *Eurasian Soil Sci*., 2020, Vol. 53(6) [in print].
29. Naumov E.M., Vliyanie kriogeneza na pochvennyi pokrov i pochvennyi profil' (The effect of cryogenesis on the soil cover and soil profile), *Proc. III Intern. Conf. on permafrost*, Yakutsk, 1973, pp. 48–55.
30. *Polevoi opredelitel' pochv* (Field Guide on Soil Correlation), Moscow: V.V. Dokuchaev Soil Science Institute, 2008, 182 p.
31. *Pochvennaya karta RSFSR masshtaba 1 : 2 500 000, V.M. Fridland (Ed.)* (Soil map of the RSFSR, scale 1 : 2 500 000), Moscow: GUGK, 1988, 16 sheets.
32. *Pochvennyi pokrov i zemel'nye resursy Rossiiskoi Federatsii* (Soil cover and land resources of the Russian Federation), Moscow: V.V. Dokuchaev Soil Science Institute, 2001, 400 p.
33. *Pochvy i pochvennyi pokrov Pechoro-Ilychskogo zapovednika (Severnyi Ural)* (Soil and soil cover of the Pechora-Ilychsky reserve (Northern Urals)), S.V. Degteva, E.M. Lapteva (Eds), Syktyvkar: IB Komi NTs UrO RAN, 2013, 328 p.

34. Prokof'eva T.V., Gerasimova M.I., Bezuglova O.S., Bakhmatova K.A., Gol'eva A.A., Gorbov S.N., Zharikova E.A., Matinyan N.N., Nakvasina E.N., Sivtseva N.E., Inclusion of soils and soil-like bodies of urban territories into the Russian soil classification system, *Eurasian Soil Sci.*, 2014, Vol. 47, No. 10, pp. 939–967.
35. Romanovskii N.N., *Osnovy kriogeneza litosfery* (Basics of Cryogenesis in the Lithospher), Moscow: Izd-vo MGU, 1993, 336 p.
36. Savin I.Yu., Gerasimova M.I., Lebedeva I.I., Ananko T.V., Konyushkov D.E., Belousova N.I., Korolyuk T.V., Shubina I.G., Khokhlov S.F., Shishkonakova E.A., Savitskaya N.V., O sozdanii novoi versii tsifrovoi pochvennoi karty Rossii masshtaba 1 : 2.5 mln (On the creation of a new version of the digital soil map of Russia at a scale of 1 : 2.5 million), In: *Sovremennye problemy izucheniya pochvennykh i zemel'nykh resurso*v (Modern problems of the study of soil and land resources), Moscow: V.V. Dokuchaev Soil Science Institut, 2017, pp. 23–26.
37. Sokolov I.A., Gidromorfnoe negleevoe pochvoobrazovanie (Hydromorphic non-gleyed soil formation), *Pochvovedenie*, 1980, No. 2, pp. 21–32.
38. Solntseva N.P., *Dobycha nefti i geokhimiya prirodnykh landshaftov* (Oil Extraction and Geochemistry of Natural Landscapes), Moscow: Izd-vo MGU, 1998, 376 p.
39. Targulian V.O., *Pochvobrazovanie i vyvetrivanie v kholodnykh gumidnykh oblastyakh* (Soil Formaiton and Weathering in Cold Humid Regions), Moscow: Nauka, 1971, 268 p.
40. Targulian V.O., Karavaeva N.A., Naumov E.M., Sokolov I.A., Rozov N.N., Pochvy (Soils), In: *Sever Dal'nego Vostoka* (The North of Far East), Moscow: Nauka, 1970, pp. 234–256.
41. Tonkonogov V.D., Pochvennyi pokrov (Soil cover), In: *Yamalo-Gydanskaya oblast': fiziko-geograficheskaya kharakteristika* (Yamal-Gydan Region: Physico-Geographical Description), R.K. Sisko (Ed.), Leningrad: Gidrometeoizdat, 1977, pp. 169–197.
42. Tonkonogov V.D., Evolutionary-genetic classification of soils and nonsoil surface formations, *Eurasian Soil Sci*., 2001, Vol. 34, No. 6, pp. 577–583.
43. Tonkonogov V.D., *Avtomorfnoe pochvoobrazovanie v tundrovoi i taezhnoi zonakh Vostochno-Evropeiskoi i Zpadno-Sibirskoi ravnin* (Automorphic pedogenesis in tundra and taiga zones of the East European and Western Siberian plains), Moscow: V.V. Dokuchaev Soil Science Institut, 2010, 287 p.
44. Fridland V.M., Karavaeva N.A., Rudneva E.N. et al., *Programma Pochvennoi karty SSSR masshtaba 1 : 2 500 000* (Program of the Soil Map of the USSR of 1 : 2.5 M Scale), Moscow: V.V. Dokuchaev Soil Science Institut, 1972, 160 p.

45. *Soil Atlas of the Northern Circumpolar Region*, Europ. Commission Office for Official Publ., Luxembourg, 2010, 142 p.
46. *Tarnocai C.,* Classification of Cryosols in Canada, Kimble J.M. (Ed.), *Cryosols. Permafrost-Affected Soils.,* Berlin Heidelberg: Springer-Verlag., 2004, pp. 599–610.
47. *IUSS Working Group WRB,* 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, 2015, 202 pp.
48.

УДК 631.41
DOI: 10.19047/0136-1694-2020-101-76-123

Ссылки для цитирования:
Матвеева Н.В., Милановский Е.Ю., Хайдапова Д.Д., Рогова О.Б. Краевой угол смачивания как интегральный показатель физико-химических свойств черноземов Каменной степи // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2020. Вып. 101. С. 76-123. DOI: 10.19047/0136-1694-2020-101-76-123

Cite this article as:
Matveeva N.V., Milanovsky E.Yu., Khaidapova D.D., Rogova O.B., The contact angle of wetting as an integral indicator of physical-chemical properties of Chernozems of Kamennaya Steppe, Dokuchaev Soil Bulletin, 2020, V. 101, pp. 76-123, DOI: 10.19047/0136-1694-2020-101-76-123

Благодарность:
Работа выполнена с использованием оборудования, приобретенного по Программе развития МГУ.

Acknowledgments:
The research was carried out using equipment purchased in the framework of the Moscow State University Development Program.

Краевой угол смачивания как интегральный показатель физико-химических свойств черноземов Каменной степи

© 2020 г. Н. В. Матвеева[1*], Е. Ю. Милановский[2], Д. Д. Хайдапова[2], О. Б. Рогова[1]

[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 02.11.2019, *после доработки* 26.02.2020, *принята к публикации* 04.03.2020

Резюме: Методом сидячей капли измеряли краевой угол смачивания (КУС) чернозема обыкновенного опытных полей агроландшафта Каменная степь ряда вариантов использования, различающихся как интенсивностью механического воздействия (заповедная косимая степь, вспашка с оборотом пласта), применением минеральных удобрений и их

последействием, а также изменением свойств почвы под действием орошения. Одновременно для физико-химической характеристики почв определяли общее содержание $C_{орг}$, отношение C/N, площадь удельной поверхности и реологические показатели. Результаты исследования показали, что гидрофильно-гидрофобные свойства поверхности твердой фазы почв, во многом определяющие основные структурообразующие свойства почв, могут быть охарактеризованы величиной краевого угла смачивания. Величина КУС исследованных образцов почв варьирует от 32 (наибольшая смачиваемость) до 45 градусов (наименьшая смачиваемость). Наименьшая смачиваемость обусловлена повышенным содержанием гидрофобных соединений в составе органического вещества почв и характеризуется наибольшими величинами КУС и характерна для нативной, не обрабатываемой почвы косимой степи, которая отличается от других исследованных вариантов опыта по всем изученным физико-химическим показателям. Механическая обработка почвы в виде вспашки с оборотом пласта, парование приводят к изменениям физико-химических свойств почв и качественного состава органического вещества в сторону их ухудшения и снижению величины КУС. Применение минеральных удобрений способствует увеличению исследуемого показателя преимущественно за счет изменения продуктивности растений, в частности различия КУС обусловлены воздействием на свойства почвы корневых выделений и растительных остатков. Для изученных почв величина КУС меняется в следующем ряду: Косимая степь > пашня с внесением минеральных удобрений > пашня в условиях последействия удобрений. Корреляционный анализ выявил связь КУС с содержанием органического углерода, площадью удельной поверхности и реологическими характеристиками черноземов. Таким образом, КУС может служить интегральным показателем изменения физико-химических свойств почв, их деградационных изменений в условиях различной агрогенной нагрузки. Используемый метод определения КУС требует меньшего количества образца по сравнению с реологическими методами и в целом более информативен, чем определение содержания органического вещества.

Ключевые слова: смачиваемость, гидрофильность, гидрофобность, краевой угол смачивания, системы землепользования.

The contact angle of wetting as an integral indicator of physical-chemical properties of Chernozems of Kamennaya Steppe

N. V. Matveeva[1*], E. Yu. Milanovsky[2], D. D. Khaidapova[2], O. B. Rogova[1]

[1]V.V. Dokuchaev Soil Science Institute,
7 Bld. 2 Pyzhevskiy per., Moscow 2119017, Russian Federation,
[*]e-mail: Nataliy_Matveeva@list.ru.

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

Received 02.11.2019, *Revised* 26.02.2020, *Accepted* 04.03.2020

Abstract: The sessile drop method was used to measure the contact angle of wetting (CA) of ordinary Chernozem from the fields of the Kamennaya Steppe agrolandscape used in various ways. The treatments differ in the intensity of tillage operations (protected mowed steppe, arable land after moldboard plowing), the use of mineral fertilizers and their aftereffect, as well as changes in soil properties under the influence of irrigation. At the same time, the total organic carbon content, C/N ratio, specific surface area, and rheological parameters were determined for the physical and chemical characteristics of soils. The results of the study showed that the hydrophilic-hydrophobic properties of the surface of the solid phase of soils, which largely determine the main structure-forming properties of soils, can be characterized by the value of the wetting edge angle. The CA of the studied soil samples varies from 32 degrees (highest wettability) to 45 degrees (lowest wettability). The lowest wettability is due to the increased content of hydrophobic compounds in the organic matter of soils and is characterized by the highest CA and is typical for native, untreated soil of the mowed steppe, which differs from other studied variants of the experiment in all explored physical and chemical parameters. Moldboard plowing as well as fallowing lead to changes in the physical and chemical properties of the soil and the qualitative composition of organic matter in the direction of their deterioration and a decrease in the CA. The use of mineral fertilizers contributes to the increase in the studied indicator mainly due to changes in plant productivity, in particular, the differences in CA are due to the impact of root secretions and plant residues on the soil properties. For the studied soils, the CA changes in the following series: mowed steppe > arable land with the mineral fertilizers application > arable land undergone the aftereffect of fertilizers. Correlation analysis revealed the relationship of CA with organic carbon content, specific surface area, and rheological characteristics of Chernozems. Thus, CA can serve as an integral indicator of changes in the physical and chemical properties of soils, their degradation changes under the conditions of different agricultural load. The method used in this research for determining CA requires a smaller

amount of sample compared to rheological methods and is generally more informative than determining the content of organic matter.

Keywords: wettability, hydrophilicity, hydrophobicity, contact angle of wetting, land use system.

ВВЕДЕНИЕ

В условиях интенсификации сельского хозяйства, а также при все возрастающем уровне антропогенного изменения ландшафтов встает вопрос о необходимости более глубокого изучения взаимосвязи химического состава и физических свойств почв и их изменения при различных воздействиях. Для оценки нативного состояния почв следует использовать интегральные физико-химические показатели объекта, измерение которых не влияет на естественное состояние почв. В качестве такого показателя предлагается использовать краевой угол смачивания, характеризующий гидрофобно-гидрофильные свойства поверхности твердой фазы почв и связанный с содержанием и качественным составом органического вещества в почве (Милановский и др., 2005; Милановский, 2009; Bachmann, 2000). Поверхностные свойства твердой фазы, такие как гидрофобность и гидрофильность, влияют на образование межчастичных контактов и типы образующихся структур (Markgraf et al., 2006; Хайдапова и др., 2016). При этом в процессе гумификации/минерализации происходит трансформация органического вещества (ОВ), гидрофобно-гидрофильные свойства которого зависят от условий его образования, т. е. от количества воды и кислорода (Aquino et al., 2011; Милановский, Шеин, 2002). Степень смачивания почв водой определяет большинство процессов, происходящих в почве, таких как скорость поверхностного стока, передвижение влаги в профиле почвы и доступность элементов питания для растений и биоты (Воронин, 1975; Шеин, 2005). В работе (Kraemer et al., 2019) показано, что водоотталкивающая способность (а, следовательно, и обратное свойство – смачиваемость) является основным свойством, влияющим на стабилизацию структуры почвы, что определяет ее качество. Однако считать, что это прямая взаимосвязь, будет неправильно, т. к. на стабильность почвенных агрегатов влияют очень многие факторы, например, гранулометрический состав, количество и состав

органического вещества и минеральной части почвы (Jaramillo, 2003; Dlapa et al., 2004). В ряде работ (Wallis, Horne, 1992; De Gryze et al., 2006) отмечено повышение смачиваемости при увеличении доли минеральных компонентов, которые, в свою очередь, уменьшают площадь удельной поверхности, но такие закономерности прослеживаются не всегда (Doerr et al., 2000; Vogelmann et al., 2013). Мерой смачивания твердых тел жидкостью является краевой угол (Адамсон, 1979). В зарубежной литературе используют термин – контактный угол смачивания (contact angles of wetting) (Bahrani et al., 1973; Carrillo et al., 1999; Burghardt, 1985; Bachmann, 2001; Woche et al., 2005; Yang et al., 2015). Существует множество методов определения этого показателя (Bahrani et al., 1973; Doerr, 1998; Papierowska et al., 2018), но чаще всего в лабораторных условиях измерение краевого угла смачивания (КУС) проводят двумя основными методами – методом подъема капиллярной каймы (capillary rise, CRM) (Adamson, 1990; Liu, Wan, 2016) или же методом сидячей капли (sessile drop method, SDM) (Ryley, Khoshaim, 1977). Последний метод часто применяют для определения гидрофобно-гидрофильных свойств поверхности различных материалов (Витязь и др., 1986; Киселев и др., 2006), однако, использование этого метода для характеристики почв имеет ряд сложностей. Точность и воспроизводимость результатов измерения КУС будет зависеть от толщины слоя образца, от степени его гомогенизации и равномерного нанесения на ровную поверхность, используемую в эксперименте. В качестве основы для нанесения почвенного образца некоторые исследователи используют двустороннюю клейкую ленту, закрепленную на предметном стекле (Bachmann et al., 2000) или на ткани (Lamparter et al., 2010), для более полного охвата образцом поверхности клейкой ленты. Однако этот способ не гарантирует равномерности и равномерной 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). Для снижения влияния на величину КУС свойств поверхности, на которую наносится образец, а также уменьшения количества образца предложена методика подготовки образцов путем высаживания

водных суспензий на предметные стекла (Wu, 2001). Однако таким образом сложно обеспечить необходимую толщину слоя анализируемого образца и избежать появления неоднородности при высыхании. Оценка точности и применимости разных методов пробоподготовки почвенных образцов к измерению КУС дана в работе (Матвеева и др., 2019). Авторами был предложен метод подготовки образцов почв с использованием мембранных фильтров, позволяющий снизить варьирование измеряемой величины и минимизировать количество используемого образца почвы, который и использовался в настоящем исследовании. В данной работе применялась методика пробоподготовки с использованием мембранных фильтров, т. к. при сравнении КУС почв одного генезиса особенно важно максимально снизить варьирование измеряемой величины, зависящее от способа пробоподготовки.

Предположение, что гидрофобно-гидрофильные свойства твердой фазы почв могут служить интегральным показателем почвенных свойств, основано на особенностях строения и формирования ОВ не только в процессе почвообразования на определенной территории, но и трансформации гидрофобного-гидрофильного состава гумусовых веществ (ГВ) *in situ* при изменении внешнего воздействия на почву. В данной работе мы исследовали чернозем природно-антропогенного ландшафта Каменная степь. Изменению гумусного состояния почв Каменной степи посвящено большое количество работ (Кононова, Бельчикова, 1953; Адерихин, Богатырева, 1974; Зборищук, 2007), особенно в последние годы (Кузелев и др., 2007; Когут и др., 2009; Чевердин, Беспалов, 2011; Лебедева и др., 2016; Беспалов, и др., 2018; Мамонтов, Соколовская, 2018). По ним можно сформулировать следующие основные выводы:

- содержания гумуса в верхнем слое 0–20 см чернозема изменяется в следующем направлении – некосимая степь > лесополоса > пашня (Зборищук, 2007);
- в большинстве исследованных черноземах тип гумуса гуматный, а в составе гуминовых кислот преобладает фракция, предположительно связанная с кальцием, что обусловлено увеличением карбонатности почв с глубиной (Зборищук, 2007);
- потери гумуса за счет минерализации при вовлечении

обыкновенного чернозема в пашню достигают за 100 лет 30% в пахотном горизонте и 25% в полуметровой толще (Кузелев и др., 2007);

- увеличение количества растительных остатков в совокупности с улучшением гидротермального режима интенсифицирует гумификацию, в результате которой возрастает доля гуминовых кислот, но при этом увеличивается и их подвижность, поэтому их часть перемещается в подпахотные горизонты. Подвижность ГВ определяется поведением в водной среде, что напрямую связано с гидрофобно-гидрофильными свойствами ГВ;
- система показателей гумусового состояния практически не фиксирует развитие негативной трансформации органической части орошаемых черноземов по сравнению с неорошаемыми. Однако состав и свойства их лабильных гумусовых веществ (ЛГВ) будет отличаться (Мамонтов, Соколовская, 2018). Имеющие для нас интерес гидрофобно-гидрофильные свойства ГВ будут зависеть от условий гумусообразования, доступа кислорода и воды в процессе минерализации ОВ, а также выноса подвижных гидрофильных компонентов из пахотного слоя вниз по профилю почвы.

Таким образом, состав ГВ чувствителен к видам и изменениям нагрузки, при этом любые изменения в строении гумусовых кислот повлияют на их амфифильные свойства. При изучении перестройки структуры гуминовых кислот в зависимости от способов обработки почвы (Скрыльник и др., 2018) исследователи уделяют особое внимание формам воды, находящейся в почве, а также соотношению и виду функциональных групп ГК. Показано, что влияние обработки почвы на устойчивость супрамолекулярной организации ГК определяется изменением условий гумификации, что обусловливает образование нестабильной водной структуры и отсутствие гидрофобного (неполярного) микроокружения лабильных гидрофильных ГВ (Aquino et al., 2011). Гидрофобные компоненты ГВ предохраняют новообразованные ГВ от микробиологической минерализации, тем самых сохраняя баланс гумуса (Cihlář, et al., 2014). Вспашка почвы приводит к увеличению содержания кислородсодержащих функциональных групп ГК (OH– и C=O карбоксильных групп), что увеличивает реакционную активность

ГК. При этом отмечается стабилизация ГК преимущественно за счет Н-связей между кислородсодержащими группами ароматических структур, что вызывает гидрофильную гидратацию и увеличение содержания свободной воды. Интенсивное перемешивание пахотного слоя и доступ кислорода повышает микробную активность, что приводит к большей минерализации ГВ. Отсутствие вспашки снижает содержание кислорода и свободной воды в верхнем слое почвы, что приводит к увеличению в составе ГК неполярных ароматических (гидрофобных) структур и к снижению образования в составе ОВ лабильных доступных питательных веществ вследствие накопления трудноминерализуемого ОВ (Скрыльник и др., 2018). Поэтому изучение динамики изменения гидрофобно-гидрофильных свойств твердой фазы почв позволит отслеживать их деградационные изменения при антропогенной нагрузке.

Для того, чтобы охарактеризовать свойства изучаемых почв, определялось содержание ОВ, площадь удельной поверхности, а также реологические характеристики (модуль упругости в диапазоне LVE-range, диапазон линейной вязкоупругости, точка разрушения структуры Crossover), которые позволяют говорить об устойчивости почвы к нагрузкам, т. е. способности препятствовать деформационным изменениям и восстанавливаться после внешнего воздействия. Установление взаимосвязи КУС почв с содержанием органического вещества, площадью удельной поверхности и реологическими характеристиками позволит сделать выводы о возможности использования КУС в качестве интегрального показателя для оценки свойств и качества почв с целью регулирования антропогенной нагрузки.

Цель работы – с помощью измерения краевого угла смачивания выявить изменения свойств поверхности твердой фазы почв при различных системах землепользования.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Исследование проведено на образцах почв из слоя 0–20 см чернозема обыкновенного опытных полей ФГБНУ ВНИИСХ ЦЧП им. В.В.Докучаева Таловского района Воронежской области. Исследуемая почва, по классификации 1977 г. (Егоров и др., 1977), –

чернозем обыкновенный среднегумусный среднемощный глинистый на покровной карбонатной лессовидной глине; по классификации 2004 г. (Шишов и др., 2004), распахиваемые варианты относятся к агрочернозему; Haplic Chernozem, по WRB (WRB, 2014).

В тексте работы исследуемые почвы всех распахиваемых опытных участков будут называться “агрочерноземами”, а почва косимой степи – “степью”.

Исследованы образцы почв 9 делянок опытных полей, расположенных на территории природно-антропогенного ландшафта Каменная степь. По степени антропогенной нагрузки они разделяются на 3 группы:

- контрастные варианты – с минимальной агротехнической нагрузкой “Косимая степь” (более 100 лет); максимальной нагрузкой – бессменный “Черный пар” (с 1962 г.) и “Кукуруза бессменная” (с 1962 г.);

- варианты с постоянным внесением минеральных удобрений, в соответствии с требованием севооборота (действия), и

- после прекращения внесения (последействия) минеральных удобрений NPK.

В двух последних вариантах были выделены участки контроля без применения удобрений и участки с внесением одной и двух доз минеральных удобрений NPK. Опытный участок с применением удобрений до 2000 г. в течение 30 лет был орошаемым (участки последействия орошения обозначены буквой “о”). На участке действия удобрений шестипольный севооборот – черный пар, озимая пшеница, сахарная свекла, ячмень, кукуруза. Образцы отобраны под сахарной свеклой в 2013 г. На участке последействия удобрений десятипольный севооборот – горох, озимая пшеница, сахарная свекла, ячмень, кукуруза на зерно, горох, тритикале, просо, ячмень, кукуруза на зерно. Удобрения вносили с 1991 г. по 2009 г., образцы отобраны под кукурузой в 2013 г.

Исследуемые черноземы различаются характером и формой органического вещества, поступающего в горизонты профиля. Количество поступающего свежего органического вещества в верхнем слое 0–20 см почвы максимально в черноземе косимой степи, оно представлено остатками стеблей, корневыми остатками трав и продуктами их гумификация *in situ*. Почвы пашни характеризуют-

ся меньшим поступлением свежего органического вещества ввиду его изъятия с урожаем и ежегодной распашкой, в исследуемых образцах агрочернозема свежее органическое вещество представлено пожнивными остатками и опадом корней. В почву бессменного пара в течение периода более 40 лет растительные остатки не поступали.

По классификации Н.А. Качинского, пахотный горизонт исследуемых агрочерноземов имеет среднесуглинистый гранулометрический состав. Содержание физической глины в нем варьировало от 26 до 46%. Содержание ила имело меньшее варьирование, однако следует отметить, что на участках последействия орошения в пахотном слое чернозема наблюдалось повышенное содержание ила по сравнению с остальными делянками. Такое явление свойственно для орошаемых почв и подробно описано в работах многих исследователей (Щеглов, 1995; Королев, 2008; Щеглов и др., 2013; Горбунова, Куликова, 2017).

Таким образом, основные отличия свойств почв исследуемых вариантов опыта обусловлены различием в обработке, применяемых севооборотах, внесением или прекращением применения удобрений, а также последействием орошения.

Аналитическая характеристика образцов почв включала содержание органического углерода, определяемое мокрым сжиганием методом Тюрина с титриметрических окончанием (Аринушкина, 1970); общее содержание C и N – методом сухого сжигания на анализаторе Vario MAX CN в ЦКП Института Географии РАН. Пробоподготовка почв заключалась в их растирании до состояния пудры, затем проводилось взвешивание на микроаналитических весах нескольких мг с последующим запаиванием в металлических капсулах. Температура сжигания 1200 ºС. Содержание C и N рассчитывалось по количеству выделившихся газов (CO_2 и NO). Погрешность измерения составляла < 0.5%; площадь удельной поверхности измерена по низкотемпературной адсорбции-десорбции азота на анализаторе СОРБОМЕТР-М. Принцип работы прибора основан на использовании метода тепловой десорбции газа-адсорбата (азота) с поверхности образца в динамических условиях. Образцы почв предварительно были высушены под вакуумом при температуре 105 °С в течение 24 ч. Для уда-

ления с поверхности исследуемого материала поглощенных газов и паров перед началом испытаний проводилась дополнительная дегазация образца почвы за счет прогрева в стационарном потоке азота при температуре 105 ºС. Образец проходил следующие этапы в ходе анализа:

1) установление заданного состава газовой смеси;

2) адсорбция газа-адсорбата на поверхности образца из потока газовой смеси при температуре равной -196 ºС до установления равновесия между содержанием газа-адсорбата в газовой и адсорбционной фазах;

3) десорбция газа-адсорбата с поверхности образца в поток газовой смеси при нагревании образца до температуры полной десорбции газа-адсорбата (~100 ºС).

Изменение в процессах адсорбции/десорбции объемной доли газа-адсорбата в газовой смеси регистрируется детектором по теплопроводности. По результатам измерений объема десорбированного газа, произведенных при различных составах газовой смеси, прибор производит расчет удельной поверхности исследуемого образца по методике одноточечного метода БЭТ.

Гранулометрический состав определяли методом лазерной дифракции на приборе Mastersizer 3000 (Yudina et al., 2018).

КУС определяли методом статической сидячей капли (Ryley, Khoshaim, 1977; Burghardt, 1985) на цифровом гониометре (Система Анализа Формы Капли, DSA100, Kruss, Германия), оснащенном видеокамерой. Метод позволяет получать значения КУС путем построения касательной в точке раздела трех фаз – вода, почва, воздух.

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 КУС. Так как почва обладает высокой впитывающей способностью (Shang et al.,

2008), то КУС определяют по первому четкому кадру в момент посадки капли на образец и удаления иглы (рис. 1).

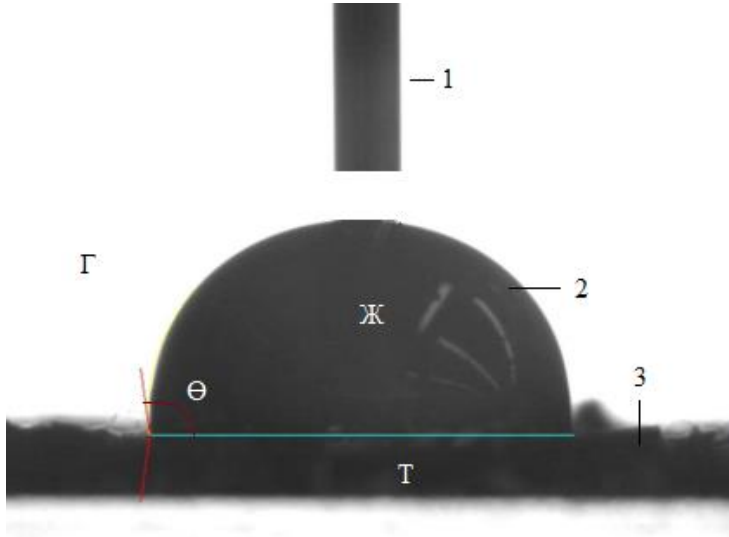


Рис. 1. Определение краевого угла смачивания. 1 – подающая жидкость игла; 2 – капля жидкости; 3 – исследуемый образец; Θ – краевой угол смачивания.
Fig. 1. Determination of contact angle. 1 –needle for drop delivery; 2 – a drop of liquid; 3 – the test sample; Θ – contact (wetting) angle.

Ровную поверхность образца для измерения КУС получали на мембранном фильтре путем осаждения на нем почвенной суспензии и размещения фильтра с осадком на предметном стекле. Для приготовления почвенной суспензии использовали растертые воздушно-сухие образцы почв, просеянные через сито d = 0.25 мм. Для гомогенизации водную суспензию образца подвергали воздействию ультразвука (Branson Digital Sonifier 250) с энергией 450 Дж/мл. Концентрация почвенного образца на мембранном фильтре составила 1.6 мг/см^2. Данная методика (Матвеева и др., 2019) позволяет более чем в два раза снизить варьирование величины КУС по сравнению с применением двухсторонней клейкой ленты (Bachmann et al., 2000).

На исследуемых делянках было отобрано от 3 до 5 образцов, для каждого из которых подготовлено 2 мембранных фильтра с осажденной суспензией, количество измерений КУС на одном фильтре 6 и стандартное отклонение для каждого варианта землепользования рассчитано для 36–60 повторностей измерения. Стандартное отклонение измерений на одном мембранном фильтре составляло от 0.6 до 4.9, что соответствует точности, заявленной в работе (Матвеева и др., 2019).

Реологические свойства (модуль упругости в диапазоне LVE-range, диапазон линейной вязкоупругости, точка разрушения структуры Crossover) определяли методом амплитудной развертки на реометре MCR-302 (Markgraf et al., 2006; Хайдапова и др., 2016) с измерительной системой параллельных плато PP-25. Испытуемый образец помещали на нижнее плато, верхнее плато опускали с нормальной силой давления < 5 N. Верхнее плато осуществляет колебательные движения с расширяющейся амплитудой колебаний в осцилляционном режиме. Параметры измерения: программа Start Rheoplus – режим Amplitude Sweep, количество точек измерения – 30, длительность измерения одной точки – 15 с, угловая частота измерения – 0.5 Гц, диапазон деформации (напряжения) γ от 0.001 до 100% lg. Измерения проводили при постоянной температуре 20 °C (Markgraf et al., 2006). Подготовка почвенных паст осуществлялась следующим образом: образцы почвы растирали пестиком с резиновым наконечником и просеивали через сито d = 1 мм. Затем 3 г воздушно-сухого образца помещали в цилиндры с d = 25 мм, подобранные по размеру измерительной системы, выравнивая поверхность почвенной массы поршнем. Цилиндры с образцами ставили в установку с дистиллированной водой для капиллярного насыщения в течение суток. На рисунке 2 приведен пример получаемых результатов осцилляционного амплитудного теста.

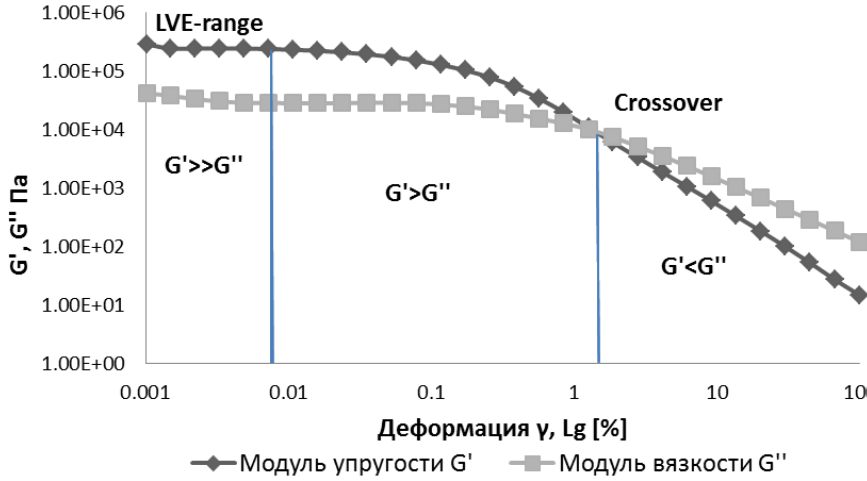


Рис. 2. Модуль упругости G' и модуль вязкости G" чернозема (контрольный образец варианта действия удобрений и последействия орошения – Ко).
Fig. 2. Elastic modulus G' and viscosity modulus G" of Chernozem (control sample of fertilizer action and irrigation aftereffect – Ko).

Метод амплитудной развертки позволил рассчитать следующие реологические характеристики почв:

1. Модуль упругости (G', Па) – мера энергии деформации, сохраненная образцом во время процесса сдвига. После прекращения сдвигового усилия эта энергия действует как движущая сила для процесса восстановления полученных деформаций. Материалы, которые сохраняют полностью примененную энергию деформации, показывают поведение абсолютно обратимой деформации (Mezger, 2011).

2. Модуль потерь (G", Па) или вязкости – мера энергии деформации, израсходованная образцом во время сдвигового процесса. Эта энергия тратится во время процесса изменения структуры материала, т. е. движения между молекулами, группами, частицами. Трение между этими компонентами приводит к повышению температуры. Часть энергии подогревает образец, а другая

часть теряется в форме тепла в окружающую среду. Теряющие энергию материалы показывают необратимое деформационное поведение, или так называемое вязкое поведение (Хайдапова и др., 2014).

3. Диапазон линейной вязкоупругости (LVE-range) – область упругого поведения, область параллельного оси x хода кривых модулей упругости и вязкости. При этом G' >> G". Предел диапазона по оси x (деформация, %) – величина деформации, после которой начинается понижение модуля упругости. Чем длиннее этот диапазон, тем устойчивее почвенная структура к нагрузкам (Хайдапова и др., 2016).

4. Величина модуля упругости G' в диапазоне линейной вязкоупругости характеризует прочность структурных связей в исследуемом образце.

5. Предел текучести (Crossover) или точка пересечения модулей G' = G" указывает величину деформации, при которой деформационное поведение переходит от пластичновязкого к вязкому. После прохождения точки Crossover деформация становится необратима (Mezger, 2011).

Статистическая обработка результатов проводилась в программе STATISTICA10 (StatSoft, RU). Нормальность распределения величин КУС для каждого образца проверяли по критерию нормальности Колмогорова – Смирнова (Lilliefors, 1967). Значимость отличий определяли с помощью критерия Краскела-Уоллиса. Для анализа схожести свойств использовали метод главных компонент.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

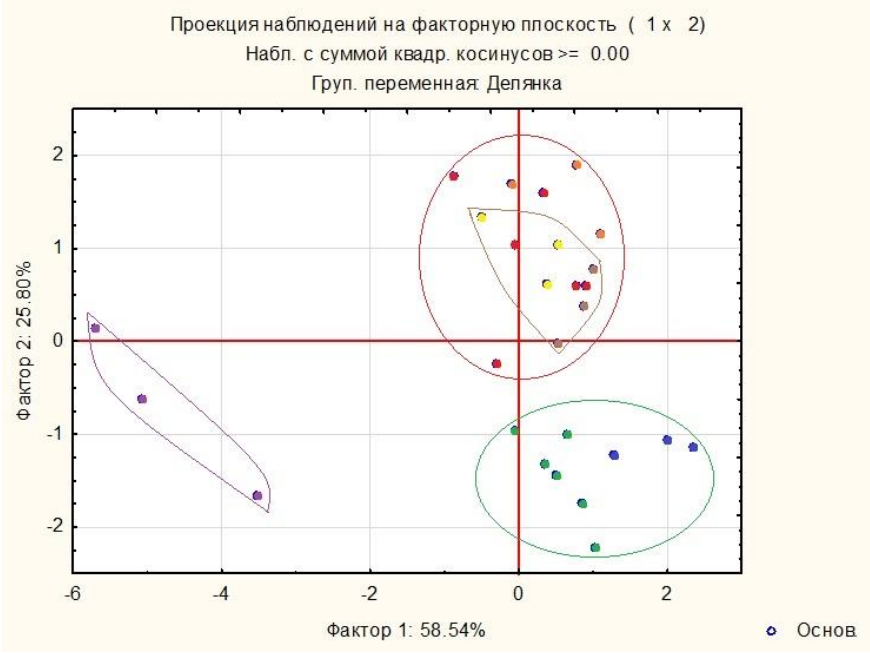
Визуальное представление о различиях свойств чернозема разных вариантов опыта позволил получить метод главных компонент (рис. 3). Группирующая переменная – делянка; зависимые переменные – исследуемые свойства ($C_{орг}$, КУС, площадь удельной поверхности, модуль упругости, деформация LVE-range, деформация в точке разрушения структуры Crossover). Чем ближе между собой точки на графике, тем больше они схожи по совокупности изученных свойств. Отметим, что варианты опытов с действием и последействием удобрений четко отличаются между

собой, кроме того, отличаются также между собой и делянки контрольных опытов без внесения удобрений. Различия контрольных вариантов обусловлены, по всей видимости, разницей поступающего растительного материала в кормовом (вариант действия удобрений) и зерновом (вариантах последействия) севооборотах, а также изменением гранулометрического состава и гидрофобно-гидрофильных свойств ОВ под действием орошения. Разница совокупных свойств чернозема на делянках с внесением удобрений и контрольным участком, а также делянок последействия удобрений с соответствующим им контрольным участком обусловлены влиянием удобрений или же изменением нагрузки на почву при их отмене.

Делянки “Черного пара” и “Кукурузы бессменной” по совокупности свойств оказались ближе к варианту последействия удобрений. Из чего можно сделать вывод, что отмена внесения удобрений при севообороте сопоставима по нагрузке на почву в экстремальных вариантах опыта, таких как парование или бессменное выращивание монокультуры. Применение минеральных удобрений несколько приблизило свойства агрочернозема к чернозему “Косимой степи”.

По всей видимости, фактор 1 на рисунке 3 обуславливает обработку почвы, по этому фактору идет разделение делянок по наличию и отсутствию вспашки. Фактор 2 может показывать изменение свойств почв при различной нагрузке в виде применяемых севооборотов и удобрений. Так чернозем делянок с внесением удобрений оказался ближе по совокупности свойств к черноземy “Косимой степи”, в то время как отмена применения удобрений отдаляет по фактору 2 агрочернозем от почвы степи.

Результаты измерения КУС и содержания $C_{орг}$ (%) чернозема всех исследуемых делянок представлены на рисунке 4 и в таблице 1. Помимо определения содержания $C_{орг}$ для каждой делянки чернозема было определено среднее общее содержание C и N на анализаторе Vario MAX CN с целью расчета соотношения C/N.



Контроль варианта действия удобрений
Действие удобрений – NPKo и 2NPKo
Контроль варианта последействия удобрений
Последействие удобрений – NPK и 2NPK
Черный пар
Кукуруза бессменная
Косимая степь

Рис. 3. Ординация делянок чернозема по методу главных компонент.
Fig. 3. Ordination of plots of Chernosem by principal component method.

Таблица 1. Содержание углерода и азота в слое 0–20 см чернозема
Table 1. Carbon and nitrogen content in the layer of 0–20 cm of Chernozem

Варианты опыта		$C_{орг.}$, %	C/N
Действие удобрений	Ко	3.8 + -0.2	11.5
	NPKo	4.0 + -0.2	11.7
	2NPKo	4.31 + -0.07	12.1
Последействие удобрений	К	4.0 + -0.2	12.2
	NPK	4.1 + -0.1	12.3
	2NPK	3.7 + -0.4	12.4
Контрастные варианты	Пар	3.9 + -0.6	12.2
	Степь	5.7 + -0.2	11.7
	Кукуруза	4.0 + -0.4	11.8

Примечание. Доверительный интервал рассчитан для уровня значимости α = 0.95; о – последействие орошения.

Как видно из данных, представленных в таблице 1, чернозем пашни содержит приблизительно на 1/3 меньше углерода по сравнению с почвой степи, что согласуется с имеющимися представлениями (Кузелев и др., 2007). Помимо общего содержания C и N в почве важным является соотношение C/N, которое показывает степень обогащенности органического вещества азотом. Наиболее обогащено азотом органическое вещество чернозема степи, кукурузы бессменной, вариантов контроля и применения одной дозы NPK (C/N = 11.5–11.8), ОВ чернозема вариантов последействия удобрений оказалось менее всего обогащено азотом (C/N = 12.1–12.4).

Влияние минеральных удобрений

Средние значения величины КУС чернозема опытных делянок Каменной степи варьировали от 32 до 45 градусов (рис. 4). Различия в системах землепользования и применении удобрений обуславливают изменение химического состава и физических свойств почв, что находит свое отражение в величине КУС.

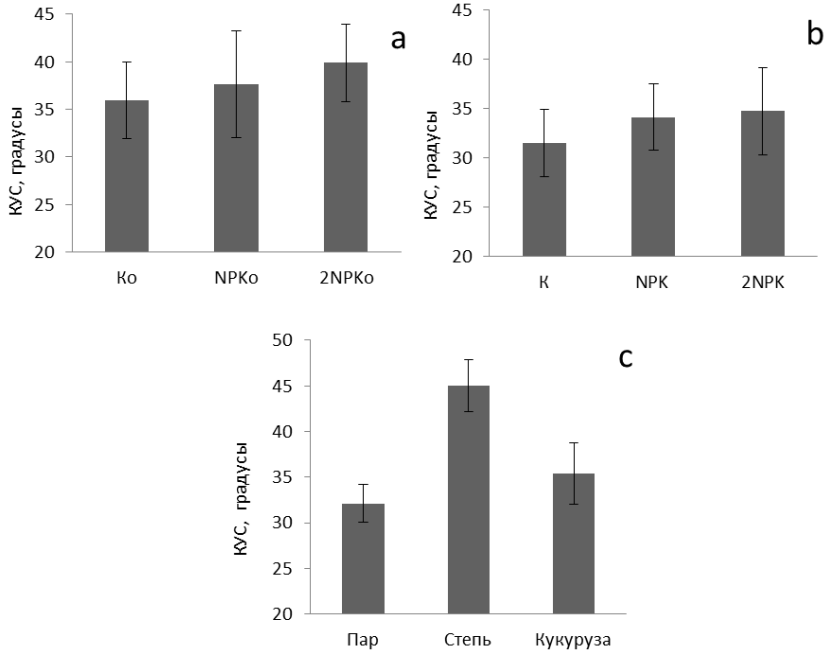


Рис. 4. Краевой угол смачивания исследуемых почв Каменной степи. a – действие удобрений, b – последействие удобрений, c – варианты контрастные. К – контроль, NPK и 2NPK – одна и две дозы вносимых минеральных удобрений соответственно.
Fig. 4. Contact angle of the studied soils of Kamennaya Steppe. a – effect of fertilizers, b – aftereffect of fertilizers, c – contrast variants. K – control, NPK and 2NPK – one and two doses of mineral fertilizers, respectively.

В вариантах опыта с применением минеральных удобрений (рис. 4a) наблюдается тенденция к увеличению угла смачивания, а значит и гидрофобности почв с увеличением дозы удобрений, однако пространственное варьирование исследуемого показателя не позволяет говорить о достоверности отличий между исследованными делянками.

Прекращение внесения минеральных удобрений (рис. 4b) способствует нивелированию различий КУС опытных участков с

одной и двумя дозами вносимых удобрений, а также участки последействия применения минеральных удобрений по смачиваемости уже через 4 года становятся близки по величине КУС к контролю. Что говорит о возвращении почв к исходному состоянию при отмене одного из факторов антропогенной нагрузки.

На гидрофобно-гидрофильные свойства почв влияют корневые выделения растений (Moradi et al., 2012), в работе (Benard et al., 2018) показана роль корневых экссудатов различных сельскохозяйственных культур, увеличивающих гидрофобность поверхности твердой фазы почв. На участках действия и последействия минеральных удобрений антропогенную нагрузку оказывает распашка, а используемые севообороты и внесение удобрений (или их отмена) может обуславливать разницу КУС этих вариантов опыта. Кроме того, участок действия удобрений ранее был орошаемым, что обусловливает разницу величины КУС на контрольных участках (рис. 4a, 4b). Как известно (Милановский, Шеин, 2002), условия гумификации, такие как доступ кислорода и воды, влияют на гидрофобно-гидрофильные свойства образующихся ГВ. При избытке кислорода образуются преимущественно гидрофильные ГВ, что чаще наблюдается в поверхностном слое почвы. При минерализации внутри минеральной массы на некоторой глубине наблюдается относительное накопление гидрофобных органических молекул. По всей видимости, более высокие значения величины КУС агрочернозема контрольного участка варианта последействия орошения (рис. 4a) указывают как на особенности гумификации *in situ*, так и на вымывание гидрофильных ГВ вниз по профилю.

На участке с контрастными вариантами опыта различия КУС почвы “Черного пара“ и “Кукурузы бессменной” могут определяться наличием/отсутствием растительных остатков и экссудатов корней кукурузы. Данное предположение согласуется с результатами исследования влияния корневых выделений сельскохозяйственных культур, в том числе и корневых выделений кукурузы, на гидрофобно-гидрофильные свойства почв при моделировании системы с использованием песка и ила с различным содержанием корневых выделений растений (Ahmed et al., 2016; Moradi et al., 2012; Zickenrott et al., 2016). Отмечалось увеличение

гидрофобности поверхности песка при увеличении содержания в нем корневых выделений кукурузы (Zickenrott et al., 2016). Поверхность растительных остатков, в большом количестве поступающих в почву при выращивании кукурузы, также является гидрофобной. Корневые выделения кукурузы и растительные остатки, процессы их разложения и характерные для этого микробные сообщества, по всей видимости, и обуславливают различия в величинах КУС, определенных для участка "Черного пара" и "Кукурузы бессменной".

Максимальные значения КУС наблюдались в почве "Косимой степи", что может быть связано с большим содержанием органического вещества и активностью микроорганизмов (Стахурлова и др., 2007). Кроме того, почва степи, в отличие от агрочерноземов, характеризуется отсутствием нагрузки в виде вспашки, внесения удобрений и применения севооборотов. По всей видимости, свойства поверхности твердой фазы зависят от совокупности факторов.

Связь КУС с содержанием углерода

Почвы вариантов опыта с внесением минеральных удобрений характеризуются большими величинами КУС по сравнению с вариантами последействия удобрений (рис. 5), что свидетельствует об изменении свойств поверхности твердой фазы почв под действием удобрений. Внесение удобрений незначительно повлияло на содержание $C_{орг.}$ (%), и значимой корреляционной зависимости между КУС и содержанием $C_{орг.}$ (%) для этих вариантов опыта не выявлено. Большее влияние на содержание $C_{орг.}$ в слое 0–20 см агрочернозема оказывает характер обработки и использования. При анализе графика (рис. 5) может показаться, что есть прямая связь между содержанием $C_{орг.}$ и величиной КУС. Так, коэффициент детерминации для контрастных вариантов опыта был равен 0.92, однако эта связь кажущаяся, о чем говорит выброс точек, обозначающих делянки косимой степи, и полученный коэффициент детерминации не позволяет говорить о прямой корреляции между величиной КУС и содержанием $C_{орг.}$ Вместе с тем отчетливо видно, что агрочернозем распахиваемых участков резко отличается по совокупности своих свойств от почвы косимой степи.

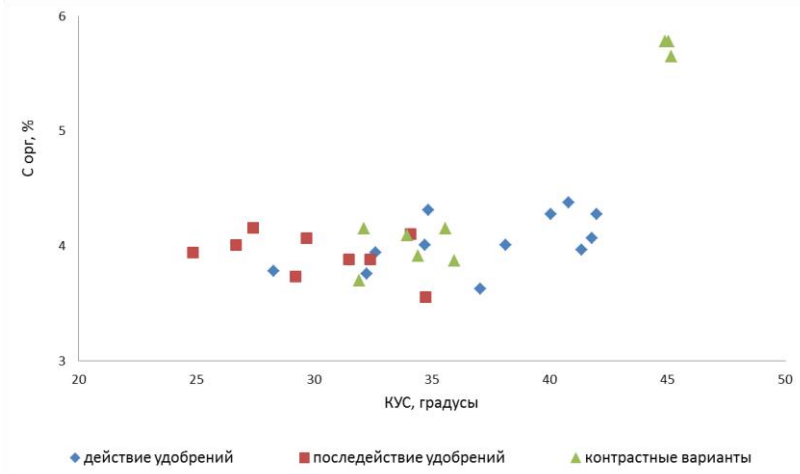


Рис. 5. КУС и содержание $C_{орг.}$ (%) в черноземе.
Fig. 5. The CA and $C_{org.}$ content in Chernozem.

Прямая линейная зависимость между величиной КУС и содержанием $C_{орг.}$ более 2% была обнаружена в ряде исследований (Ellerbrock et al., 2005; Bachmann et al., 2008; Hajnos et al., 2013; Haas et al., 2018). В работе (Kholodov et al., 2015) при изучении зависимости величины КУС дерново-подзолистой почвы и чернозема при различных системах землепользования установлено, что на величину КУС влияет не столько количество $C_{орг.}$, сколько характер расположения органического вещества на минеральной поверхности, зависящий от гранулометрического состава и системы землепользования. Проверка значимости отличий в содержании $C_{орг.}$ (%) в исследуемых делянках агрочернозема была проведена с помощью критерия Краскела – Уоллиса, который показал, что по содержанию углерода почва “Косимой степи” значимо отличается от почвы “Черного пара” и “Кукурузы бессменной“, а между самими последними вариантами отличий нет. Значимые отличия наблюдаются между участками с применением одной и двух доз минеральных удобрений, а также аналогичных участков варианта последействия удобрений (табл. 2. (А)).

Таблица 2. Значимость отличий содержания $C_{орг.}$ (%) и КУС почв
Table 2. Significance of differences in organic matter content and CA of soil

(A) $C_{орг.}$, %										
Варианты опыта		Действие удобрений			Последействие удобрений			Контрастные варианты		
		Ко	NPKo	2NPKo	К	NPK	2NPK	Пар	Степь	Кукуруза
Действие удобрений	Ко		+	+	-	+	+	-	+	-
	NPKo	+		+	+	+	-	-	+	-
	2NPKo	+	+		+	+	+	+	+	+
Последействие удобрений	К	-	+	+		+	+	-	+	-
	NPK	+	+	+	+		+	-	+	-
	2NPK	+	-	+	+	+		-	+	-
Контрастные варианты	Пар	-	-	+	-	-	-		+	-
	Степь	+	+	+	+	+	+	+		+
	Кукуруза	-	-	+	-	-	-	-	+	

(Б) КУС, градусы										
Варианты опыта		Действие удобрений			Последействие удобрений			Контрастные варианты		
		Ко	NPKo	2NPKo	К	NPK	2NPK	Пар	Степь	Кукуруза
Действие удобрений	Ко		-	-	+	-	-	-	+	-
	NPKo	-		-	-	-	-	-	+	-
	2NPKo	-	-		-	+	+	+	+	-
Последействие удобрений	К	+	-	-		-	-	+	+	+
	NPK	-	+	+	-		-	-	+	-
	2NPK	-	-	+	-	-		-	+	-
Контрастные варианты	Пар	-	-	+	+	-	-		+	-
	Степь	+	+	+	+	+	+	+		+
	Кукуруза	-	-	-	+	-	-	-	+	

Примечание. Знак “+” – отличия значимы при уровне значимости α = 0.05; знак “-” – значимых отличий нет.

Анализ значимости отличий величин КУС разных вариантов опыта показал, что почва степи отличается по этому показателю от всех других вариантов опытов. КУС почв под паром и бессменной кукурузой значимо не отличаются между собой (табл. 2 (Б)).

Выявленные отличия между вариантами опытов с внесением удобрений и с их последействием, включая разницу КУС контрольных вариантов этих опытов, говорят о том, что в данном случае ведущую роль играет не количество, а качественный состав органического вещества этих почв, связанный как с отличиями поступающего растительного материала в кормовом (для вариантов действия удобрений) и зерновом (в вариантах последействия) севооборотах (табл. 2 (Б)), так и с условиями гумификации под влиянием орошения.

Таким образом, само по себе содержание ОВ в почве не всегда имеет прямую взаимосвязь с гидрофобностью поверхности твердой фазы, определяющей величину КУС, что говорит о важности дальнейшего изучения этого вопроса. Одним из возможных механизмов, обуславливающих отсутствие взаимосвязи между $C_{орг.}$ и КУС, могут выступать различия в пространственной организации амфифильных органических соединений, сорбированных на поверхности минеральной фазы почв (Kleber et al., 2007; Bachmann et al., 2008).

Связь КУС с площадью удельной поверхности агрочернозема

Между величиной КУС и площадью удельной поверхности по азоту (рис. 6) выявлена обратная взаимосвязь. Максимальные различия площади удельной поверхности установлены для наиболее контрастных вариантов почв – участок “Черного пара” и “Косимой степи” – 27.3 и 12.8 $м^2/г$ соответственно. При этом для вариантов действия (рис. 6a) и последействия (рис. 6b) минеральных удобрений NPK значимых отличий исследуемого показателя не наблюдается. Варьирование данной величины обусловлено содержанием ОВ и имеет обратную взаимосвязь с этим показателем. Коэффициент корреляции между содержанием $C_{орг.}$ и площадью удельной поверхности почв всех исследуемых участков составил 0.86. При этом для контрастных вариантов опыта R = -0.9, а для вариантов последействия минеральных удобрений R = -0.7.

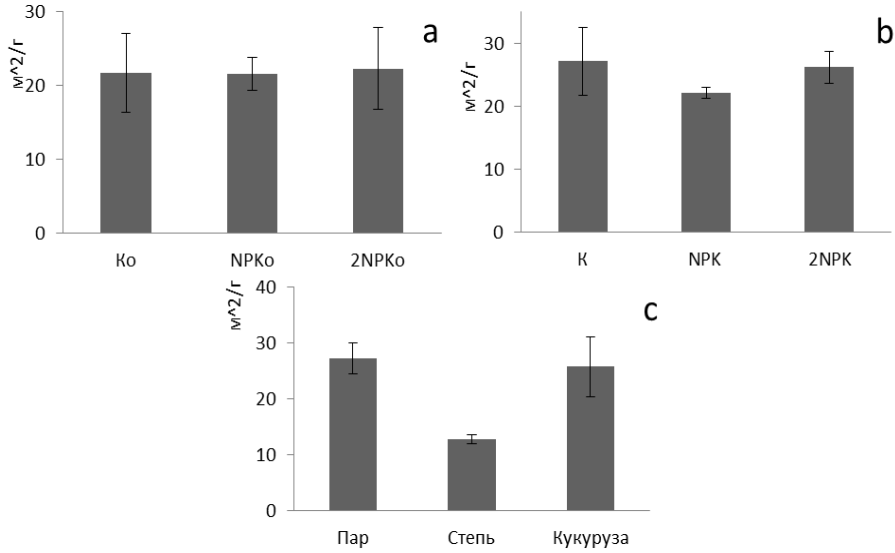


Рис. 6. Площадь удельной поверхности исследуемых почв Каменной степи. a – действие удобрений, b – последействие удобрений, c – варианты минимальной агротехнической нагрузки. К – контроль, NPK и 2NPK – одна и две дозы вносимых минеральных удобрений соответственно.
Fig. 6. Specific surface area of the studied soils of Kamennaya Steppe. a – effect of fertilizers, b – aftereffect of fertilizers, c – variants of minimum agrotechnical load. K – control, NPK and 2NPK – one and two doses of mineral fertilizers, respectively.

Взаимосвязь КУС с площадью удельной поверхности (рис. 7) показывает обратную зависимость, аналогичную связи КУС и содержания $C_{орг.}$ (%) (рис. 5), и подтверждает, что на величину КУС большее влияние оказывает система землепользования. Так для вариантов действия и последействия удобрений значимых корреляционных зависимостей между исследуемыми показателями не выявлено, однако при равном диапазоне значений $S_{уд.}$ КУС чернозема участков действия удобрений оказался выше, чем на участках последействия удобрений. Так же стоит отметить разли-

чие чернозема пашни от почвы косимой степи как по величине $S_{уд.}$, так и по величине КУС.

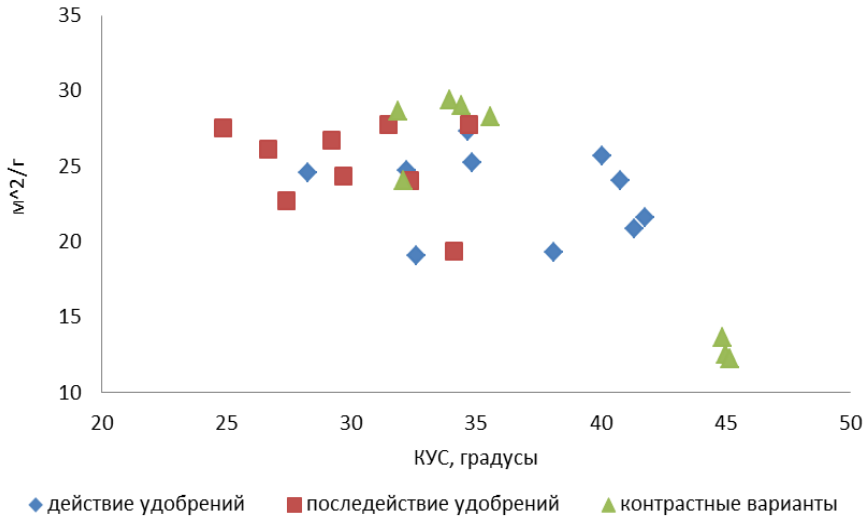


Рис. 7. Взаимосвязь между КУС и площадью удельной поверхности агрочернозема.
Fig. 7. The CA and specific surface area of agrochernozem.

Связь КУС с реологическими характеристиками агрочернозема

Методом амплитудной развертки в осцилляционном режиме на реометре MCR-302 определены следующие параметры: прочность межчастичных связей в начале эксперимента в области линейной вязкоупругости – начальный модуль упругости, диапазон линейной вязкоупругости (LVE-range) или устойчивость почвенной структуры к нагрузкам, точка пересечения модулей упругости и вязкости (Crossover) или точка разрушения структуры. Точку пересечения модулей (G' = G") рассчитывали с помощью программного обеспечения реометра.

Наименьший модуль упругости среди агрочерноземов разных вариантов опыта (рис. 8a, 8b, 8c) отмечен в почве “Косимой степи” и равен 138 кПа (рис. 8c), содержание $C_{орг.}$ в которой составляет 5.7%. Для вариантов действия минеральных удобрений отмечается тенденция уменьшения величины G' кПа (рис. 8a), что говорит о снижении устойчивости почвы к нагрузкам при таком варианте использования.

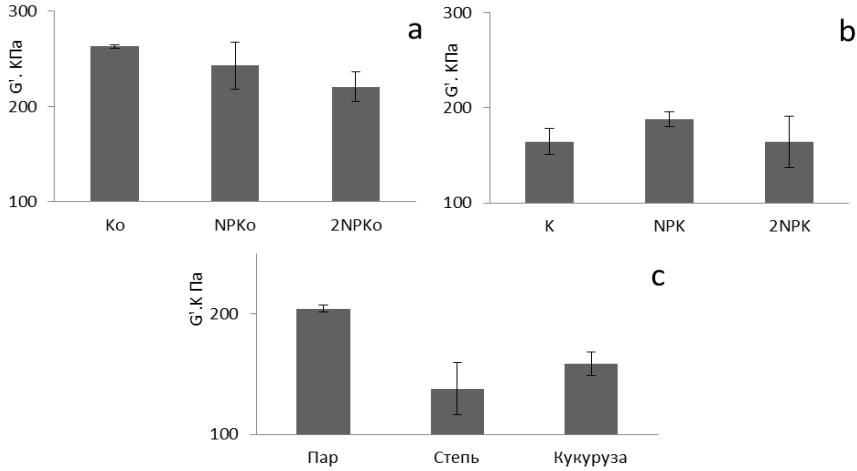


Рис. 8. Модуль упругости в диапазоне линейной вязкоупругости, G', кПа. Стандартное отклонение рассчитано по 3 повторностям. a – действие минеральных удобрений, b – последействие минеральных удобрений, c – контрастные варианты.
Fig. 8. Modulus of elasticity, G', kPa. The standard deviation is calculated by 3 repetitions. a – effect of mineral fertilizers, b – aftereffect of mineral fertilizers, c – contrast variants.

Несмотря на то что варианты последействия минеральных удобрений (рис. 8b) имеют значительно меньший модуль упругости, что, по всей видимости, связано с влиянием разных севооборотов, заложенных на этих вариантах опыта, и отсутствием орошения, о чем свидетельствуют различия модулей упругости контрольных вариантов (рис. 8a, 8b), достоверных отличий между делянками каждого варианта опыта не выявлено. Значимые отли-

чия наблюдаются только на делянках контрастных вариантов опыта (рис. 8c).

Динамика изменения модуля упругости в диапазоне линейной вязкоупругости LVE-range чернозема различных вариантов опыта (рис. 8a, 8b, 8c) имеет обратную взаимосвязь с содержанием $C_{орг.}$, %. Это может быть связано с тем, что чем выше содержание ОВ в почве, тем большее количество воды поглощается в процессе увлажнения, что препятствует образованию близких контактов между частицами (Markgraf et al., 2012). В таблице 3 приведены коэффициенты корреляции между содержанием $C_{орг.}$ (%) и реологическими показателями.

Таблица 3. Коэффициенты корреляции между $C_{орг.}$ (%) и реологическими характеристиками чернозема
Table 3. Correlation coefficients between $C_{org.}$ (%) and rheological characteristics of Chernozem

Группировка вариантов опыта	**R**		
	Модуль упругости в диапазоне линейной вязкоупругости LVE-range	**Диапазон линейной вязкоупругости**	**Предел текучести (Crossover)**
Все варианты опыта	-0.48	**0.75**	0.68
Действие удобрений	**-0.98**	0.21	**0.86**
Последействие удобрений	**0.83**	**-0.72**	**-0.92**
Контрастные варианты	**-0.78**	**0.92**	**0.84**

Примечание. Жирным шрифтом выделены значимые коэффициенты корреляции.

Обратная корреляция между содержанием органического углерода и модулем упругости в диапазоне линейной вязкоупругости выявлена для вариантов действия минеральных удобрений и

контрастных вариантов опыта, R = -0.98 и -0.78 соответственно. При большем содержании ОВ во время капиллярного насыщения образец чернозема способен удерживать большее количество воды, что приводит к уменьшению диапазона упругого поведения. Однако в варианте последействия удобрений между этими показателями наблюдается прямая взаимосвязь. Аналогичные противоположные зависимости отмечены для делянок контрастных вариантов опыта и вариантов последействия удобрений при выявлении корреляции между содержанием $C_{орг.}$ и диапазоном линейной вязкоупругости, между $C_{орг.}$ и пределом текучести. Различия в корреляционных взаимосвязях указывают на то, что реологические характеристики чернозема могут зависеть не только от количества, но и от качества поступающего в почву ОВ.

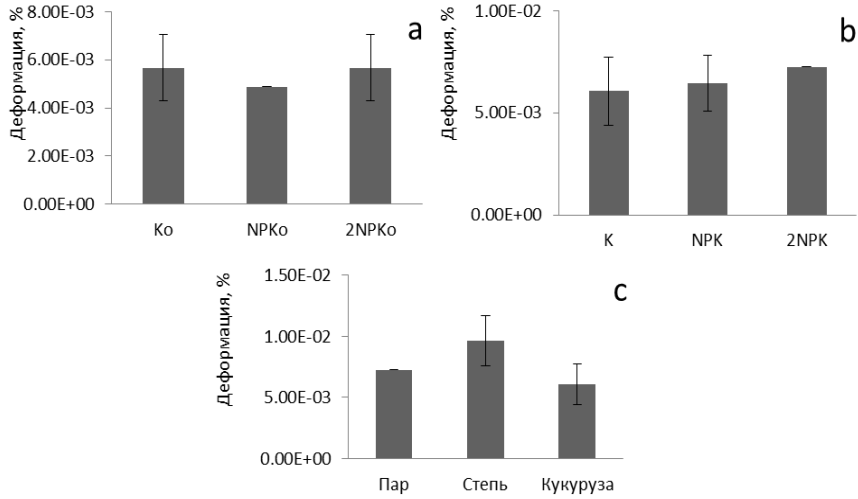


Рис. 9. Диапазон линейной вязкоупругости, %. Стандартное отклонение рассчитано по 3 повторностям. a – действие минеральных удобрений, b – последействие минеральных удобрений, c – контрастные варианты.
Fig. 9. Range of linear viscoelasticity, %. The standard deviation is calculated by 3 repetitions. a – effect of mineral fertilizers, b – aftereffect of mineral fertilizers, c – contrast variants.

Точка пересечения модулей G' = G" указывает величину деформаций, при которой деформационное поведение переходит от пластичновязкого к вязкому. Максимальная величина деформации, при которой происходит разрушение структуры, равная 3.1%, наблюдается в почве с максимальным содержанием $C_{орг.}$ – в агрочерноземе "Косимой степи". Коэффициент корреляции между пределом текучести и содержанием $C_{орг.}$ (%) для контрастных вариантов опыта равен 0.84 (табл. 3). Вариант действия удобрений показывает чуть большую взаимосвязь между исследуемыми показателями – R = 0.86.

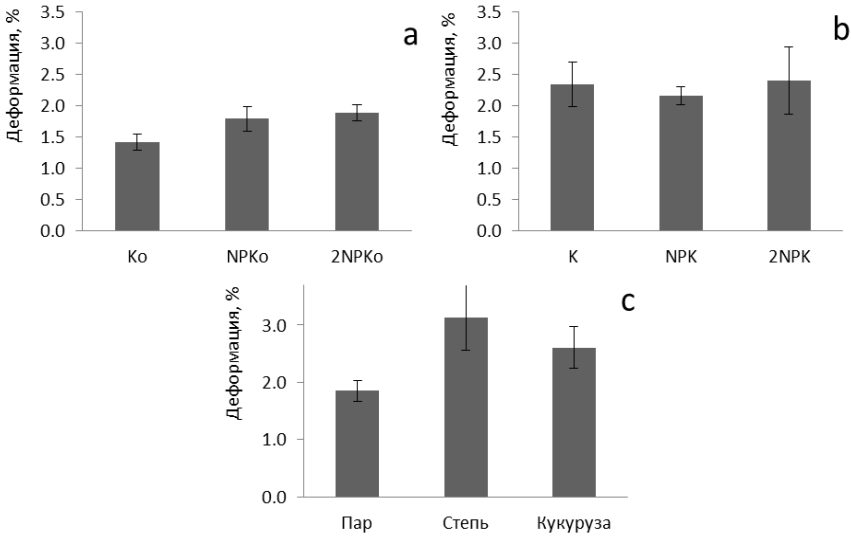


Рис. 10. Предел текучести (Crossover) или точка пересечения модулей. Стандартное отклонение рассчитано по 3 повторностям. a – действие минеральных удобрений, b – последействие минеральных удобрений, c – контрастные варианты.

Fig. 10. The yield point (Crossover) or intersection point of the modules. The standard deviation is calculated by 3 repetitions. a – effect of mineral fertilizers, b – aftereffect of mineral fertilizers, c – contrast variants.

Анализируя динамику изменения реологических показателей и значимость наблюдаемых отличий, можно прийти к выводу, что вид антропогенной нагрузки оказывает большее влияние на реологические свойства почв, чем ее интенсивность: на делянках вариантов действия и вариантов последействия минеральных удобрений значимых различий в реологических показателях между делянками не наблюдалось. Различия отмечены для почв пашни и степи. Сравнение реологических параметров черноземов разных вариантов опыта показало, что почвы, не подвергающиеся физическому воздействию в виде пахоты (“Косимая степь”) обладают большей устойчивостью к действию нагрузок. Повышенную устойчивость к нагрузкам обуславливает органическое вещество, что подтверждается работами многих исследователей (Шеин Е.В. и др., 2002; Markgraf et al., 2012; Хайдапова и др., 2016).

Устойчивость почвенной структуры зависит не только от количества ОВ, но и от соотношения гидрофобных и гидрофильных компонентов ГВ почв, динамику которых можно проследить путем измерения КУС. Реологические характеристики почв во многом определяются размером частиц, ОВ, содержанием Ca и Fe. В нашем случае большее значение для исследуемого чернозема будет играть ОВ. В таблице 4 представлены коэффициенты корреляции между реологическими показателями и КУС. Значимые обратные взаимосвязи выявлены для вариантов действия удобрений и контрастных вариантов опыта при выявлении корреляции между КУС и модулем упругости в диапазоне линейной вязкоупругости LVE-range. Прямая корреляция отмечена между величиной КУС и диапазоном линейной вязкоупругости для варианта последействия удобрений и контрастных вариантов опыта. А также значимая положительная корреляция наблюдалась между величиной КУС и деформацией в точке разрушения структуры Crossover для вариантов действия удобрений и контрастных вариантов опыта.

Таблица 4. Коэффициенты корреляции между КУС и реологическими характеристиками агрочернозема
Table 4. Correlation coefficients between CA and rheological characteristics of agrochernozem

Группировка вариантов опыта	R		
	Модуль упругости в диапазоне линейной вязкоупругости LVE-range	**Диапазон линейной вязкоупругости**	**Предел текучести (Crossover)**
Все варианты опыта	-0.12	0.45	0.41
Действие удобрений	**-0.98**	0.07	**0.92**
Последействие удобрений	0.32	**0.86**	-0.12
Контрастные варианты	**-0.89**	**0.84**	**0.93**

Примечание. Жирным шрифтом выделены значимые коэффициенты корреляции.

Полученные данные (табл. 4) говорят о том, что чем выше в исследуемом черноземе содержание гидрофобных компонентов в ОВ, тем лучше межчастичные взаимодействия, на что указывают положительные корреляции между КУС и диапазоном линейной вязкоупругости. Прямая корреляция между КУС и деформацией в точке разрушения структуры указывает на большую устойчивость почвенной структуры при более гидрофобной поверхности твердой фазы. Обратная корреляция между модулем упругости в диапазоне линейной вязкоупругости LVE-range и величиной КУС говорит о том, что, по всей видимости, чернозем, характеризующийся большей гидрофобностью при капиллярном насыщении, имел большее отталкивание между частицами в водной среде, что способствовало снижению диапазона упругого поведения.

Взаимосвязь исследуемых свойств чернозема указывает на закономерное изменение образующихся взаимодействий между частицами (реологические характеристики) и физических свойств поверхности ($S_{уд.}$, КУС) при изменении химического состава почв (содержание $C_{орг.}$ (%), поступление растительных остатков и присущие им микроорганизмы) и вида нагрузки (вспашка, применение удобрений).

Выявленные корреляционные взаимосвязи между величиной КУС и другими исследуемыми показателями (табл. 3, 4 и рис. 5, 7) подтверждают возможность использования краевого угла смачивания в качестве интегрального показателя при изучении динамики изменения свойств почв при различной антропогенной нагрузке.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ полученных результатов свидетельствует, что гидрофильно-гидрофобные свойства поверхности твердой фазы почв, во многом определяющие основные структурообразующие свойства почв, зависят от большого числа факторов и их комбинаций. Эти свойства могут быть охарактеризованы величиной краевого угла смачивания. Наименьшая смачиваемость обусловлена повышенным содержанием гидрофобных соединений в составе органического вещества почв и характеризуется наибольшими величинами КУС. Такие высокие значения КУС характерны для нативной, не обрабатываемой почвы “Косимой степи”, которая отличается от других исследованных вариантов опыта по всем изученным физико-химическим показателям. Механическая обработка почвы в виде вспашки с оборотом пласта, парование приводят к изменениям физико-химических свойств почв в сторону их ухудшения и к снижению величины КУС. Помимо механической обработки на величину КУС большое влияние оказывает содержание и качественный состав органического вещества, который в свою очередь зависит от условий окружающей среды, т. е. от поступающих растительных остатков, доступа кислорода и воды. Почвы вариантов действия и последействия минеральных удобрений отличаются по характеру поступающего в них органического вещества, связанного с применением в них совершенно разных расте-

ний в севооборотах, а также их различие обусловлено длительным орошением участка действия удобрений. Все это объясняет различия в величинах КУС даже на контрольных участках этих вариантов опыта. Стоит отметить, что данные участки не имеют столь сильного различия по другим исследуемым показателям, при этом различия их совокупных свойств отражаются на изменении величины КУС.

Таким образом, КУС может служить интегральным показателем изменения физико-химических свойств почв, их деградационных изменений в условиях различной агрогенной нагрузки. Данный метод исследования требует меньшего количества образца по сравнению с реологическими методами и в целом более информативен, чем определение содержания органического вещества.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Адамсон А., Абидор И.Г., Дерягин Б.В.* Физическая химия поверхностей. М.: Мир, 1979. 568 с.
2. *Адерихин П.Г., Богатырева З.С.* Воздействие защитных лесных насаждений на содержание и состав органического вещества обыкновенных черноземов Каменной Степи // Почвоведение. 1974. № 5. С. 43–53.
3. *Аринушкина Е.В.* Руководство по химическому анализу почв. М.: МГУ, 1970. 487 с.
4. *Беспалов В.А., Чевердин Ю.И., Титова Т.В.* Трансформация почвенного поглощающего комплекса черноземных почв каменной степи при длительном постмелиоративном воздействии // Агрофизика. 2018. № 4. С. 9–16.
5. *Витязь П.А., Шелег В.К., Капцевич В.М.* Метод определения краевого угла смачивания в пористых порошковых материалах // Порошковая металлургия. 1986. № 4. С. 52–55.
6. *Воронин А.А.* Поверхностные явления в почвах и направленное изменение свойств почв // Научные доклады Высшей школы, биологические науки. 1975. № 12. С. 7–15.
7. *Горбунова Н.С., Куликова Е.В.* Изменение физических и физико-химических свойств чернозема выщелоченного под влиянием дождевального орошения в условиях производственного использования почв свекловичного севооборота // Вестник Воронежского

государственного университета. Серия: Химия. Биология. Фармация. 2017. № 3. С. 47–52.
8. *Егоров В.В., Иванова Е.Н., Фридланд В.М., Розов Н.И.* Классификация и диагностика почв СССР. М.: Колос, 1977. 221 с.
9. *Зборищук Ю.Н.* Особенности гумуса черноземов обыкновенных Каменной Степи // Вестник Московского университета. Серия 17: Почвоведение. 2007. № 2. С. 3–9.
10. *Киселев М.Г., Савич В.В., Павич Т.П.* Определение краевого угла смачивания на плоских поверхностях // Наука и техника. 2006 (1). С. 38–41.
11. *Когут Б.М., Титова Н.А., Булеева В.С.* Антропогенная трансформация качественного состава гумуса черноземов Каменной Степи // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2009. Вып. 64. С. 41–49. DOI: 10.19047/0136-1694-2009--41-49.
12. *Кононова М.М., Бельчикова Н.П.* Процессы превращения органических веществ в обыкновенном черноземе при применении комплекса Докучаева-Костычева-Вильямса // Вопросы травопольной системы земледелия. М.: Изд-во АН СССР, 1953. Т. II. С. 303–360.
13. *Королев В.А.* Изменение основных физических свойств черноземов обыкновенных под влиянием орошения // Почвоведение. 2008. № 10. С. 1234–1240.
14. *Кузелев М.М., Мамонтов В.Г., Сюняев Н.К., Свиридов А.К., Черенков В.В.* Гумусовое состояние обыкновенных черноземов естественно-антропогенного ландшафта Каменной Степи // Известия ТСХА. 2007. № 3. С. 38–46.
15. *Лебедева И.И., Базыкина Г.С., Гребенников А.М., Чевердин Ю.И., Беспалов В.А.* Опыт комплексной оценки влияния длительности земледельческого использования на свойства и режимы агрочерноземов Каменной степи // Бюллетень Почвенного института им. В.В. Докучаева. 2016. Вып. 83. С. 77–102. DOI: 10.19047/0136-1694-2016-83-77-102.
16. *Мамонтов В.Г., Соколовская Е.Л.* Элементный и молекулярно-массовый состав лабильных гумусовых веществ чернозема обыкновенного каменной степи // Известия ТСХА. 2018. № 1. С. 130–138.
17. *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. № 97. С. 91–112. DOI: 10.19047/0136-1694-2019-97-91-112.
18. *Милановский Е.Ю.* Гумусовые вещества почв как природные гидрофобно-гидрофильные соединения. М.: ГЕОС, 2009. 188 с.

19. *Милановский Е.Ю., Шеин Е.В.* Функциональная роль амфифильных компонентов гумусовых веществ в процессах гумусо-структурообразования и в генезисе почв // Почвоведение. 2002. № 10. С. 1201–1213.
20. *Милановский Е.Ю., Шеин Е.В., Русанов А.М., Засыпкина Д.И., Николаева Е.И., Анилова Л.В.* Почвенная структура и органическое вещество типичных черноземо Предуралья под лесом и многолетней пашней // Вестник Оренбургского государственного университета. 2005. № 2. С. 113–117.
21. *Скрыльник Е.В., Шевченко Н.В., Попирный М.А., Николов О.Т.* Конформационные перестройки супраструктуры гуминовых кислот чернозема типичного в зависимости от способов обработки почвы // Известия Национальной академии наук Беларуси. Серия биологических наук. 2018. 63 (2). С. 209–221.
22. *Стахурлова Л.Д., Свистова И.Д., Щеглов Д.И.* Биологическая активность как индикатор плодородия черноземов в различных биоценозах // Почвоведение. 2007. № 6. С. 769–774.
23. *Хайдапова Д.Д., Милановский Е.Ю., Честнова В.В.* Оценка реологическими методами восстановления структуры почв под влиянием выращивания лесополос на антропогенно нарушенных почвах // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. 2014. № 6. С. 53–58.
24. *Хайдапова Д.Д., Честнова В.В., Шеин Е.В., Милановский Е.Ю.* Реологические свойства черноземов типичных (Курская область) при различном землепользовании // Почвоведение. 2016. № 8. С. 955–963.
25. *Чевердин Ю.И., Беспалов В.А.* Пространственное варьирование содержания гумуса в черноземах Каменной Степи // Плодородие. 2011. № 4. С. 28–29.
26. *Шеин Е.В.* Курс физики почв. М.: МГУ, 2005. 432 с.
27. *Шеин Е.В., Милановский Е.Ю., Хайдапова Д.Д.* Устойчивость почвенной структуры и органическое вещество почв // Роль почв в биосфере. Тр. ин-та почвоведения МГУ им. МВ Ломоносова и РАН. 2002. № 1. С. 129–151.
28. *Шишов Л.Л., Тонконогов В.Д., Лебедева И.И., Герасимова М.И.* Классификация и диагностика почв России. Смоленск: Ойкумена, 2004. 341 с.
29. *Щеглов Д.И.* Черноземы центра Русской равнины и их эволюция под влиянием естественных и антропогенных факторов: Автореф. дис. ... докт. биол. наук, Воронеж, 1995. 46 с.
30. *Щеглов Д.И., Горбунова Н.С., Семенова Л.А., Хатунцева О.А.* Микроэлементы в почвах сопряженных ландшафтов Каменной степи

различной степени гидроморфизма // Почвоведение. 2013. № 3. С. 282–290.
31. *Adamson A.* Physical chemistry of surfaces 5th edn. New York, NY John Wiley & Sons Inc. 1990. P. 379–420.
32. *Ahmed M.A., Kroener E., Benard P., Zarebanadkouki M., Kaestner A., Carminati A.* Drying of mucilage causes water repellency in the rhizosphere of maize: Measurements and modelling // Plant Soil. 2016. Vol. 407. Iss. 1–2. P. 161–171.
33. *Aquino A.J., Tunega D., Pašalić H., Schaumann G.E., Haberhauer G., Gerzabek M.H., Lischka* H. Molecular dynamics simulations of water molecule-bridges in polar domains of humic acids // Environmental science & technology. 2011. Vol. 45. No. 19. P. 8411–8419.
34. *Bachmann J.*, Contact angle and surface charge of wettable and hydrophobic silt particles, J. Soil Sci. Plant Nutr., 2001, Vol. 1, P. 26–33.
35. *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. 2000. Vol. 231. P. 66–75. DOI: 10.1016/S0022-1694(00)00184-0.
36. *Bachmann J., Guggenberger G., Baumgartl T., Ellerbrock R.H., Urbanek E., Goebel M.O., Kaiser K., Horn R., Fischer W.R.* Physical carbon-sequestration mechanisms under special consideration of soil wettability // Journal of Plant Nutrition and Soil Science. 2008. Vol. 171. Iss. 1. P. 14–26.
37. *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. P. 14.
38. *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. Vol. 37. Iss. 4. P. 532–534
39. *Benard P., Zarebanadkouki M., Hedwig C., Holz M., Ahmed M., Carminati A.* Pore-scale distribution of mucilage affecting water repellency in the rhizosphere // Vadose Zone Journal. 2018. Vol. 17. Iss. 1. P. 1–9.
40. *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.
41. *Carrillo M.L.K., Letey J., Yates S.R.* Measurement of initial soil-water contact angle of water repellent soils // Soil Science Society of America Journal. 1999. Vol. 63. Iss. 3. P. 433–436.
42. *Cihlář Z., Vojtová L., Conte P., Nasir S., Kučerík J.* Hydration and water holding properties of cross-linked lignite humic acids // Geoderma. 2014. Vol. 230. P. 151–160.

43. *De Gryze S., Jassogne L., Bossuyt H., Six J., Merckx R.* Water repellence and soil aggregate dynamics in a loamy grassland soil as affected by texture // European Journal of Soil Science. 2006. Vol. 57. Iss. 2. P. 235–246.
44. *Dlapa P., Doerr S., Lichner L., Sir M., Tesar M.* Effect of kaolinite and Ca-montmorillonite on the alleviation of soil water repellency // Plant Soil and Environment. 2004. Vol. 50. Iss. 8. P. 358–363.
45. *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. DOI: 10.1002/(SICI)1096-9837(199807)23:7<663::AID-ESP909>3.0.CO;2-6.
46. *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. No. 1–4. P. 33–65. DOI: 10.1016/S0012-8252(00)00011-8.
47. *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. Iss. 1. P. 57–66.
48. *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. Iss. 2. P. 383–393.
49. *Haas C., Gerke H.H., Ellerbrock R.H., Hallett P.D., Horn R.* Relating soil organic matter composition to soil water repellency for soil biopore surfaces different in history from two Bt horizons of a Haplic Luvisol // Ecohydrology. 2018. Vol. 11. Iss. 6. P. 11.
50. *Hajnos M., Calka A., Jozefaciuk G.* Wettability of mineral soils // Geoderma. 2013. No. 206. P. 63–69.
51. *Jaramillo D.F.* Efecto de la temperatura de secado del suelo sobre la repelencia al agua en Andisoles bajo cobertura de Pinus patula // Informe de investigación. Universidad Nacional de Colombia. Medellín. 2003. 36 p.
52. *Jiménez J.J., Lorenz K., Lal R.* Organic carbon and nitrogen in soil particle-size aggregates under dry tropical forests from Guanacaste, Costa Rica – implications for within-site soil organic carbon stabilization // Catena. 2011. Vol. 86. Iss. 3. P. 178–191.
53. *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. No. 6. P. 600–607.
54. *Kleber M., Sollins P.,·Sutton R.* A conceptual model of organo-mineral interactions in soils: self-assembly of organic molecular fragments into zonal structures on mineral surfaces // Biogeochemistry. 2007. Vol. 85. No. 1. P. 9–24.

55. *Kraemer F.B., Hallett P.D., Morras H., Garibaldi L., Cosentino D., Duval M., Galantini J.* Soil stabilisation by water repellency under no-till management for soils with contrasting mineralogy and carbon quality // Geoderma. 2019. No. 355. P. 113902.
56. *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. Iss. 6. P. 2010–2012.
57. *Lilliefors H.W.* On the Kolmogorov-Smirnov test for normality with mean and variance unknown // Journal of the American statistical Association. 1967. Vol. 62. Iss. 318. P. 399–402.
58. *Liu Z., Yu X., Wan L.* Capillary rise method for the measurement of the contact angle of soils // Acta Geotechnica. 2016. Vol. 11. Iss. 1. P. 21–35.
59. *Markgraf W., Horn R., Peth S.* An approach to rheometry in soil mechanics–Structural changes in bentonite, clayey and silty soils // Soil Tillage Res. 2006. Vol. 91. P. 1–14.
60. *Markgraf W., Watts C.W., Whalley W.R., Hrkac T., Horn R*. Influence of organic matter on rheological properties of soil // Applied Clay Science. 2012. Vol. 64. P. 25–33.
61. *Mezger T.* The Rheology Handbook for users of rotational and oscillatory rheometers. Hanover: Vincentz, 2011. 436 p.
62. *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. Iss. 3. P. 8.
63. *Papierowska E., Matysiak W., Szatyłowicz J., Debaene G., Urbanek E., Kalisz B., Łachacz A.* Compatibility of methods used for soil water repellency determination for organic and organo-mineral soils // Geoderma. 2018. Vol. 314. P. 221–231. DOI: 10.1016/j.geoderma.2017.11.012.
64. *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. Iss. 2. P. 243–251.
65. *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. Iss. 2. P. 299–307.
66. *Vogelmann E.S., Reichert J.M., Prevedello J., Awe G.O., Mataix-Solera J.*, Can occurrence of soil hydrophobicity promote the increase of aggregates stability? // Catena. 2013. Vol. 110. P. 24–31. DOI: 10.1016/j.catena.2013.06.009.
67. *Wallis M., Horne D.* Soil water repellency // Advances in soil science. Springer. 1992. P. 91–146.
68. *Woche S.K., Goebel M.O., Kirkham M.B., Horton R., Van der Ploeg R.R., Bachmann J.* Contact angle of soils as affected by depth, texture, and land

management // European Journal of Soil Science. 2005. Vol. 56. Iss. 2. P. 239–251.
69. *World Reference Base for soil resources 2014*: international soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps // World Soil Resources Report (106).
70. *Wu W.J.* Baseline studies of The Clay Minerals Society Source Clays: Colloid and surface phenomena // Clays and Clay Minerals. 2001. Vol. 49. Iss. 5. P. 446–452.
71. *Yang S., Gong A.M., Wu J.H., Lu T.H.* Effect of contact angle on matric suction of unsaturated soil // Rock and Soil Mechanics. 2015. Vol. 36. Iss. 3. P. 674–678.
72. *Yudina A.V., Fomin D.S., Kotelnikova A.D., Milanovskii E.Yu.* From the notion of elementary soil particle to the particle-size and microaggregate-size distribution analyses: A review. Eurasian soil science. 2018. Vol. 51. Iss. 11. P. 1326–1347.
73. *Zickenrott I.M., Woche S.K., Bachmann J., Ahmed M.A., Vetterlein D*. An efficient method for the collection of root mucilage from different plant species: A case study on the effect of mucilage on soil water repellency // J. Plant Nutr. Soil Sci. 2016. Vol. 179. P. 294–302.

REFERENCES

1. Adamson A., Abidor I.G., Deryagin B.V., *Fizicheskaya khimiya poverkhnostei* (Physical chemistry of surfaces), Moscow: Mir, 1979, 568 p.
2. Aderikhin P.G., Bogatyreva Z.S., Vozdeistvie zashchitnykh lesnykh nasazhdenii na soderzhanie i sostav organicheskogo veshchestva obyknovennykh chernozemov Kamennoi Stepi (The impact of protective forest stands on the content and composition of the organic matter of ordinary chernozems of the Stone Steppe), *Pochvovedenie*, 1974, No. 5, pp. 43–53.
3. Arinushkina E.V., *Rukovodstvo po khimicheskomu analizu pochv* (Chemical soil analysis guide), Moscow: MGU, 1970, 487 p.
4. Bespalov V.A., Cheverdin Yu.I., Titova T.V., Transformatsiya pochvennogo pogloshchayushchego kompleksa chernozemnykh pochv kamennoi stepi pri dlitel'nom postmeliorativnom vozdeistvii (Transformation of the soil absorbing complex of chernozem soils of the stone steppe under prolonged post-reclamation impact), *Agrofizika*, 2018, No. 4, pp. 9–16.
5. Vityaz' P.A., Sheleg V.K., Kaptsevich V.M., Metod opredeleniya kraevogo ugla smachivaniya v poristykh poroshkovykh materialakh (A method for determining the contact angle in porous powder materials), *Poroshkovaya metallurgiya*, 1986, No. 4, pp. 52–55.

6. Voronin A.A., Poverkhnostnye yavleniya v pochvakh i napravlennoe izmenenie svoistv pochv (Surface phenomena in soils and a directed change in soil properties), *Nauchnye doklady Vysshei shkoly, biologicheskie nauki*, 1975, No. 12, pp. 7–15.
7. Gorbunova N.S., Kulikova E.V., Izmenenie fizicheskikh i fiziko-khimicheskikh svoistv chernozema vyshchelochennogo pod vliyaniem dozhdeval'nogo orosheniya v usloviyakh proizvodstvennogo ispol'zovaniya pochv sveklovichnogo sevooborota (Change in the physical and physico-chemical properties of leached chernozem under the influence of sprinkling irrigation in conditions of industrial use of beet crop rotation soils), *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Khimiya. Biologiya. Farmatsiya*, 2017, No. 3, pp. 47–52.
8. Egorov V.V., Ivanova E.N., Fridland V.M., Rozov N.I., Klassifikatsiya i diagnostika pochv SSSR (Classification and soil diagnostics of the USSR), Moscow: Kolos, 1977, 221 p.
9. Zborishchuk Yu.N., Osobennosti gumusa chernozemov obyknovennykh Kamennoi Stepi (Features of humus of ordinary chernozems of the Kamennaya Steppe), *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 17: Pochvovedenie*, 2007, No. 2, pp. 3–9.
10. Kiselev M.G., Savich V.V., Pavich T.P., Opredelenie kraevogo ugla smachivaniya na ploskikh poverkhnostyakh (Determination of the wetting angle on flat surfaces), *Nauka i tekhnika*, 2006, No. 1, pp. 38–41.
11. Kogut B.M., Titova N.A., Buleeva V.S., Antropogennaya transformatsiya kachestvennogo sostava gumusa chernozemov Kamennoi Stepi (Anthropogenic transformation of the qualitative composition of humus of chernozems of the Kamennaya Steppe), *Dokuchaev Soil Bulletin*, 2009, Vol. 64, pp. 41–49, DOI: 10.19047/0136-1694-2009--41-49.
12. Kononova M.M., Bel'chikova N.P., Protsessy prevrashcheniya organicheskikh veshchestv v obyknovennom chernozeme pri primenenii kompleksa Dokuchaeva-Kostycheva-Vil'yamsa (The processes of conversion of organic substances in ordinary chernozem when using the Dokuchaev-Kostychev-Williams complex), In: *Voprosy travopol'noi sistemy zemledeliya* (Issues of grass field farming system), Moscow: Izd-vo AN SSSR, 1953, Vol. II, pp. 303–360.
13. Korolev V.A., Izmenenie osnovnykh fizicheskikh svoistv chernozemov obyknovennykh pod vliyaniem orosheniya (Changes in the basic physical properties of ordinary chernozems under the influence of irrigation), *Pochvovedenie*, 2008, No. 10, pp. 1234–1240.
14. Kuzelev M.M., Mamontov V.G., Syunyaev N.K., Sviridov A.K., Cherenkov V.V., Gumusovoe sostoyanie obyknovennykh chernozemov estestvenno-antropogennogo landshafta Kamennoi Stepi (The humus state of

ordinary chernozems of the natural anthropogenic landscape of the Stone Steppe), *Izvestiya TSKhA*, 2007, No. 3, pp. 38–46.
15. Lebedeva I.I., Bazykina G.S., Grebennikov A.M., Cheverdin Y.I., Bespalov V.A., The experience of the complex assessment of the impact of the length of agricultural use on properties and regimes of agrochernozems of Stony Steppe, *Dokuchaev Soil Bulletin*, 2016, Vol. 83, pp. 77–102, DOI: 10.19047/0136-1694-2016-83-77-102.
16. Mamontov V.G., Sokolovskaya E.L., Elementnyi i molekulyarno-massovyi sostav labil'nykh gumusovykh veshchestv chernozema obyknovennogo kamennoi stepi (The elemental and molecular mass composition of labile humic substances of chernozem of ordinary stone steppe), *Izvestiya TSKhA*, 2018, No. 1, pp. 130–138.
17. Matveeva N.V., Milanovskii 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, No. 97, pp. 91–112, DOI: 10.19047/0136-1694-2019-97-91-112.
18. Milanovskii E.Yu., *Gumusovye veshchestva pochv kak prirodnye gidrofobno-gidrofil'nye soedineniya* (Humic substances of soils as natural hydrophobic-hydrophilic compounds), Moscow: GEOS, 2009, 188 p.
19. Milanovskii E.Yu., Shein E.V., Funktsional'naya rol' amfifil'nykh komponentov gumusovykh veshchestv v protsessakh gumuso-strukturoobrazovaniya i v genezise pochv (The functional role of amphiphilic components of humic substances in the processes of humus structure formation and in the soil genesis), *Pochvovedenie*, 2002, No. 10, pp. 1201–1213.
20. Shein E.V., Rusanov A.M., Zasypkina D.I., Nikolaeva E.I., Anilova L.V., Pochvennaya struktura i organicheskoe veshchestvo tipichnykh chernozemo Predural'ya pod lesom i mnogoletnei pashnei (The soil structure and organic matter of typical chernozems of the Urals under a forest and perennial arable land), *Vestnik Orenburgskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2005, No. 2, pp. 113–117.
21. Skryl'nik E.V., Shevchenko N.V., Popirnyi M.A., Nikolov O.T., Konformatsionnye perestroiki suprastruktury guminovykh kislot chernozema tipichnogo v zavisimosti ot sposobov obrabotki pochvy (Conformational rearrangements of the suprastructure of humic acids of chernozem typical depending on soil cultivation methods), *Izvestiya Natsional'noi akademii nauk Belarusi. Seriya biologicheskikh nauk*, 2018, Vol. 63, Iss. 2, pp. 209–221.
22. Stakhurlova L.D., Svistova I.D., Shcheglov D.I., Biologicheskaya aktivnost' kak indikator plodorodiya chernozemov v razlichnykh biotsenozakh (Biological activity as an indicator of the fertility of chernozems in various biocenoses), *Pochvovedenie*, 2007, No. 6, pp. 769–774.

23. Khaidapova D.D., Milanovskii E.Yu., Chestnova V.V., Otsenka reologicheskimi metodami vosstanovleniya struktury pochv pod vliyaniem vyrashchivaniya lesopolos na antropogenno narushennykh pochvakh (Evaluation by rheological methods of restoration of soil structure under the influence of growing forest belts on anthropogenically disturbed soils), *Vestnik Altaiskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*, 2014, No. 6, pp. 53–58.
24. Khaidapova D.D., Chestnova V.V., Shein E.V., Milanovskii E.Yu., Reologicheskie svoistva chernozemov tipichnykh (Kurskaya oblast') pri razlichnom zemlepol'zovanii (Rheological properties of typical chernozems (Kursk region) with different land use), *Pochvovedenie*, 2016, No. 8, pp. 955–963.
25. Cheverdin Yu.I., Bespalov V.A., Prostranstvennoe var'irovanie soderzhaniya gumusa v chernozemakh Kamennoi Stepi (Spatial variation of the humus content in chernozems of the Kamennaya Steppe), *Plodorodie*, 2011, No. 4, pp. 28–29.
26. Shein E.V., Kurs fiziki pochv (Soil physics course), Moscow: MGU, 2005, 432 p.
27. Shein E.V., Milanovskii E.Yu., Khaidapova D.D., Ustoichivost' pochvennoi struktury i organicheskoe veshchestvo pochv (Stability of the soil structure and organic matter of soils), In: *Rol' pochv v biosfere. Trudy in-ta pochvovedeniya MGU im. MV Lomonosova i RAN*, 2002, No. 1, pp. 129–151.
28. Shishov L.L., Tonkonogov V.D., Lebedeva I.I., Gerasimova M.I., *Klassifikatsiya i diagnostika pochv Rossii* (Classification and diagnostics of Russian soils), Smolensk: Oikumena, 2004. 341 p.
29. Shcheglov D.I., *Chernozemy tsentra Russkoi ravniny i ikh evolyutsiya pod vliyaniem estestvennykh i antropogennykh faktorov: Avtoref. dis. ... doct. biol. nauk* (Chernozems of the Center of the Russian Plain and their Evolution under the Influence of Natural and Anthropogenic Factors, Extended abstract of cand. biol. sci. thesis), Voronezh, 1995, 46 p.
30. Shcheglov D.I., Gorbunova N.S., Semenova L.A., Khatuntseva O.A., Mikroelementy v pochvakh sopryazhennykh landshaftov Kamennoi stepi razlichnoi stepeni gidromorfizma (Microelements in the soils of the associated landscapes of the Kamennaya Steppe of varying degrees of hydromorphism), *Pochvovedenie*, 2013, No. 3, pp. 282–290.
31. Adamson A., *Physical chemistry of surfaces 5th edn*, New York, NY John Wiley & Sons Inc, 1990, pp. 379–420.
32. Ahmed M.A., Kroener E., Benard P., Zarebanadkouki M., Kaestner A., Carminati A., Drying of mucilage causes water repellency in the rhizosphere of maize: Measurements and modelling, *Plant Soil*, 2016, Vol. 407, Iss. 1–2, pp. 161–171.

33. Aquino A.J., Tunega D., Pašalić H., Schaumann G.E., Haberhauer G., Gerzabek M.H., Lischka H., Molecular dynamics simulations of water molecule-bridges in polar domains of humic acids, *Environmental science & technology*, 2011, Vol. 45, No. 19, pp. 8411–8419.
34. Bachmann J., Contact angle and surface charge of wettable and hydrophobic silt particles, *J. Soil Sci. Plant Nutr.*, 2001, Vol. 1, pp. 26–33.
35. 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*, 2000, Vol. 231, pp. 66–75, DOI: 10.1016/S0022-1694(00)00184-0.
36. Bachmann J., Guggenberger G., Baumgartl T., Ellerbrock R.H., Urbanek E., Goebel M.O., Kaiser K., Horn R., Fischer W.R., Physical carbon-sequestration mechanisms under special consideration of soil wettability, *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2008, Vol. 171, Iss. 1, pp. 14–26.
37. 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, p. 14.
38. 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, Vol. 37, Iss. 4, pp. 532–534.
39. Benard P., Zarebanadkouki M., Hedwig C., Holz M., Ahmed M., Carminati A., Pore-scale distribution of mucilage affecting water repellency in the rhizosphere, *Vadose Zone Journal*, 2018, Vol. 17, Iss. 1, pp. 1–9.
40. 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.
41. Carrillo M.L.K., Letey J., Yates S.R., Measurement of initial soil-water contact angle of water repellent soils, *Soil Science Society of America Journal*, 1999, Vol. 63, Iss. 3, pp. 433–436.
42. Cihlář Z., Vojtová L., Conte P., Nasir S., Kučerík J., Hydration and water holding properties of cross-linked lignite humic acids, *Geoderma*, 2014, Vol. 230, pp. 151–160.
43. De Gryze S., Jassogne L., Bossuyt H., Six J., Merckx R., Water repellence and soil aggregate dynamics in a loamy grassland soil as affected by texture, *European Journal of Soil Science*, 2006, Vol. 57, Iss. 2, pp. 235–246.
44. Dlapa P., Doerr S., Lichner L., Sir M., Tesar M., Effect of kaolinite and Ca-montmorillonite on the alleviation of soil water repellency, *Plant Soil and Environment*, 2004, Vol. 50, Iss. 8, pp. 358–363.
45. 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, DOI: 10.1002/(SICI)1096-9837(199807)23:7<663::AID-ESP909>3.0.CO;2-6.
46. 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, No. 1–4, pp. 33–65, DOI: 10.1016/S0012-8252(00)00011-8.
47. 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, Iss. 1, pp. 57–66.
48. 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, Iss. 2, pp. 383–393.
49. Haas C., Gerke H.H., Ellerbrock R.H., Hallett P.D., Horn R., Relating soil organic matter composition to soil water repellency for soil biopore surfaces different in history from two Bt horizons of a Haplic Luvisol, *Ecohydrology*, 2018, Vol. 11, Iss. 6, p. 11.
50. Hajnos M., Calka A., Jozefaciuk G., Wettability of mineral soils, *Geoderma*, 2013, No. 206, pp. 63–69.
51. Jaramillo D.F., *Effect of soil drying temperature on water repellence in Andisols under Pinus patula cover*, Research report, National University of Colombia, Medellin, 2003, 36 p.
52. Jiménez J.J., Lorenz K., Lal R., Organic carbon and nitrogen in soil particle-size aggregates under dry tropical forests from Guanacaste, Costa Rica – implications for within-site soil organic carbon stabilization, *Catena*, 2011, Vol. 86, Iss. 3, pp. 178–191.
53. 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, No. 6, pp. 600–607.
54. Kleber M., Sollins P.,·Sutton R., A conceptual model of organo-mineral interactions in soils: self-assembly of organic molecular fragments into zonal structures on mineral surfaces, *Biogeochemistry*, 2007, Vol. 85, No. 1, pp. 9–24.
55. Kraemer F.B., Hallett P.D., Morras H., Garibaldi L., Cosentino D., Duval M., Galantini J., Soil stabilisation by water repellency under no-till management for soils with contrasting mineralogy and carbon quality, *Geoderma*, 2019, No. 355, p. 113902.
56. 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, Iss. 6, pp. 2010–2012.

57. Lilliefors H.W., On the Kolmogorov-Smirnov test for normality with mean and variance unknown, *Journal of the American statistical Association*, 1967, Vol. 62, Iss. 318, pp. 399–402.
58. Liu Z., Yu X., Wan L., Capillary rise method for the measurement of the contact angle of soils, *Acta Geotechnica*, 2016, Vol. 11, Iss. 1, pp. 21–35.
59. Markgraf W., Horn R., Peth S., An approach to rheometry in soil mechanics–Structural changes in bentonite, clayey and silty soils, *Soil Tillage Res.*, 2006, Vol. 91, pp. 1–14.
60. Markgraf W., Watts C.W., Whalley W.R., Hrkac T., Horn R., Influence of organic matter on rheological properties of soil, *Applied Clay Science*, 2012, Vol. 64, pp. 25–33.
61. Mezger T., *The Rheology Handbook for users of rotational and oscillatory rheometers*, Hanover: Vincentz, 2011, 436 p.
62. 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, Iss. 3, p. 8.
63. Papierowska E., Matysiak W., Szatyłowicz J., Debaene G., Urbanek E., Kalisz B., Łachacz A. Compatibility of methods used for soil water repellency determination for organic and organo-mineral soils, *Geoderma*, 2018, Vol. 314, pp. 221–231, DOI: 10.1016/j.geoderma.2017.11.012.
64. 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, Iss. 2., pp. 243–251.
65. 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, Iss. 2, pp. 299–307.
66. Vogelmann E.S., Reichert J.M., Prevedello J., Awe G.O., Mataix-Solera J., Can occurrence of soil hydrophobicity promote the increase of aggregates stability? *Catena*, 2013, Vol. 110, pp. 24–31, DOI: 10.1016/j.catena.2013.06.009.
67. Wallis M., Horne D., Soil water repellency, *Advances in soil science*, Springer, 1992, pp. 91–146.
68. Woche S.K., Goebel M.O., Kirkham M.B., Horton R., Van der Ploeg R.R., Bachmann J., Contact angle of soils as affected by depth, texture, and land management, *European Journal of Soil Science*, 2005, Vol. 56, Iss. 2, pp. 239–251.
69. *World Reference Base for soil resources 2014*: international soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps, World Soil Resources Report (106).

70. Wu W.J., Baseline studies of The Clay Minerals Society Source Clays: Colloid and surface phenomena, *Clays and Clay Minerals*, 2001, Vol. 49, Iss. 5, pp. 446–452.
71. Yang S., Gong A.M., Wu J.H., Lu T.H., Effect of contact angle on matric suction of unsaturated soil, *Rock and Soil Mechanics*, 2015, Vol. 36, Iss. 3, pp. 674–678.
72. Yudina A.V., Fomin D.S., Kotelnikova A.D., Milanovskii E.Yu., From the notion of elementary soil particle to the particle-size and microaggregate-size distribution analyses: A review, *Eurasian soil science*, 2018, Vol. 51, Iss. 11, pp. 1326–1347.
73. Zickenrott I.M., Woche S.K., Bachmann J., Ahmed M.A., Vetterlein D., An efficient method for the collection of root mucilage from different plant species: A case study on the effect of mucilage on soil water repellency, *J. Plant Nutr. Soil Sci.*, 2016, Vol. 179, pp. 294–302.

УДК 631.454
DOI: 10.19047/0136-1694-2020-101-124-158

Ссылки для цитирования:
Балгабаев А.М., Елешев Р.Е., Умбетов А.К., Иванов А.Л., Рогова О.Б., Колобова Н.А. Запасы и групповой состав фосфатов почв предгорной зоны Илийского Алатау и их изменение при длительном использовании // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2020. Вып. 101. С. 124-158. DOI: 10.19047/0136-1694-2020-101-124-158
Cite this article as:
Balgabaev A.M., Eleshev R.E., Umbetov A.K., Ivanov A.L., Rogova O.B., Kolobova N.A., Stocks and fraction composition of phosphorus in the Ili Alatau foothill soils and their change under long-term use, Dokuchaev Soil Bulletin, 2020, V. 101, pp. 124-158, DOI: 10.19047/0136-1694-2020-101-124-158

Запасы и групповой состав фосфатов почв предгорной зоны Илийского Алатау и их изменение при длительном использовании

© 2020 г. А. М. Балгабаев[1], Р. Е. Елешев[1*], А. К. Умбетов[1], А. Л. Иванов[2], О. Б. Рогова[2], Н. А. Колобова[2***]**

[1]Казахский национальный аграрный университет, Казахстан, 050010, г. Алматы, проспект Абая, 8,
[*]https://orcid.org/0000-0002-2178-3388,

[2]Почвенный институт им. В.В. Докучаева, Россия, 119017, Москва, Пыжевский пер, 7, стр. 2,
[**]https://orcid.org/0000-0003-2908-0828, e-mail: olga_rogova@inbox.ru,
[***]e-mail: nataly_starok@mail.ru.

Поступила в редакцию 13.11.2019, *после доработки* 06.02.2020, *принята к публикации* 04.03.2020

Резюме: В почвах Илийского Алатау (темно-каштановая, светло-каштановая, горный чернозем) при применении удобрений на бессменных посевах сахарной свеклы и в севообороте существенно изменяются их агрохимические показатели, а также запасы и групповой состав фосфора (валовое содержание, органические и минеральные формы фосфора). Валовое содержание фосфора в почвах составляло 1720–2330 мг/кг и уменьшалось в ряду: целинные горные черноземы > пахотные темно-каштановые > пахотные горные черноземы > светло-

каштановые > целинные темно-каштановые. Обнаружено, что в темно-каштановых пахотных почвах, по сравнению с целинными, повышалось содержание легкодоступных форм фосфора (рыхлосвязанных фосфатов Ca-PI и разноосновных фосфатов кальция Ca-PII) и снижалось – труднодоступных (высокоосновных фосфатов Ca-PIII, фосфатов алюминия Al-P и железа Fe-P). В пахотных горных черноземах, по сравнению с целинными, снижалось содержание всех фракций фосфора. Светло-каштановые пахотные почвы содержат наименьшее количество легкодоступных фосфатов и наибольшее – фосфатов алюминия и железа. При возделывании свеклы на светло-каштановых почвах содержание всех фракций фосфора, кроме фосфатов железа, повышалось с увеличением дозы удобрения. Эффективность внесения органо-минеральных удобрений сравнима с внесением NK + $P_{1.5}$ и NK + P_2, урожайность корнеплодов сахарной свеклы в севообороте в этих вариантах опыта наибольшая и составляет 614 и 577 ц/га; в контрольном варианте (без удобрений) – 197 ц/га, а на фоне NK – 277 ц/га. При бессменном посеве эти величины были соответственно 577 и 561 ц/га; 311 и 327 ц/га. Близкие значения урожайности были получены в двух вариантах: при использовании органо-минеральной системы удобрения и при внесении полуторных норм минерального фосфора на фоне азотно-калийных удобрений, что объясняется дополнительным использованием растениями сахарной свеклы фосфора вновь образованных органических соединений.

Ключевые слова: фосфатный фонд, фракционирование фосфорных соединений, органический и минеральный фосфор, сахарная свекла, продуктивность, севооборот, бессменный посев.

Stocks and fraction composition of phosphorus in the Ili Alatau foothill soils and their change under long-term use

A. M. Balgabaev[1], R. E. Eleshev[1*], A. K. Umbetov[1], A. L. Ivanov[2], O. B. Rogova[2], N. A. Kolobova[2***]**

[1]Kazakh National Agrarian University,
8 Abay Avenue, Almaty 050010, Republic of Kazakhstan,
[*]https://orcid.org/0000-0002-2178-3388,

[2]V.V. Dokuchaev Soil Science Institute,
7 Bld. 2 Pyzhevskiy per., Moscow 2119017, Russian Federation,
[**]https://orcid.org/0000-0003-2908-0828, e-mail: olga_rogova@inbox.ru,
[***]e-mail: nataly_starok@mail.ru.

Received 13.11.2019, *Revised* 06.02.2020, *Accepted* 04.03.2020

Abstract: In soils of Ili Alatau (dark kastanozems, light kastanozems, mountain chernozems) both in continuous cropping system of sugar beet and in crop rotation with prolonged use of fertilizers the soil agrochemical indices, phosphorus reserves and group composition (total, organic and mineral) vary significantly. The total phosphorus content in the soils was 1720–2330 mg/kg and decreased in the series: virgin mountain chernozems > arable dark kastanozems > arable mountain chernozems > light kashtanozems > virgin dark kastanozems. It was observed, that in arable dark kastanozems, as compared to virgin soils, the content of available forms of phosphorus (loose-bound phosphates Ca-PI and miscellaneous calcium phosphates Ca-PII) increased, and the content of plant unavailable forms of phosphorus (poorly soluble Ca phosphates Ca-PIII, phosphates of aluminum Al-P and iron Fe-P) decreased. In arable mountain chernozems, in comparison with virgin mountain chernozems, the content of all fractions of phosphorus decreased. Arable light kastanozems contain the least amount of available phosphates and the highest of phosphates of aluminum and iron. When cultivating beets on light kastanozems, the content of all fractions of phosphorus, except iron phosphates, increased with increasing dose of fertilizers. The effectiveness of the application of the organic-mineral fertilizers was comparable to the introduction of NK + $P_{1.5}$ and NK + P_2, the yield of sugar beet in the crop rotation in these variants is the highest and amounts to 614 and 577 centner/ha; in the control value (obtained without fertilizers) – 197 centner/ha, and in the variant with application of only NK fertilizers – 277 centner/ha. In continuous cropping system these values were 576 and 561 centner/ha; 311 and 327 centner/ha respectively. Close values of crop yield were obtained in two variants: with the organo-mineral system and NK + $P_{1.5}$, due to the additional use by the plants of sugar beet phosphorus of newly formed organic compounds.

Keywords: phosphorus stock, fractionation of phosphorus compounds, organic and mineral phosphorus, sugar beet, productivity, crop rotation, continuous cropping.

ВВЕДЕНИЕ

По данным РГУ “Агрохимслужба” МСХ РК за 2010–2016 гг. более 56% пахотных земель Казахстана очень бедны фосфором, а 18–20% мало обеспечены (Отчет о деятельности РГУ…, 2016).

В настоящее время требуемое количество фосфорных удобрений под те или иные культуры преимущественно рассчитывается на основе определения содержания подвижных фосфатов в

почве. Однако простой анализ зависимости урожайности культур от содержания фосфора в почве не всегда отражает реальную картину.

Отсутствие современных экспериментальных данных по изучению состава фосфора органических соединений и их трансформации при длительном применении удобрений еще в большей степени усугубляет проблему. При этом вопрос изучения фосфора органических соединений в питании растений применительно к почвенным разностям Казахстана является абсолютно новым. Решение данного вопроса позволит по-новому пересмотреть существующие схемы удобрений. Определение структуры фосфатного фонда в условиях севооборота в сравнении с таковым в бессменном посеве сахарной свеклы позволит корректировать обеспеченность почв подвижным фосфором.

В условиях интенсификации сельского хозяйства существенно возрастают проблемы управления почвенным плодородием и разработки приемов его расширенного воспроизводства. Как считают многие исследователи, фосфатный уровень почв является показателем их плодородия и его повышение свидетельствует об окультуренности почв (Синягин, 1968; Хейфец, 1948; Бурангулова, 1957; Гриндель, Зырин, 1965; Козыбаева, 1974; Вильдфлуш, 1975; Иванов, Елешев, 1990; 1991; Иванов, 1991; Гринец 2009, Гринец и др., 2019).

Изучение трансформации элементов питания, в частности фосфора, в зависимости от типов почв в различных климатических условиях, агротехнических приемов, применения удобрений является весьма актуальным.

Известно, что фосфорорганические соединения составляют значительную часть валового фосфора почвы. По данным И.И. Синягина на их долю в пахотном слое приходится около 30–85% общего содержания фосфора в почве (Синягин, 1968).

В 70-х годах прошлого столетия существовали различные мнения относительно форм органических фосфатов в почве. Одни исследователи считали, что фосфор находится в форме неспецифических органических соединений индивидуальной природы: фитин, фосфатиды, нуклеиновые кислоты и др. (Хейфец, 1948; Бурангулова, 1957), – другие отмечали его наличие в составе спе-

цифических гумусовых веществ (Гриндель, Зырин, 1965; Вильдфлуш, 1975).

Применение минеральных и органических удобрений в разных типах почв приводило в одних случаях к повышению содержания органических фосфатов (Минеев и др., 1993; Фокин, Синха, 1969), а в других оно оставалось неизменным или даже снижалось (Меренова, 1955).

Несмотря на высокое содержание фосфора, связанного с органическим веществом (30–50% от валового содержания), он слабо поглощается растениями (Душечкин, 1929). В то же время другие исследователи (Дмитриенко, 1957) считают, что органическое вещество, разлагающееся под влиянием микроорганизмов и химических процессов, является одним из постоянных источников питания растений, в том числе и фосфорного.

Отдельные ученые (Дурасов, 1960; Ратнер, Самойлова, 1955; Кривоносова, Супруненко, 1971; Пономарева, 1970; 1971) отмечают увеличение количества органических фосфатов при внесении удобрений, тогда как в других исследованиях (Левенец, Кривоносова, 1974; Касицкий, 1979) минеральные удобрения и даже органические не повышали, а иногда снижали их содержание. Так, наибольшее количество фосфора приходится на долю неспецифических соединений: в черноземе мощном – около 50%, а в черноземе оподзоленном – около 30% от суммы органических фосфатов. В том и другом случае отмечалось некоторое увеличение количества фосфора фульвокислот, особенно в мощном черноземе, при одновременном уменьшении количества фосфора гуминовых кислот. Внесение минеральных удобрений в различной степени изменяло содержание P_2O_5 во фракциях фосфорсодержащих органических соединений, а именно способствовало уменьшению количества фосфора неспецифических соединений.

Решение проблемы регулирования фосфатного режима связано с определением уровня, до которого целесообразно повышать содержание растворимых фосфатов в зависимости от типа почв, содержания природного фосфора, особенностей поглощения и закрепления его в почве, состава возделываемых культур и других показателей (Касицкий, 1979; Носко, 1983, 1985; Чумаченко, 1969; Рахимгалиева, 2010; Чиркова, Козыбаева, 1978, 1980; Могханм,

2011; Умбетов, 2016; Османьян, 2009).

Как отмечает И.Н. Чумаченко (1969), большую роль в питании растений благодаря своей мобильности при определенных условиях играют неспецифические органические фосфаты почвы. Им установлено, что применение фосфорных удобрений практически не повлияло на увеличение содержания органических фосфатов на изучаемых орошаемых сероземах Средней Азии (светлый, типичный, темный, староорошаемый). Это подтверждает и Сущеница Б.А. (1978), говоря о том, что особое место в этих почвах занимают органофосфаты, являющиеся близким резервом фосфорного питания в неудобренной почве, их содержание превышает сумму подвижных минеральных фосфатов почти в два раза. Трехлетняя люцерна, хорошо удобренная фосфором, способствовала семикратному увеличению фосфатов органического происхождения.

Количество органических соединений индивидуальной природы (нуклеиновые кислоты, фитин, фосфатиды) в почвах не превышает 10–15% общего запаса гумуса (Кононова, 1963; Бацула, Кривоносова, 1973). Их источниками являются растительные остатки и продукты обмена и синтеза микроорганизмов.

Макаров М.И. и др. (1997), изучая распределение $P_{орг}$ по гранулометрическим фракциям дерново-подзолистых, серых лесных и черноземных почв, пришли к заключению, что свыше 70% $P_{орг}$ гумусовых горизонтов приходилось на долю илистых и мелкопылеватых фракций. В тонкодисперсных фракциях было аккумулировано органическое вещество, относительно обогащенное фосфором, что обусловливало уменьшение в них величины отношения C : P.

В исследованиях Хейфец Д.М и др. (Хейфец, 1948; Макаров, 1997; 2005) показано, что количество фосфора, связанного с органическим веществом в изученных почвах различно и составляет от 9 до 50% от валового содержания для разных почв.

Результаты этих исследований (Макаров и др., 1999; Макаров, 2005; Макаров, Малышева, 2006; Макаров, Леошкина, 2009) подтверждают, что количественная неопределенность понятия “фосфор фульвокислот” следует из высокой зависимости концентрации P в фульвокислотах от методики выделения этой группы

соединений.

Органические и минеральные фосфаты неразрывно связаны и постоянно находятся в процессе взаимопревращения, при этом органофосфаты являются резервом непосредственно доступных для растений форм фосфора (Иванов и др., 2012).

В целом обилие публикаций по трансформации органических фосфатов говорит о достаточной изученности этого вопроса в странах СНГ и дальнего зарубежья. В различных почвенно-климатических условиях Казахстана подобных исследований проводилось мало, поэтому для предгорной зоны Илийского Алатау вопрос участия органического фосфора в питании растений является на сегодня весьма актуальным.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Объекты исследования – почвы предгорной пустынно-степной зоны (пояс предгорных светло-каштановых почв до высоты 750–850 м) и почвы зоны предгорной степи (от 700–800 до 1200–1400 м): пояса предгорных темно-каштановых почв до высоты 850–1000 м, предгорных черноземов до высоты 750–850 м.

Территория стационара Казахского НИИ земледелия и растениеводства, где проводился полевой опыт с сахарной свеклой, расположена у подножья горных хребтов Илийского Алатау на высоте 700–800 м над уровнем моря. Почвенный покров опытного участка представлен предгорными светло-каштановыми почвами. Почвообразующими породами являются лёссовидные суглинки, глубоко подстилаемые галечниковыми отложениями. Грунтовые воды залегают на глубине 10 м и более.

Светло-каштановые почвы опытного участка имеют хорошо развитый профиль: гумусовый горизонт (Ап + $А_1$) оструктурен, слабо уплотнен, поэтому вполне благоприятен для возделывания многих сельскохозяйственных культур. Содержание гумуса – 2.27–2.35%, валовых форм азота – 0.171–0.182%, фосфора – 0.200–0.210% и калия – 1.62–1.75%. Содержание подвижных форм питательных элементов в пахотном горизонте составило соответственно 23.1–24.8, 20.2–27 и калия – 424–455 мг/кг почвы.

Решение поставленных задач осуществлялось посредством закладки ключевых участков на различных типах почв (чернозе-

мы, темно-каштановые и светло-каштановые) вертикальной зональности Илийского Алатау, а также на участке многолетнего полевого опыта восьмипольного свекловичного севооборота и бессменного посева сахарной свеклы.

Реализация поставленных задач осуществлялась в многолетнем (с 1961 г.) стационарном опыте в севообороте и на бессменном посеве сахарной свеклы.

Всего за 56 лет под бессменные посевы сахарной свеклы на светло-каштановой почве внесено:

Одинарная доза фосфора – $N_{5600}P_{3360}K_{3360}$;
Полуторная доза – $N_{5600}P_{5040}K_{3360}$;
Двойная доза – $N_{5600}P_{6720}K_{3360}$.

Схема опыта:

1. Без удобрений (контроль)
2. NK-фон
3. NK + P_1 (одинарная доза)
4. NK + $P_{1.5}$ (полуторная доза)
5. NK + P_2 (двойная доза)
6. NPK + 60 т навоза

Повторность опыта 4-кратная, площадь делянки – 216 м^2. В качестве азотных удобрений использовали мочевину (46% д.в.), фосфорных – двойной суперфосфат (47% д.в.), калийных – хлористый калий (60% д.в.). Ежегодная одинарная доза P_2O_5 – 90 кг/га, полуторная – 135 кг/га и двойная доза – 180 кг/га.

Агрохимические свойства изучаемых почв (гумус, содержание NPK, pH и др.) определяли общепринятыми классическими методами; общее содержание органических фосфатов – методом Мета в модификации Гинзбурга; состав минерального фосфора – по Гинзбург-Лебедевой; подвижные фосфаты – по методу Мачигина.

Химические анализы почв выполнены в лабораториях кафедры “Почвоведения и агрохимии” Казахского национального аграрного университета, Казахского НИИ Почвоведения и агрохимии им. У.У. Успанова, Казахского НИИ земледелия и растениеводства и Почвенного института им. В.В. Докучаева (г. Москва).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты определения общих агрохимических свойств почв представлены в таблице 1.

Запасы и групповой состав фосфатов почв предгорной зоны Илийского Алатау (черноземы и каштановые почвы) и их изменение при длительном использовании

Исследования показали, что в верхней части гумусового профиля основных типов почв количество валового фосфора колеблется от 1880 до 2330 мг/кг почвы (табл. 2).

Светло-каштановая почва содержит 1880, пахотные темно-каштановые – 2130, целинные темно-каштановые – 1720, пахотные горные черноземы – 2050, целинные горные черноземы – 2330 мг/кг фосфора. Таким образом, максимальный запас фосфора отмечается в целинных горных черноземных почвах.

В профиле всех типов почв отчетливо выражено уменьшение содержания фосфора с глубиной, что объясняется биологической аккумуляцией данного элемента в верхней части профиля и закреплением некоторой доли фосфатов, поступающих в пахотный слой с удобрениями.

Содержание общего фосфора в верхних горизонтах исследуемых почв также зависело от типа почв. Так, светло-каштановая почва содержит 1096, пахотные темно-каштановые – 1126, целинные темно-каштановые – 1005, пахотные горно-черноземные почвы – 1052, целинные черноземные почвы – 1007 мг/кг почвы.

Таблица 1. Агрохимическая характеристика обследованных целинных и пахотных почв Илийского Алатау (2018 г.)
Table 1. Agrochemical characteristics of surveyed virgin and arable soils of Ili Alatau (2018)

Почва	Глубина горизонта, см	Гумус, %	Азот, %	Фосфор, %	Калий, %	pH	CO_2, %	Подвижные формы, мг/кг		
								$N_{л.г.}$	P_2O_5	K_2O
Темно-каштановая почва, пашня	0–30	2.33	0.140	0.224	2.75	8.27	-	30.8	53.0	360
	30–47	1.62	0.126	0.224	3.00	8.14	-	30.8	18.0	220
	47–80	1.08	0.070	0.212	2.87	8.52	1.50	28.0	5.0	180
	80–100	0.98	0.064	0.198	2.65	8.61	2.10	26.3	4.8	170
	100–128	0.82	0.052	0.176	2.48	8.70	2.82	20.4	4.5	149
Темно-каштановая почва, целина	0–10	3.11	0.224	0.178	3.06	8.42	1.17	33.6	14.0	710
	10–38	2.33	0.226	0.148	3.00	8.48	0.33	33.6	10.0	610
	38–54	1.25	0.126	0.176	2.75	8.68	3.51	30.8	10.0	460
	54–98	0.71	0.084	0.148	2.19	8.88	-	28.0	5.0	110
	98–117	0.68	0.075	0.130	2.03	8.89	-	25.0	4.8	105

Почва	Глубина горизонта, см	Гумус, %	Азот, %	Фосфор, %	Калий, %	pH	CO_2, %	Подвижные формы, мг/кг		
								$N_{л.г.}$	P_2O_5	K_2O
Чернозем горный, пашня	0–25	3.34	0.196	0.196	2.69	8.51	4.18	33.6	20.0	250
	25–55	1.18	0.098	0.168	2.19	8.72	11.14	39.2	5.0	90
	55–95	0.88	0.084	0.148	2.25	8.84	9.43	36.4	3.0	90
	95–130	0.72	0.072	0.135	2.17	8.86	9.61	33.6	3.2	84
Чернозем горный, целина	0–10	5.07	0.518	0.212	2.75	6.62	-	53.2	41.0	850
	10–38	2.23	0.434	0.200	2.75	6.80	-	50.4	27.0	590
	38–58	3.75	0.196	0.148	2.88	7.21	-	47.6	10.0	300
	58–90	2.30	0.126	0.160	2.00	8.72	11.51	39.2	5.0	90
	90–117	2.15	0.115	0.151	1.96	8.76	12.40	36.7	5.3	84
Светло-каштановая почва, пашня	0–33	1.65	0.0098	0.200	2.50	8.61	1.95	28.0	12.0	290
	33–51	1.32	0.084	0.204	2.56	8.68	3.25	25.2	10.0	230
	51–68	1.45	0.126	0.200	2.50	8.60	3.57	28.0	6.0	190
	68–96	1.31	0.118	0.196	2.41	8.62	3.64	24.0	5.5	185
	96–132	1.22	0.109	0.180	2.30	8.64	3.80	20.0	5.2	175

Максимальное содержание общего фосфора (1126 мг/кг) обнаружено в пахотном слое темно-каштановых почв (табл. 2).

Количество минерального фосфора зависит от типа почв и изучаемого горизонта и колеблется от 715.5 до 1145 мг/кг. Максимальное содержание минерального фосфора в верхнем горизонте обнаружено в пахотной светло-каштановой почве – 1093 мг/кг, а минимальное содержание – 983 мг/кг – в пахотной темно-каштановой почве.

Таблица 2. Формы и содержание фосфора целинных и пахотных почвах Илийского Алатау (2018 г.)
Table 2. Forms and content of phosphorus in virgin and arable soils of Ili Alatau (2018)

Тип почвы	Глубина горизонта, см	Фосфор в мг/кг почвы		
		Валовый	Общий	Минеральный
Темно-каштановая почва, пашня	0–30	2130	1126	983
	30–47	2120	1062	933
	47–80	2080	1029	982
Темно-каштановая почва, целина	0–10	1720	1005	998
	10–38	1490	792	771
	38–54	1540	915	913
Чернозем горный, пашня	0–25	2050	1052	1050
	25–55	1400	907	906
Чернозем горный, целина	0–10	2330	1007	1004
	10–38	2180	763	760
	38–58	1910	716	715,5
Светло-каштановая почва, пашня	0–33	1880	1096	1093
	33–51	1730	1147	1145
	51–68	1880	965	964

Следует отметить, что содержание валового фосфора значительно превышает содержание “общего” в связи с тем, что первый определяли методом рентгенофлуоресцентного анализа, позволяющим определить все формы соединений элемента, независимо от

их устойчивости к тем или иным химическим агентам, в том числе фосфор, находящийся в составе алюмосиликатов или устойчивых органических соединений, последний же определялся после извлечения его серной кислотой при нагревании, что не гарантирует полноту экстракции.

Исследования группового состава фосфатов показали, что содержание рыхлосвязанных фосфатов (Ca-P_I) в пахотном слое (0–30 см) изучаемых почв колеблется от 26.5 до 36.0 мг P_2O_5 на 1 кг почвы. По профилю почв содержание фосфатов этой фракции постепенно снижается (табл. 3).

Несмотря на полученную незначительную (порядка 10–15%) разницу между суммой фракций минеральных фосфатов в таблице 3 и содержанием фосфора минеральных соединений в таблице 2, обусловленную суммированием аналитических погрешностей при фракционном анализе, тенденция одинакова. Фракции разноосновных фосфатов кальция (Ca-P_{II}) в почвах содержится значительно больше, чем фракции Ca-P_I. Наиболее высокое содержание фракции Ca-P_{II} наблюдается в пахотном слое темно-каштановой почвы (320 мг/кг), в черноземных почвах содержится 270–280 мг/кг, а в светло-каштановой почве – 262 мг/кг разноосновных фосфатов. Уменьшение по профилю почв содержания фракции разноосновных фосфатов (Ca-P_{II}) более постепенное, в сравнении с фракциями рыхлосвязанных фосфатов. Различие почв по содержанию фракций разноосновных фосфатов кальция (Ca-P_{II}) остается стабильным по всей глубине (табл. 3).

Высокоосновные фосфаты кальция занимают значительное место в фоне “активных” минеральных фосфатов, но доступность их крайне ограничена, так как они представлены в основном первичными минералами типа аппатита. В черноземных почвах в верхнем горизонте содержание высокоосновных фосфатов (Ca-P_{III}) составляет 715–855 мг/кг, темно-каштановыых – 747–758, светло-каштановых – 742 мг/кг и с глубиной постепенно уменьшается. Максимальное содержание этой группы фосфатов (855 мг/кг) отмечено на целинных черноземных почвах.

Таблица 3. Состав и содержание фракций минеральных фосфатов целинных и пахотных почв Илийского Алатау (2018 г.)
Table 3. Composition and fractions of mineral phosphates in virgin and arable soils of Ili-Alatau (2018)

Почва	Глубина горизонта, см	Фракции минеральных фосфатов, мг/кг						
		Подвижный фосфор, мг/кг	Ca-P_I	Ca-P_{II}	Al-P	Fe-P	Ca-P_{III}	Сумма
Темно-каштановая почва, пашня	0–30	53.0	34.5	345	34.5	36.7	747	1197.7
	30–47	18.0	28.5	272	36.5	44.7	680	1061.7
	47–80	5.0	25.0	287	21.5	36.3	667	1036.8
	80–100	4.8	22.5	255	30.0	40.5	683	1031.0
	100–128	4.5	16.0	247	40.0	44.7	690	1037.7
Темно-каштановая почва, целина	0–10	14.0	30.0	310	36.5	38.7	758	1173.2
	10–38	10.0	26.0	247	36.3	40.3	701	1050.6
	38–54	10.0	23.8	240	32.0	42.0	703	1040.8
	54–98	5.0	22.5	227	41.2	43.3	697	1031.0
	98–117	4.8	18.7	220	34.7	41.0	680	994.4

Почва	Глубина горизонта, см	Фракции минеральных фосфатов, мг/кг						
		Подвижный фосфор, мг/кг	Ca-P_I	Ca-P_{II}	Al-P	Fe-P	Ca-P_{III}	Сумма
Чернозем горный, пашня	0–25	20.0	28.0	280	38.3	43.3	715	1104.6
	25–55	5.0	25.0	260	40.0	48.0	687	1060.0
	55–95	3.0	23.0	240	34.8	42.2	670	1010.0
	95–130	3.2	20.0	183	28.5	46.7	645	923.2
Чернозем горный, целина	0–10	41.0	36.0	287	44.3	38.7	855	1261.0
	10–38	27.0	31.5	267	40.7	44.7	738	1121.9
	38–58	10.0	26.3	233	38.0	43.3	713	1053.6
	58–90	5.0	24.7	218	36.7	47.8	689	1016.2
	90–117	5.3	22.8	213	37.0	48.5	667	988.3
Светло-каштановая почва, пашня	0–33	12.0	26.5	262	48	90	742	1168.5
	33–51	10.0	22.0	251	47	95	731	1146.0
	51–68	6.0	18.3	243	49	97	713	1120.3
	68–96	5.5	16.0	224	45	94	695	1074.0
	96–132	5.2	15.2	189	42	93	691	1030.2

По мере увеличения карбонатности почв количество (относительное) высокоосновных фосфатов кальция типа аппатита (Ca-P_{III}) возрастает. Содержание фракции фосфатов алюминия и железа в зависимости от типа почв составляет: черноземная почва – 80–85 мг/кг, темно-каштановая почва – 70–75 мг/кг, светло-каштановая почва – 130 мг/кг почвы (табл. 3).

Сумма минеральных фосфатов также зависит от типа исследуемых почв. Так, на целинных черноземных почвах сумма минеральных фосфатов в верхнем горизонте составляет – 1261.0 мг/кг, пахотных черноземах – 1104.6 мг/кг, на целинных темно-каштановых почвах – 1173.2 мг/кг, пахотных темно-каштановх – 1197.7 мг/кг, пахотных светло-каштановых – 1168.5 мг/кг.

Черноземные почвы отличаются от каштановых высоким содержанием малоподвижных и низким содержанием наиболее подвижных фракций минеральных фосфатов.

Процессы трансформации фосфора органических и минеральных соединений при длительном применении удобрений на посевах сахарной свеклы

На сегодняшний день стало возможным выделение четырех групп процессов, влияющих на трансформацию фосфатов в почве: геохимические, биологические, химические и антропогенные. Каждая из выделенных групп имеет свою специфику и приводит к достаточно своеобразным формопроявлениям соединений фосфора в почве.

Длительное применение удобрений в севооборотах вызывает значительные изменения физико-химических свойств почвы, ее биологической активности и питательного режима. Особое место в вопросах длительного применения удобрений занимает фосфор, что связано как с большим значением этого элемента для жизни растений, так и со спецификой его поведения в почве. Обладая высокой реакционной способностью, фосфор активно участвует в различных почвенных процессах, что обусловливает возникновение разнообразных фосфорных соединений как минеральных, так и органических. Сравнительно низкий процент усвоения фосфора из удобрений, особенно в вариантах с высокими дозами фосфорных удобрений, способствует его значительному накоплению в

почве.

Внесенный в почву фосфор трансформируется, в результате чего его подвижность с течением времени изменяется, поэтому сравнение многолетней динамики различных форм фосфатов при длительном и систематическом применении удобрений, в частности фосфорных, представляет научный интерес (Пономарева, 1980; 1989; Иванов, Елешев, 1990; 1991; Иванов, 1991).

В других исследованиях (Басибеков, Торшина, 1975, 1978, 1981; Елешев, 1980; Иванов, Елешев, 1990; 1991; Иванов, 1991) длительное применение удобрений на слабовыщелоченном черноземе способствовало значительному накоплению в почве сравнительно легкорастворимых фосфатов щелочных и щелочноземельных металлов, увеличивало содержание фракции фосфатов железа и алюминия, значительно изменяло содержание фракции высокоосновных фосфатов кальция.

Накопление и использование остаточных фосфатов в большей мере отражается на содержании минеральных фосфатов по сравнению с органическими. Фосфор удобрений переходит в состав всех групп минеральных фосфатов, из которых в первую очередь используются фосфаты фракций Al-P и Ca-P, а железофосфаты – в меньшей степени. Систематическое внесение фосфорных удобрений приводит к значительному увеличению подвижности почвенных фосфатов. Основными формами наиболее подвижных соединений являются фосфаты, извлекаемые 0.5 н. NH_4F, 0.1 н. NaOH и 0.5 н. H_2SO_4. Увеличение норм фосфорных удобрений способствует возрастанию массы наиболее подвижных соединений фосфора только до нормы P_{90} и P_{120}. При применении P_{150} и P_{180} возрастания подвижных фракций фосфора не происходило (Елешев, Есполов, 1982).

Значительную часть валовых запасов фосфора почвы составляют фосфорорганические соединения. Они играют важную роль в почвенных биохимических процессах и обеспечении растений доступным фосфором в процессе минерализации. Исследования Елешева Р.Е. (Елешев, 1984; Елешев, Иванов, 1986) показали, что почвы предгорной зоны Илийского Алатау содержат 0.15–0.16% фосфора. В верхней части гумусового профиля основных типов почв количество валового фосфора колеблется от 130 до 200

мг/100 г почвы. Так, сероземы содержат 130–150 мг/100 г почвы, каштановые – 187–200 мг/100 г почвы, а запасы валового фосфора в метровом слое составляют 16–18 и 17–23 т/га соответственно.

Результаты наших исследований на светло-каштановой почве показали, что содержание подвижного фосфора в почве под сахарной свеклой зависит от нормы внесенного фосфора и биологической особенности культуры, которая потребляет много фосфора при формировании урожая.

В 2018 г. при возделывании в севообороте сахарной свеклы внесение полного минерального удобрения, где одинарная доза фосфора составила 90 кг/га, обеспечило повышение подвижного фосфора в почве в фазу 5–6 листьев в слое 0–20 см до 49.0 мг/кг, тогда как в контрольном варианте и в варианте NK (фон) содержание подвижного фосфора не превышало 20.7 и 23.7 мг/кг почвы. При внесении полуторной ($P_{1.5}$) и двойной дозы фосфорного удобрения, содержание подвижного фосфора в 0–20 см слое почвы увеличилось до 51.9 и 59.0 мг/кг почвы соответственно. Там, где применялось полное минеральное удобрение и 60 т навоза (вариант 6), содержание подвижного фосфора в верхнем горизонте (0–20 см) составило 58.3 мг/кг. С глубиной (20–40) содержание подвижного фосфора существенно уменьшается (табл. 4).

При бессменном возделывании сахарной свеклы внесение минеральных удобрений также увеличивает содержание подвижного фосфора в почве. Внесение полного минерального удобрения, где одинарная доза составила 90 кг/га, обеспечило повышение подвижного фосфора в фазу 5–6 листьев в слое 0–20 см до 55.9 мг/кг почвы, в то время как в контрольном варианте и в варианте NK (фон) содержание подвижного фосфора составило 44.0 и 46.2 мг/кг почвы соответственно. При применении полуторной дозы ($P_{1.5}$) фосфорных удобрений содержание подвижного фосфора увеличилось до 56.4 мг/кг почвы. Совместное внесение полной дозы NPK и 60 т навоза увеличивало содержание подвижного фосфора в пахотном слое до 58.6 мг/кг почвы. В подпахотном слое (20–40 см) содержание подвижного фосфора в контрольном варианте и в варианте NK снижалось до 39.0 и 41.7 мг/кг соответственно, а в удобренных вариантах составило 47.1–50.6 мг/кг почвы (табл. 5).

Содержание подвижного фосфора осенью (уборка корнеплодов) заметно уменьшается, это связано с его потреблением и выносом растениями сахарной свеклы в процессе формирования биологического урожая культуры.

Изучение фракционного состава светло-каштановой почвы по методу Гинзбург-Лебедевой показало, что длительное и систематическое внесение фосфорных удобрений в севообороте и бессменных посевах сахарной свеклы привело к увеличению содержания суммы "активных фосфатов". Количество рыхлосвязанных ($Ca\text{-}P_I$) и разноосновных ($Ca\text{-}P_{II}$) фосфатов кальция возросло не только в абсолютном, но и в относительном выражении к валовому фосфору.

В севообороте на посевах сахарной свеклы в фазе 5–6 листьев в 0–20 см слое одинарная норма фосфора (P_{90}) увеличивала содержание рыхлосвязанных ($Ca\text{-}P_I$) и разноосновных ($Ca\text{-}P_{II}$) фосфатов до 89 и 265 мг/кг соответственно, или 6.7 и 19.9% от суммы фракций фосфатов. Полуторная норма (P_{135}) увеличивала содержание рыхлосвязанных ($Ca\text{-}P_I$) и разноосновных ($Ca\text{-}P_{II}$) фосфатов до 104 и 296 мг/кг соответственно, или 7.4 и 21.1% от суммы фракций (табл. 4).

На бессменных посевах сахарной свеклы в верпхнем (0–20 см) слое почвы в фазе 5–6 листьев содержание рыхлосвязанных ($Ca\text{-}P_I$) и разноосновных ($Ca\text{-}P_{II}$) фосфатов в варианте с одинарной нормой (P_{90}) фосфорных удобрений составило 94.0 и 279.0 мг/кг соответственно, или 6.8 и 20.3% от содержания фракций. В варианте с полуторной нормой (P_{135}) содержание фракций $Ca\text{-}P_I$ и $Ca\text{-}P_{II}$ составило 106.0 и 297.0 мг/кг соответственно, или 7.5 и 20.9%, а в варианте, где применялась полная норма NPK и 60 т навоза – 102.0 и 285 мг/кг или 7.3 и 20.4% соответственно (табл. 5). Эти же показатели в слое почвы 0–20 см в контрольном и фоновом вариантах (NK) не превышали в севообороте 25–34 и 223–333 мг/кг, а на бессменных посевах сахарной свеклы – 32–40 и 238–245 мг/кг почвы (табл. 5).

Таблица 4. Состав и содержание минеральных фосфатов в зависимости от длительного применения удобрений на посевах сахарной свеклы в севообороте (фаза 5–6 листьев, 2018 г.)
Table 4. Composition and mineral phosphates content depending on the long-term fertilizers application for sugar beet cultivation in crop rotation (the phase of 5–6 leaves, 2018)

Почва	Глубина горизонта, см	Подвижный фосфор, мг/кг	Фракции минеральных фосфатов, мг/кг					Сумма
			$Ca\text{-}P_I$	$Ca\text{-}P_{II}$	Al-P	Fe-P	$Ca\text{-}P_{III}$	
Контроль (б/у)	0–20	20.7	25.0	223	45	90	785	1168
	20–40	15.9	22.0	217	43	98	776	1156
NK-фон	0–20	23.7	34.0	233	48	96	795	1206
	20–40	22.6	30.0	226	45	100	802	1203
$NK + P_1$ (одинарная доза)	0–20	49.0	89.0	265	56	100	821	1331
	20–40	36.2	78.0	257	62	97	825	1319
$NK + P_{1.5}$ (полуторная доза)	0–20	51.9	97.0	289	58	98	835	1377
	20–40	38.3	91.0	275	61	101	841	1369
$NK + P_2$ (двойная доза)	0–20	59.0	104.0	296	60	96	846	1402
	20–40	39.1	95.0	287	63	99	853	1397
NPK + 60 т навоза	0–20	58.3	98.0	274	59	97	830	1358
	20–40	45.2	91.0	260	61	98	836	1346

Таблица 5. Состав и содержание минеральных фосфатов в зависимости от длительного применения удобрений на посевах бессменной сахарной свеклы (фаза 5–6 листьев, 2018 г.)
Table 5. Composition and mineral phosphates content depending on the long-term fertilizers application for sugar beet continuous cropping (the phase of 5–6 leaves, 2018)

Почва	Глубина горизонта, см	Подвижный фосфор, мг/кг	Фракции минеральных фосфатов, мг/кг					Сумма
			$Ca\text{-}P_I$	$Ca\text{-}P_{II}$	Al-P	Fe-P	$Ca\text{-}P_{III}$	
Контроль (б/у)	0–20	44.0	32.0	238	48	92	788	1198
	20–40	39.0	28.0	233	46	97	783	1187
NK-фон	0–20	46.2	40.0	245	50	98	808	1241
	20–40	41.7	35.0	238	49	102	818	1247
NK + P_1 (одинарная доза)	0–20	55.9	94.0	279	58	98	846	1375
	20–40	47.1	82.0	272	62	94	853	1363
NK + $P_{1.5}$ (полуторная доза)	0–20	56.4	106.0	297	62	100	857	1422
	20–40	50.6	95.0	206	60	105	864	1410
NPK + 60 т навоза	0–20	58.6	102	285	61	99	852	1399
	20–40	41.7	95	272	62	102	859	1390

Если первые две фракции минеральных фосфатов ($Ca\text{-}P_I$ + $Ca\text{-}P_{II}$) играют важную роль в питании растений, и их динамика в течение вегетации сахарной свеклы может изменяться от весны до осени, то содержание и динамика высокоосновных ($Ca\text{-}P_{III}$) минеральных фосфатов остается в начале вегетации неизменной. Осенью (при определении к уборке свеклы) содержание высокоосновных ($Ca\text{-}P_{III}$) минеральных фосфатов может увеличиваться, что связано, по-видимому, с переходом легкорастворимых форм фосфора в труднорастворимые двух- и трехкальциевые соли, которые осаждаются в почве. Их количества всегда выше, чем первых двух фракций.

В светло-каштановой почве в севообороте на посевах сахарной свеклы в фазе 5–6 листьев количество высокоосновных фосфатов в верхнем (0–20 см) слое почвы увеличилось на удобренных вариантах от одинарных, полутоных и двойных норм фосфора до 821–835–846 мг/кг почвы соответственно. Эти показатели в контрольном и фоновом вариантах (NK) составили 785 и 795 мг/кг (табл. 4). В бессменных посевах эти показатели следующие: одинарная доза удобрений – 846 мг/кг, полуторная доза – 857 мг/кг почвы. В контрольном и фоновом (NK) вариантах – 788 и 808 мг/кг или 65.8 и 65.1% (табл. 5).

Таким образом, длительное и систематическое применение минеральных удобрений, в частности фосфорных, повышает содержание в почве валового фосфора. Определение фракционного состава минеральных фосфатов в севообороте и бессменных посевах сахарной свеклы показало, что содержание наиболее растворимых фракций фосфатов кальция ($Ca\text{-}P_I$ + $Ca\text{-}P_{II}$) и высокоосновных фракций фосфатов ($Ca\text{-}P_{III}$) увеличились от длительного и систематического применения одинарной, полуторной и двойной норм фосфорных удобрений. К моменту уборки урожая сахарной свеклы снижается содержание первых двух фракций, а содержание высокоосновных фракций кальция увеличивается, что объясняется тем, что первые фракции рыхлосвязанных и разноосновных форм фосфатов были использованы для создания биологического урожая и сухой биомассы. Увеличение же содержания высокоосновных форм минеральных фосфатов произошло за счет перехода легкорастворимых форм фосфора в труднодоступную форму.

Рост, развитие и продуктивность сахарной свеклы в зависимости от состава и форм фосфора органических соединений почвы

Уровень урожайности сельскохозяйственных культур является главным критерием оценки эффективности применения удобрений. Исследования, проведенные в течение длительного времени разными исследователями показывают, что продуктивность сельскохозяйственных культур, в частности сахарной свеклы, определяется параметрами почвенного плодородия, видами севооборота и условиями их минерального питания.

Результаты исследований показывают, что продуктивность сахарной свеклы как в севообороте, так и в бессменных посевах зависела от уровня фосфатного фонда почв.

Таблица 6. Влияние фосфатного фонда почвы на урожайность сахарной свеклы в севообороте (2018 г.)
Table 6. Influence of soil phosphate stock on sugar beet yield in crop rotation (2018)

Варианты опыта	Средняя урожайность, ц/га	Прибавка, ц/га
Контроль (б/у)	196.7	-
NK-фон	276.7	80.0
NK + P_1 (одинарная доза)	533.3	336.6
NK + $P_{1.5}$ (полуторная доза)	576.7	380.0
NK + P_2 (двойная доза)	562.3	365.6
NPK + 60 т навоза	613.7	417.0
$НСР_{0.5}$, ц/га P, %	35.3 4.6	

При выращивании сахарной свеклы в севообороте урожайность в контрольном варианте составила 196.7 ц/га, в фоновом варианте только с азотно-калийными удобрениями – 276.7 ц/га. От внесения одинарной дозы фосфорных удобрений P_{90} на фоне азотно-калийных урожайность корнеплодов сахарной свеклы возросла до 533.3 ц/га и обеспечила прибавку урожайности 336.6 ц/га. В варианте с полуторной дозой фосфорного удобрения в сочетании с

азотно-калийными удобрениями получена наибольшая (среди вариантов с минеральными удобрениями) урожайность корнеплодов сахарной свеклы – 576.7 ц/га, и прибавка составила 380.0 ц/га. При увеличении дозы фосфорного удобрения (двойная доза) урожайность составила 562.3 ц/га, а прибавка – 365.6 ц/га. Максимальная урожайность корней сахарной свеклы (613.7 ц/га), прибавка (417.0 ц/га) получена в варианте, где применялось полное минеральное удобрение с органическим – NPK + 60 т навоза (табл. 6).

Аналогичная закономерность по урожайности корнеплодов сахарной свеклы наблюдается при бессменном ее возделывании (табл. 7). Так, в контрольном варианте урожайность корнеплодов составила 310.7 ц/га, в фоновом варианте урожайность увеличивалась до 326.7 ц/га, и прибавка составила 16.0 ц/га. Улучшение условий фосфорного питания способствовало резкому увеличению урожайности корнеплодов до 503.3 и 575.7 ц/га, прибавки колебались в пределах 192.6–265.0 ц/га.

Таблица 7. Влияние фосфатного фонда почв на урожайность сахарной свеклы при бессменном ее возделывании (2018 г.)
Table 7. Influence of phosphate stock in soil on sugar beet yield when continuous cropping is used (2018)

Варианты опыта	**Средняя урожайность, ц/га**	**Прибавка, ц/га**
Контроль (б/у)	310.7	-
NK-фон	326.7	16.0
NK + P_1 (одинарная доза)	503.3	192.6
NK + $P_{1.5}$ (полуторная доза)	561.3	250.6
NPK + 60 т навоза	575.7	265.0
$НСР_{0,5}$, ц/га P, %	24.7 3.8	

Максимальные урожаи 561.3–575.7 ц/га корнеплодов сахарной свеклы обеспечило внесение полуторной дозы фосфорных удобрений на фоне NK и NPK + 60 т навоза, прибавка составила 250.6 и 265.0 ц/га (табл. 7).

Таким образом, максимальные урожаи корнеплодов сахарной свеклы порядка 560–570 ц/га как в севообороте, так и на бессменных посевах обеспечиваются при внесений полуторной дозы фосфорных удобрений на фоне NK (561.3–576.7 ц/га) и при применении органо-минеральной системы удобрения (575.7–613.7 ц/га). Совместное внесение полного минерального удобрения с навозом лишь незначительно превышает урожайность варианта NK + $P_{1.5}$, это свидетельствует о том, что минеральные удобрения эффективнее повышают урожайность сахарной свеклы, а при органо-минеральной системе удобрения питание растений фосфором частично обеспечивается органическими соединениями навоза.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. В различных типах почв предгорной зоны Илийского Алатау антропогенное воздействие в течение длительного времени привело к заметному снижению основного показателя плодородия – содержания гумуса: в горном черноземе – с 5.07% на целине до 3.34% в пашне; в темно-каштановой почве – с 3.11% на целине до 2.33% в пашне; в светло-каштановой почве – до 1.65% в пашне.
2. Наибольшее количество валового фосфора (2330 мг/кг) содержится в горном черноземе на целинном участке, и данный показатель снижается в условиях пашни (2050 мг/кг). В то время как в темно-каштановых почвах количество валового фосфора, наоборот, выше на пашне, используемой под овощные культуры (2130 мг/кг), чем в условиях целины (1720 мг/кг). Наименьшее количество валового фосфора в светло-каштановой почве на пашне (1880 мг/кг).
3. Большую часть общего количества потенциально доступного фосфора в исследуемых почвах составляет фосфор минеральных соединений (771–1145 мг/кг). Содержание минеральных форм фосфора в верхнем горизонте целинного горного чернозема составило 1004 мг/кг, на пашне – 1050 мг/кг, в целинной темно-каштановой почве – 998 мг/кг, на пашне – 983 мг/кг и на пашне в светло-каштановой почве – 1145 мг/кг соответственно. Содержание валового и органического фосфора с глубиной постепенно уменьшается.
4. Продуктивность сахарной свеклы в зависимости от приме-

нения фосфорных удобрений показало, что в условиях длительного применения удобрений (57 лет) наиболее эффективным является комплексное органо-минеральное питание. Наибольшая урожайность сахарной свеклы получена в варианте с внесением полного минерального удобрения совместно с навозом (NPK + 60 т навоза) и в варианте с внесением полуторной нормы фосфора на фоне применения азотно-калийных удобрений (NK + $P_{1,5}$), обеспечивающими в севообороте урожай корнеплодов 613.7 и 576,.7 ц/га соответственно, при их величине в контрольном варианте (без удобрений) – 196.7 ц/га, а в фоновом (NK) – 276.7 ц/га. При бессменном возделывании эти величины были соответственно 575.7 и 561.3 ц/га, 310.7ц/га, 326.7 ц/га.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Басибеков Б.С., Торшина О.Б.* Влияние длительного применения фосфорных удобрений на фосфатный режим светло-каштановой почвы и продкутивность культур свекловичного севооборота // Агрохимия. 1975. № 7. С. 22–27.
2. *Басибеков Б.С., Торшина О.Б.* Баланс фосфора в свекловичном севообороте на светло-каштановой почве Юго-Востока Казахстана // Агрохимия. 1978. № 8. С. 17–25.
3. *Басибеков Б.С., Торшина О.Б.* Баланс калия в свекловичном севообороте на светло-каштановой почве Юго-востока Казахстана // Агрохимия. 1981. № 10. С. 42–49.
4. *Бацула А.А., Кривоносова Г.М.* Фосфор в гуминовых кислотах фульвокислотах некоторых почв Украины // Агрохимия. 1973. № 6. С. 24–26.
5. *Бурангулова М.Н.* Фосфатный режим почв Башкирии: Автореф. дис. … докт. с.-х. наук. Воронеж, 1957. 38 с.
6. *Вильдфлуш И.Р.* Фракционный состав органических фосфатов длительно удобряемых дерново-подзолистых почв // Агрохимия. 1975. № 3. С. 36–40.
7. *Гриндель Н.М., Зырин Н.Г.* Метод определения и динамика органических соединений фосфора в пахотном горизонте малоокультуренной дерново-подзолистой почвы // Почвоведение. 1965. № 12. С. 17–27.
8. *Гринец Л.В.* Эффективность использования минеральных удобрений под зерновые культуры на черноземах обыкновенных северного

Казахстана в зависимости от их обеспеченности фосфором: Автореф. дис. … канд. с.-х. наук. Троицк, 2009. 18 с.
9. *Гринец Л.В., Сенькова Л.А., Карпухин М.Ю.* Влияние доз и сочетаний минеральных удобрений на урожайность зерновых культур и качество зерна на черноземах обыкновенных при разной обеспеченности их фосфором. Екатеринбург: Уральский Государственный Аграрный Университет, 2019. 106 с.
10. *Дмитриенко П.А.* Фосфатный режим почв УССР и его улучшение // Тр. Почв. ин-та им. В.В. Докучаева. 1957. Т. 30. С. 18–26.
11. *Дурасов А.М.* Черноземы Заилийского Алатау // Почвоведение. 1960. № 5. С. 11–19.
12. *Душечкин А.И.* Формы фосфора в почвах и отзывчивость почв на фосфатное удобрение // Удобрение и урожай. 1929. № 4. С. 195.
13. *Елешев Р.Е.* Эффективность различных форм фосфорных удобрений в условиях Казахстана // Справочник по применению удобрений. Алма-Ата: Кайнар, 1980. С. 80–83.
14. *Елешев Р.Е.* Фосфорные удобрения и урожай. Алма-Ата: Кайнар, 1984. 159 с.
15. *Елешев Р.Е., Есполов Е.И.* Урожайность сахарной свеклы при ленточном и разбросном внесении основного минерального удобрения // Вестник сельскохозяйственной науки Казахстана. 1982. № 3. С. 12–14.
16. *Елешев Р.Е., Иванов А.Л.* Фосфорный режим карбонатных почв юго-востока Казахстана и его изменение в связи с применением удобрений // Агрохимия. 1986. № 2. С. 25–29.
17. *Иванов А.Л.* Принципы интегрированного управления фосфорным режимом почв в агрофитоценозах Казахстана: Автореф. дис. … докт. биол. наук. Новосибирск, 1991. 38 с.
18. *Иванов А.Л., Елешев Р.Е.* Фосфатный режим почв Казахстана. Алма-Ата: Наука КазахССР, 1990. 160 с.
19. *Иванов А.Л., Елешев Р.Е.* Проблемы управления фосфорным режимом почв и пути повышения эффективности фосфорных удобрений в Казахстане. Алма-Ата: КазНИИНТИ, 1991. 50 с.
20. *Иванов А.Л., Сычев В.Г., Державин Л.М.* Агробиогеохимический цикл фосфора. М.: Типография Россельхозакадемии, 2012. 512 с.
21. *Касицкий Ю.И.* Об оптимальном уровне обеспеченности почв СССР подвижным фосфором // Агрохимия. 1979. № 3. С. 135–151.
22. *Козыбаева Ф.Е.* Запасы и групповой состав фосфатов в почвах предгорий и подгорных равнин Заилийского Алатау: Дис. … канд. с.-х. наук. Алма-Ата, 1974. 153 с.
23. *Кононова М.М.* Органическое вещество почвы, его природа, свойства и методы изучения. М.: АН СССР, 1963. 314 с.

24. *Кривоносова Г.М., Супруненко В.И.* Действие удобрений на содержание органических фосфатов в некоторых почвах Украины // Агрохимия. 1971. № 6. С. 27–30.
25. *Левенец П.П., Кривоносова Г.М.* Состав и содержание органических фосфатов в черноземах лесостепи УССР и их трансформация при внесении высоких доз минеральных удобрений // Агрохимия. 1974. № 7. С. 25–29.
26. *Макаров М.И.* Соединения фосфора в гумусовых кислотах почвы // Почвоведение. 1997. № 4. С. 458–466.
27. *Макаров М.И.* Фосфорсодержащие компоненты органического вещества почв: результаты спектроскопии ^{31}P ядерного магнитного резонанса // Почвоведение. 2005. № 2. С. 172–185.
28. *Макаров М.И. Леошкина Н.А.* Фосфор фульватной фракции органического вещества почвы // Почвоведение. 2009. № 3. С. 301–308.
29. *Макаров М.И., Малышева Т.И.* Фосфор в гумусовых кислотах // Почвоведение. 2006. № 11. С. 1342–1351.
30. *Макаров М.И., Малышева Т.И., Недбаев Н.П., Окунева Р.М.* Фосфор органических соединений в гранулометрических фракциях некоторых типов почв // Агрохимия. 1999. № 7. С. 24–32.
31. *Меренова В.И.* Об усвоении высшими растениями органических соединений фосфора // В сбор. “Меченые атомы в исследованиях питания растений и применения удобрений”. Труды совещания. М.: АН СССР, 1955.
32. *Минеев В.Г., Дебрецени Б., Мазур Т.* Биологическое земледелие и минеральное удобрения. М.: “Колос”, 1993. 415 с.
33. *Могханм Ф.С., Рахимгалиева С.Ж., Донских И.Н.* Содержание и запасы фосфора и его подвижных соединений в пахотных темно-каштановых почвах на богаре и при длительном орошении в условиях Западного Казахстана // Известия Санкт-Петербургского Государственного Аграрного Университета. 2011. № 23. С. 79–82.
34. *Носко Б.С.* Регулирование фосфатного режима основных типов почв УССР // Агрохимия. 1983. № 10. С. 32–40.
35. *Носко Б.С.* Поглощение фосфора растениями из почв с различным фосфатным уровнем // Агрохимия. 1985. № 7. С. 26–31.
36. *Османьян Р.Г.* Эколого-биогеохимическое состояние орошаемых почв южного Казахстана // Экологическая безопасность в АПК. Реферативный журнал. 2009. № 1. С. 127.
37. Отчет о деятельности РГУ “Республиканский научно-методический центр агрохимической службы”. МСХ РК, п. Научный, 2016.
38. *Пономарева А.Т.* Фосфатный режим почв и фосфорные удобрения. Алма-Ата: “Кайнар”, 1970. 202 с.

39. *Пономарева А.Т.* Баланс питательных веществ в земледелии Казахстана и улучшение почвенного плодородия в связи с применением удобрений // Повышение продуктивности почв Казахстана. Алма-Ата: Наука, 1980. С. 11–20.
40. *Пономарева А.Т.* Продуктивность кормовых культур в зависимости от обеспеченности лугово-каштановой почвы фосфором, применение удобрений и баланса питательных веществ // Труды КазСХИ. 1989. С. 24–47.
41. *Пономарева Л.М.* Изменение химических и физико-химических свойств темно-серой оподзоленной почвы Левобережной северной лесостепи Украины под влиянием сельскохозяйственной культуры: Автореф. дис. … канд. с.-х. наук. Харьков, 1971. 21 с.
42. *Ратнер Е.И., Самойлова С.А.* Усвоение растениями органических соединений ортофосфорной кислоты в связи с внеклеточной фосфатазной активностью корней // Физиология растений. 1955. Т. 2. Вып. 6. С. 518–528.
43. *Рахимгалиева С.Ж., Худякова В.М.* Содержание и запасы фосфора в темно-каштановых почвах Западного Казахстана при различном их использовании // Известия Санкт-Петербургского Государственного Аграрного Университета. 2010. № 18. С. 64–68.
44. *Синягин И.И.* Превращения фосфорных и калийных удобрений в почве и повышение их усвояемости. Москва, 1968. С. 72–82.
45. *Сущеница Б.А.* Приемы эффективного использования удобрений в хлопково люцерновом севообороте. Обзор. Душанбе, 1978. 47 с.
46. *Умбетов А.К., Кежембаева Ж.К., Мамбетов К.Б.* Влияние удобрений на динамику нитратов и подвижного фосфора при минимализации обработки светло-каштановой почвы и продуктивность зерновых культур в условиях богары юго-востока Казахстана // Вестник Кыргызского Национального Аграрного Университета им. К.И. Скрябина. 2016. № 4(40). С. 145–149.
47. *Фокин А.Д., Синха М.К.* Связывание фосфата гумусовыми веществами почвы // Известия ТСХА. 1969. Вып. 4. С. 175–185.
48. *Хейфец Д.М.* Методика определения и содержание минеральных и органических соединений фосфора в некоторых почвах Советского Союза // Почвоведение. 1948. № 2. С. 100–112.
49. *Чиркова Р.А., Козыбаева Ф.А.* Запасы и групповой состав фосфатов в интразональных почвах подгорных равнин Заилийского Алатау // Агрохимия. 1978. № 2. С. 48–54.
50. *Чиркова Р.А., Козыбаева Ф.Е.* Запасы, групповой состав и доступность растениям фосфатов в почвах // Вестник с.-х. науки Казахстана. Алма-Ата, 1978. № 3. 48 с.

51. *Чиркова Р.А., Козыбаева Ф.Е.* Фосфор в почвах предгорных и подгорных равнин Заилийского Алатау // Повышение продуктивности почв Казахстана. Алма-Ата, “Наука”, 1980. 122 с.
52. *Чумаченко И.Н.* Фракционный состав фосфатов в почвах орошаемых районов Средней Азии // Агрохимия. 1969. № 7. С. 40–43.

REFERENCES

1. Basibekov B.S., Torshina O.B., Vliyanie dlitel'nogo primeneniya fosfornykh udobrenii na fosfatnyi rezhim svetlo-kashtanovoi pochvy i prodkutivnost' kul'tur sveklovichnogo sevooborota (The effect of long-term use of phosphorus fertilizers on the phosphate regime of kastanozems and the productivity of beet crop rotation), *Agrokhimiya*, 1975, No. 7, pp. 22–27.
2. Basibekov B.S., Torshina O.B., Balans fosfora v sveklovichnom sevooborote na svetlo-kashtanovoi pochve Yugo-Vostoka Kazakhstana (Phosphorus balance in beet crop rotation on kastanozems in the South-East of Kazakhstan), *Agrokhimiya*, 1978, No. 8, pp. 17–25.
3. Basibekov B.S., Torshina O.B., Balans kaliya v sveklovichnom sevooborote na svetlo-kashtanovoi pochve Yugo-vostoka Kazakhstana (Potassium balance in beet rotation on kastanozems in southeast Kazakhstan), *Agrokhimiya*, 1981, No. 10, pp. 42–49.
4. Batsula A.A., Krivonosova G.M., Fosfor v guminovykh kislotakh i ful'vokislotakh nekotorykh pochv Ukrainy (Phosphorus in humic acids and fulvic acids of some soils of Ukraine), *Agrokhimiya*, 1973, No. 6, pp. 24–26.
5. Burangulova M.N., *Fosfatnyi rezhim pochv Bashkirii: Diss. ... dokt. s.-kh. nauk* (Phosphate regime of soils in Bashkiria, Dr. agric. sci. thesis), Voronezh, 1957, 38 p.
6. Vil'dflush I.R., Fraktsionnyi sostav organicheskikh fosfatov dlitel'no udobryaemykh dernovo-podzolistykh pochv (Fractional composition of organic phosphates of long-fertilized podzols), *Agrokhimiya*, 1975, No. 3, pp. 36–40.
7. Grindel' N.M., Zyrin N.G., Metod opredeleniya i dinamika organicheskikh soedinenii fosfora v pakhotnom gorizonte malookul'turennoi dernovo-podzolistoi pochvy (Method for determination and dynamics of organic phosphorus compounds in the arable horizon of a poorly cultivated podzols), *Pochvovedenie*, 1965, No. 12, pp. 17–27.
8. Grinets L.V., *Effektivnost' ispol'zovaniya mineral'nykh udobrenii pod zernovye kul'tury na chernozemakh obyknovennykh severnogo Kazakhstana v zavisimosti ot ikh obespechennosti fosforom: Avtoref. dis. ... kand. s.-kh. nauk* (Efficiency of using mineral fertilizers for grain crops on ordinary chernozems

of northern Kazakhstan, depending on their availability of phosphorus, Extended abstract of cand. agric. sci. thesis), Troitsk, 2009, 18 p.
9. Grinets L.V., Sen'kova L.A., Karpukhin M.Yu., *Vliyanie doz i sochetanii mineral'nykh udobrenii na urozhainost' zernovykh kul'tur i kachestvo zerna na chernozemakh obyknovennykh pri raznoi obespechennosti ikh fosforom* (The effect of doses and combinations of mineral fertilizers on the yield of grain crops and the quality of grain on ordinary chernozems with different levels of phosphorus supply), Ekaterinburg: Ural'skii Gosudarstvennyi Agrarnyi Universitet, 2019, 106 p.
10. Dmitrienko P.A., Fosfatnyi rezhim pochv USSR i ego uluchshenie (Phosphate soil regime of the Ukrainian SSR and its improvement), *Tr. Pochv. in-ta im. V.V. Dokuchaeva*, 1957, Vol. 30, pp. 18–26.
11. Durasov A.M., Chernozemy Zailiiskogo Alatau (Chernozems of Zailiysky Alatau), *Pochvovedenie*, 1960, No. 5, pp. 11–19.
12. Dushechkin A.I., Formy fosfora v pochvakh i otzyvchivost' pochv na fosfatnoe udobrenie (Forms of phosphorus in soils and soil responsiveness to phosphate fertilizer), *Udobrenie i urozhai*, 1929, No. 4, pp. 195.
13. Eleshev R.E., Effektivnost' razlichnykh form fosfornykh udobrenii v usloviyakh Kazakhstana (The effectiveness of various forms of phosphate fertilizers in Kazakhstan), *Spravochnik po primeneniyu udobrenii*, Alma-Ata: Kainar, 1980, pp. 80–83.
14. Eleshev R.E., Fosfornye udobreniya i urozhai (Phosphate fertilizers and crop), Alma-Ata: Kainar, 1984, 159 p.
15. Eleshev R.E., Espolov E.I., Urozhainost' sakharnoi svekly pri lentochnom i razbrosnom vnesenii osnovnogo mineral'nogo udobreniya (Productivity of sugar beet at tape and scatter application of the main mineral fertilizer), *Vestnik sel'skokhozyaistvennoi nauki Kazakhstana*, 1982, No. 3, pp. 12–14.
16. Eleshev R.E., Ivanov A.L., Fosfornyi rezhim karbonatnykh pochv yugo-vostoka Kazakhstana i ego izmenenie v svyazi s primeneniem udobrenii (Phosphorus regime of carbonate soils in the south-east of Kazakhstan and its change due to the use of fertilizers), *Agrokhimiya*, 1986, Vol. 2, pp. 25–29.
17. Ivanov A.L., *Principy integrirovannogo upravlenija fosfornym rezhimom pochv v agrofitocenozah Kazahstana Aftoref. diss. ... dokt. biol. nauk* (Principles of integrated management of soil phosphorus regime in agrophytocenoses of Kazakhstan, Extended abstract of Dr. agric. sci. thesis), Novosibirsk, 1991, 38 p.
18. Ivanov A.L., Eleshev R.E., *Fosfatnyj rezhim pochv Kazahstana* (Phosphate soil regime of Kazakhstan), Alma-Ata: Nauka KazahSSR, 1990, 160 p.
19. Ivanov A.L., Eleshev R.E., *Problemy upravlenija fosfornym rezhimom pochv i puti povyshenija jeffektivnosti fosfornyh udobrenij v Kazahstane* (Problems of managing the phosphorus regime of soils and ways to improve

the efficiency of phosphorus fertilizers in Kazakhstan), Alma-Ata: KazNIINTI, 1991, 50 p.
20. Ivanov A.L., Sychev V.G., Derzhavin L.M., Agrobiogeohimicheskij cikl fosfora (Agrobiogeochemical cycle of phosphorus), Moscow: Tipografija Rossel'hozakademii, 2012, 512 p.
21. Kasitskii Yu.I., Ob optimal'nom urovne obespechennosti pochv SSSR podvizhnym fosforom (On the optimal level of the supply of soils of the USSR with mobile phosphorus), *Agrokhimiya*, 1979, No. 3, pp. 135–151.
22. Kozybaeva F.E., *Zapasy i gruppovoi sostav fosfatov v pochvakh predgorii i podgornykh ravnin Zailiiskogo Alatau: Dis… kand. geogr. nauk* (Reserves and group composition of phosphates in the soils of foothills and piedmont plains of Zailiysky Alatau, Cand. agric. sci. thesis), Alma-Ata, 1974, 153 p.
23. Kononova M.M., *Organicheskoe veshchestvo pochvy, ego priroda, svoistva i metody izucheniya* (Organic matter of the soil, its nature, properties and methods of study), Moscow: AN SSSR, 1963, 314 p.
24. Krivonosova G.M., Suprunenko V.I., Deistvie udobrenii na soderzhanie organicheskikh fosfatov v nekotorykh pochvakh Ukrainy (The effect of fertilizers on the content of organic phosphates in some soils of Ukraine), *Agrokhimiya*, 1971, No. 6, pp. 27–30.
25. Levenets P.P., Krivonosova G.M., Sostav i soderzhanie organicheskikh fosfatov v chernozemakh lesostepi USSR i ikh transformatsiya pri vnesenii vysokikh doz mineral'nykh udobrenii (The composition and content of organic phosphates in the chernozems of the forest-steppe of the Ukrainian SSR and their transformation with the introduction of high doses of mineral fertilizers), *Agrokhimiya*, 1974, No. 7, pp. 25–29.
26. Makarov M.I., Soedineniya fosfora v gumusovykh kislotakh pochvy (Phosphorus compounds in soil humic acids), *Pochvovedenie*, 1997, No. 4, pp. 458–466.
27. Makarov M.I., Fosforsoderzhashchie komponenty organicheskogo veshchestva pochv: rezul'taty spektroskopii 31R yadernogo magnitnogo rezonanca (Phosphorus-containing components of soil organic matter: results of 31P nuclear magnetic resonance spectroscopy), *Pochvovedenie*, 2005, No. 2, pp. 172–185.
28. Makarov M.I., Leoshkina N.A., Fosfor ful'vatnoi fraktsii organicheskogo veshchestva pochvy (Phosphorus fulvate fraction of soil organic matter), *Pochvovedenie*, 2009, No. 3, pp. 301–308.
29. Makarov M.I., Malysheva T.I., Fosfor v gumusovykh kislotakh (Phosphorus in humic acids), *Pochvovedenie*, 2006, No. 11, pp. 1342–1351.
30. Makarov M.I., Malysheva T.I., Nedbaev N.P., Okuneva R.M., Fosfor organicheskikh soedinenii v granulometricheskikh fraktsiyakh nekotorykh

tipov pochv (Phosphorus of organic compounds in granulometric fractions of some soil types), *Agrokhimiya*, 1999, No. 7, pp. 24–32.
31. Merenova V.I., *Ob usvoenii vysshimi rasteniyami organicheskikh soedinenii fosfora* (On the assimilation by higher plants of organic phosphorus compounds), "Mechenye atomy v issledovaniyakh pitaniya rastenii i primeneniya udobrenii", Moscow: AN SSSR, 1955, 212 p.
32. Mineev V.G., Debretseni B., Mazur T., *Biologicheskoe zemledelie i mineral'noe udobreniya* (Biological Farming and Mineral Fertilizers), Moscow: "Kolos", 1993, 415 p.
33. Mogkhanm F.S., Rakhimgalieva S.Zh., Donskikh I.N., Soderzhanie i zapasy fosfora i ego podvizhnykh soedinenii v pakhotnykh temno-kashtanovykh pochvakh na bogare i pri dlitel'nom oroshenii v usloviyakh Zapadnogo Kazakhstana (The content and reserves of phosphorus and its mobile compounds in arable kashtanozems on drylands and with prolonged irrigation in the conditions of Western Kazakhstan), *Izvestiya Sankt-Peterburgskogo Gosudarstvennogo Agrarnogo Universiteta*, 2011, No. 23, pp.79–82.
34. Nosko B.S., Regulirovanie fosfatnogo rezhima osnovnykh tipov pochv USSR (Regulation of the phosphate regime of the main soil types of the Ukrainian SSR), *Agrokhimiya*, 1983, No. 10, pp. 32–40.
35. Nosko B.S., Pogloshchenie fosfora rasteniyami iz pochv s razlichnym fosfatnym urovnem (Phosphorus absorption by plants from soils with different phosphate levels), *Agrokhimiya*, 1985, No. 7, pp. 26–31.
36. Osman'jan R.G., Jekologo-biogeohimicheskoe sostojanie oroshaemyh pochv juzhnogo Kazahstana (Ecological and biogeochemical condition of irrigated soils of southern Kazakhstan), *Jekologicheskaja bezopasnost' v APK, Referativnyj zhurnal*, 2009, No. 1, p. 127.
37. *Otchet o deyatel'nosti RGU "Respublikanskii nauchno-metodicheskii tsentr agrokhimicheskoi sluzhby"* (Report on the activities of the RSU "Republican Scientific and Methodological Center of the Agrochemical Service"), Nauchnyi: MSKh RK, 2016, 110 p.
38. Ponomareva A.T., *Fosfatnyi rezhim pochv i fosfornye udobreniya* (Phosphate regime of soils and phosphate fertilizers), Alma-Ata: "Kainar", 1970, 202 p.
39. Ponomareva A.T., *Balans pitatel'nykh veshchestv v zemledelii Kazakhstana i uluchshenie pochvennogo plodorodiya v svyazi s primeneniem udobrenii* (The balance of nutrients in agriculture in Kazakhstan and the improvement of soil fertility in connection with the use of fertilizers), Povyshenie produktivnosti pochv Kazakhstana, Alma-Ata: Nauka, 1980, 156 p.

40. Ponomareva A.T., *Produktivnost' kormovykh kul'tur v zavisimosti ot obespechennosti lugovo-kashtanovoi pochvy fosforom, primenenie udobrenii i balansa pitatel'nykh veshchestv* (The productivity of fodder crops, depending on the availability of phosphorus in kastanozems, the use of fertilizers and nutrient balance), 1989, 110 p.
41. Ponomareva L.M., *Izmenenie khimicheskikh i fiziko-khimicheskikh svoistv temno-seroi opodzolennoi pochvy Levoberezhnoi severnoi lesostepi Ukrainy pod vliyaniem sel'skokhozyaistvennoi kul'tury: Avtoref. dis. … kand. s.-kh. nauk.* (Changes in the chemical and physico-chemical properties of the dark gray podzolized soil of the Left-bank northern forest-steppe of Ukraine under the influence of agricultural crops, Extended abstract of cand. agricul. sci. thesis), Khar'kov, 1971, 21 p.
42. Ratner E.I., Samoilova S.A., Usvoenie rasteniyami organicheskikh soedinenii ortofosfornoi kisloty v svyazi s vnekletochnoi fosfataznoi aktivnost'yu kornei (Assimilation by plants of organic compounds of phosphoric acid in connection with extracellular phosphatase activity of roots), *Fiziologiya rastenii*, 1955, Vol. 2, No. 6, pp. 518–528.
43. Rakhimgalieva S.Zh., Khudyakova V.M., Soderzhanie i zapasy fosfora v temno-kashtanovykh pochvakh Zapadnogo Kazakhstana pri razlichnom ikh ispol'zovanii (The content and reserves of phosphorus in the kashtanozems of Western Kazakhstan with their various uses), *Izvestiya Sankt-Peterburgskogo Gosudarstvennogo Agrarnogo Universiteta*, 2010, No. 18, pp. 64–68.
44. Sinyagin I.I., *Prevrashcheniya fosfornykh i kaliinykh udobrenii v pochve i povyshenie ikh usvoyaemosti* (Transformation of phosphorus and potassium fertilizers in the soil and increase their digestibility), Moscow, 1968, pp. 72–82.
45. Sushchenitsa B.A., *Priemy effektivnogo ispol'zovaniya udobrenii v khlopkovo lyutsernovom sevooborote* (Techniques for the efficient use of fertilizers in cotton alfalfa crop rotation), Dushanbe, 1978, 47 p.
46. Umbetov A.K., Kezhembaeva Zh.K., Mambetov K.B., Vliyanie udobrenii na dinamiku nitratov i podvizhnogo fosfora pri minimalizatsii obrabotki svetlo-kashtanovoi pochvy i produktivnost' zernovykh kul'tur v usloviyakh bogary yugo-vostoka Kazakhstana (The effect of fertilizers on the dynamics of nitrates and mobile phosphorus while minimizing the processing of kastanozems and the productivity of crops in the conditions of rainfed southeast Kazakhstan), *Vestnik Kyrgyzskogo Natsional'nogo Agrarnogo Universiteta im. K.I. Skryabina*, 2016, No. 4(40), pp. 145–149.
47. Fokin A.D., Sinkha M.K., Svyazyvanie fosfata gumusovymi veshchestvami pochvy (Phosphate binding to soil humic substances), *Izvestiya TSKhA*, 1969, No. 4, pp. 175–185.

48. Kheifets D.M., Metodika opredeleniya i soderzhanie mineral'nykh i organicheskikh soedinenii fosfora v nekotorykh pochvakh Sovetskogo Soyuza (Methodology for determination and content of mineral and organic phosphorus compounds in some soils of the Soviet Union), *Pochvovedenie*, 1948, No. 2, pp. 100–112.
49. Chirkova R.A., Kozybaeva F.A., Zapasy i gruppovoi sostav fosfatov v intrazonal'nykh pochvakh podgornykh ravnin Zailiiskogo Alatau (Reserves and group composition of phosphates in the intrazonal soils of piedmont plains of Zailiysky Alatau), *Agrokhimiya,* 1978, No. 2, pp. 48–54.
50. Chirkova R.A., Kozybaeva F.E., Zapasy, gruppovoi sostav i dostupnost' rasteniyam fosfatov v pochvakh (Reserves, group composition and availability to plants of phosphates in soils), *Vestnik s.-kh. nauki Kazakhstana*, 1978, No. 3, pp. 42–48.
51. Chirkova R.A., Kozybaeva F.E., *Fosfor v pochvakh predgornykh i podgornykh ravnin Zailiiskogo Alatau* (Phosphorus in the soils of foothill and foothill plains of Zailiysky Alatau), Povyshenie produktivnosti pochv Kazakhstana, Alma-Ata: “Nauka”, 1980, 122 p.
52. Chumachenko I.N., Fraktsionnyi sostav fosfatov v pochvakh oroshaemykh raionov Srednei Azii (Fractional composition of phosphates in soils of irrigated areas of Central Asia), *Agrokhimiya,* 1969, No. 7, pp. 40–43.

УДК 631.4
DOI: 10.19047/0136-1694-2020-101-159-181

Ссылки для цитирования:
Чурилин Н.А., Лебедева М.П., Варламов Е.Б. Сравнительный анализ минералогического состава ила лугово-каштановой почвы и солонца на территории с невыраженным микрорельефом в северо-западной части Прикаспийской низменности // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2020. Вып. 101. С. 159-181. DOI: 10.19047/0136-1694-2020-101-159-181

Cite this article as:
Churilin N.A., Lebedeva M.P., Varlamov E.B., Mineralogical comparative analysis of the clay fraction of solonetz and chestnut soil without apparent microrelief in the north-western part of the Caspian lowland, Dokuchaev Soil Bulletin, 2020, V. 101, pp. 159-181, DOI: 10.19047/0136-1694-2020-101-159-181

Сравнительный анализ минералогического состава ила лугово-каштановой почвы и солонца на территории с невыраженным микрорельефом в северо-западной части Прикаспийской низменности

© 2020 г. Н. А. Чурилин*, М. П. Лебедева, Е. Б. Варламов

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

Поступила в редакцию 03.12.2019, *после доработки* 18.02.2020,
принята к публикации 03.04.2020

Резюме: Проведен сравнительный анализ минералогического состава фракции ила (< 1 мкм) целинных почв (лугово-каштановой почвы и солонца). Почвы изучены на наиболее древней подсыртовой части севрозападной части Прикаспийской низменности на участке с невыраженным микрорельефом (микрозападины глубиной не более 5–10 см), но с контрастным почвенным покровом. Содержание илистой фракции в лугово-каштановой почве варьирует от 25.6 до 33.9%, в солонце – от 11.7 до 51.6%. Во всех горизонтах сравниваемых почв, за исключением поверхностных (гор. SEL – AU1), преобладают смешанослойные минералы (39–52% во фракции) над иллитом (27–37% во фракции). В

поверхностных горизонтах наблюдается преобладание иллита (48%) над смешанослойными минералами (35%). Сравниваемые почвы имеют определенные черты сходства по кристаллохимическому состоянию: несовершенство структуры каолинита и супердисперсное состояние смешанослойной фазы в самых поверхностных горизонтах, а также появление индивидуального смектита и хлоритовых пакетов в смешанослойной фазе в нижних горизонтах (BC, C). Степень совершенства структуры каолинита как в солонце, так и в лугово-каштановой почве возрастает вниз по профилю. Полученные данные позволяют предполагать, что в лугово-каштановой почве глинистая фаза сохранила следы солонцового этапа развития.

Ключевые слова: лугово-каштановые почвы, солонцы, минералогический состав, сухостепные комплексы, Прикаспийская низменность.

Mineralogical comparative analysis of the clay fraction of solonetz and chestnut soil without apparent microrelief in the north-western part of the Caspian lowland

N. A. Churilin*, M. P. Lebedeva, E. B. Varlamov

V.V. Dokuchaev Soil Science Institute,
7 Bld. 2 Pyzhevskiy per., Moscow 2119017, Russian Federation,
e-mail: nikitachur@ya.ru.

Received 03.12.2019, *Revised* 18.02.2020, *Accepted* 04.03.2020

Abstract: A comparative analysis of the mineralogical composition of the clay fraction (< 1 μm) of chestnut soil and solonetz has been performed in the article. Soils were studied in the oldest part of the Caspian lowland in north-west where the microrelief is not quite apparent (microdepressions no more than 5–10 cm depth), but with a contrast soil cover. The content of silt fraction in chestnut soil varies from 25.6 to 33.9%, in the solonetz – from 11.7 to 51.6%. In all horizons of the compared soils, except for the upper surface horizons (SEL, AU1), mixed-layered minerals dominate (39–52% in the fraction) over illite (27–37% in the fraction). In the surface horizons illite (48%) dominates over mixed-layer minerals (35%). The compared soils have some similarities in their crystal-chemical state: the imperfection of the kaolinite structure and the superdispersed state of the mixed-layer phase in the upper horizons, as well as the appearance of individual smectite and chlorite packets in the mixed-layer phase in the lower horizons (BC, C). The degree of

perfection of the kaolinite structure both in the solonetz and in the meadow-chestnut soil increases towards the bottom of the profiles. The obtained data allow suggesting that in the meadow-chestnut soil the clay phase retained traces of the solonetzic stage of soil formation.

Keywords: chestnut soils, solonetz, mineralogical composition, dry steppe complexes, Caspian lowland.

ВВЕДЕНИЕ

Лугово-каштановые почвы, являясь обязательным компонентом солонцовых комплексов северной части Прикаспийской низменности, отличаются от солонцов морфологическими свойствами горизонтов, хотя расположены обычно эти почвы на расстоянии первых десятков метров.

Минералогический состав лугово-каштановых и каштановых почв, как компонентов солонцового комплекса сухостепной зоны, описан в большом количестве работ (Корнблюм и др., 1972; Травникова, 1973; Соколова, Григорьева, 1989). При этом в илистой фракции солонца в поверхностном горизонте, по сравнению с материнской породой, содержание иллита выше, чем содержание смешанослойных образований (Корнблюм и др., 1972).

Известно, что Прикаспийская низменность отличается комплексным почвенным покровом. Так Е.Н. Иванова и В.М. Фридланд выделяли около 100 вариантов комплексов, различающихся составом почв и соотношением компонентов при разном уровне грунтовых вод. В большинстве работ были изучены почвы солонцового комплекса с выраженным микрорельефом, где солонцы приурочены к повышениям микрорельефа, а лугово-каштановые занимают микропонижения (Травникова, 1973). Интересной особенностью минералогического состава одного из разрезаов лугово-каштановой почвы Джаныбекского стационара Института лесоведения РАН является преобладание иллита на всю глубину профиля, за исключением только лишь одного горизонта ВЗСа (более 100 см) (Борзенко и др., 2003). Исследования минералогического состава лугово-каштановых почв и сравнение их с солонцами на территории с невыраженным микрорельефом ранее не проводились. Особенности распределения минералов по профилю лугово-каштановой почвы сравнивались с минералогиче-

ским составом солонца на том же самом ключевом участке, который подробно был охарактеризован нами ранее (Варламов и др, 2018).

Цель – изучить минералогический состав ила (< 1 мкм) лугово-каштановой почвы и провести его сравнение с минералогическим составом солонца на участке с невыраженным микрорельефом, но с контрастным почвенным покровом.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Сравниваемые почвы расположены в наиболее древней подсыртовой части Прикаспийской низменности на абсолютных высотах около 42–44 м над ур. м., примыкающей к раннехвалынской морской террасе, ограниченной высотой около 50 м над ур. м. (примерно в 5 км на восток от села Борси Западно-Казахстанской области Республики Казахстан; 50.108°N, 47.496°E). Согласно геоморфологическому районированию, эта территория относится к Урдинско-Торгунской повышенной плоской равнине, расположенной в северной части Прикаспийской низменности.

Особенностью изучаемой территории (далее будем называть ключ Борси) является слабая выраженность микрорельефа (микрозападины глубиной 5–10 см) при сильноконтрастном почвенном покрове (Конюшкова, Абатуров, 2016). Разрезы солонцового комплекса расположены на расстоянии 13 м друг от друга. Подробное морфологическое описание сравниваемого коркового солонца представлено в предыдущей нашей работе (Варламов и др., 2018).

Разрез лугово-каштановой почвы (ЗК-1) заложен под целинной растительностью – разнотравно-типчаково-ковыльной со спиреей (в микропонижении глубиной 5 см). Местами на поверхности отмечен тонкий моховой покров. ПП – 80% из-за наличия зоогенной перерытости. Вскипание с 46 см. При бурении до глубины 5 м зеркала грунтовой воды не обнаружено.

Морфологические особенности разреза ЗК-1 (индексы горизонтов, согласно их свойствам, даны по Полевому определителю почв (2008)**:**

AU1 (0–25 см) – темно-серый (10YR3/2), неоднородный по цвету, на правой стенке видны пятна с нечеткими границами из бурого материала, свежий, комковато-порошистый, с большим

количеством корней, книзу структура становится зернистой, уплотненный в зонах, где мало корней, тяжелосуглинистый, переход заметный по цвету и структуре.

AU2 (25–34 см) – серовато-бурый (7.5YR4/2), с многочисленными кротовинами с темно-серым материалом, свежий ореховато-зернистый, разваливается на мелкие орешки, довольно много корней, уплотненный, легкоглинистый, переход постепенный по уменьшению сероватого оттенка.

BMK (34–46 см) – бурый (7.5YR4/3), призмовидно-мелкоореховатый, влажноватый, по граням структурных отдельностей войлок из тонких белых корней, легкоглинистый, гумусовые тонкие кутаны-лаки, переход заметный по вскипанию.

BM (46–60 см) – палево-бурый (7.5YR4/4), мелкоореховатый, влажный, много корней, обилие разных по размеру кротовин с темно-серым материалом, легкоглинистый, по магистральным трещинам и граням структурных отдельностей темные гумусовые затеки, переход заметный по появлению рыхлой белоглазки.

BCAnc,q (60–100 см) – палевый, мелкоореховатый, влажный, довольно много корней, обилие мелкой (с диаметром до 1 см) рыхлой из-за влажности белоглазки, имеющей вертикальную ориентацию, много Mn–Fe-примазок и мелких конкреций (2–0.5 мм), тяжелосуглинистый, очень плотный, переход заметный по исчезновению белоглазки.

BC/Cq (100–150 см) – горохово-бурый, свежий, очень рыхлый, сыпучий, с мелкими плоскими призмами длиной до 1–2 мм тяжело-суглинистый, с отдельными палевыми карбонатными пятнами.

Изученную почву невозможно отнести к определенному типу по Полевому определителю почв России (2008). По субстантивным свойствам ее можно было бы отнести к темно-каштановой квазиглееватой, но такого типа почв пока нет. Поэтому в данной статье мы будем ее называть лугово-каштановой (по “Классификации и диагностике почв СССР”, 1977). Как известно, профиль лугово-каштановых почв формируется другими элементарными почвообразовательными процессами (ЭПП) – промывным водным режимом с выщелачиванием как легкорастворимых солей, так и карбонатов, гипса и активным гумусово-аккумулятивным процес-

сом, что связано с их современным (или былым) расположением в микропонижении под разнотравно-злаковой растительностью в напочвенном покрове (Роде, Польский, 1961).

Изучен состав глинистых минералов во фракции ила (< 1 мкм). Фракционное разделение образцов проведено по методике Горбунова (1963) путем последовательного отмучивания. Карбонаты, легкорастворимые соли и аморфные вещества перед фракционированием удалялись. Минералогический состав исследовали с помощью универсального рентгендифрактометра HZG-4a. Режим сьемки: излучение – Cu, напряжение на трубке – 30кВ, сила тока – 20мА. угловая скорость движения счетчика 2θ град/мин. Расчеты производили с применением программного обеспечения дифрактометр-авто версия 2014, разработчик ООО "Ирис". Съемка ориентированных препаратов, насыщенных магнием выполнена для фракции < 1 мкм в трех состояниях образца: воздушно-сухом, сольватированном этиленгликолем, после прокаливания в течение двух часов при температуре 550 °С с целью уточнения особенностей кристаллохимического строения лабильных минералов. Качественный состав минералов установлен по известным рекомендациям (Рентгеновские методы и структура…, 1965; Градусов, 1967; Соколова и др., 2005). Соотношение основных минеральных фаз глинистой фракции рассчитано полуколичесвенно по стандартной методике (Biscaye, 1965).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Содержание илистой фракции, выделенной из горизонтов лугово-каштановой почвы, варьирует от 25.6 до 33.9%. Наибольшее ее содержание отмечено в горизонте AJ2 на глубине 25–34 см, а наименьшее – в горизонте BC на глубине 100–120 см. Характер распределения фракции – неравномерный, но в верхних 34 см отмечается более высокое содержание ила по сравнению с нижележащими горизонтами, что позволяет говорить о слабом аккумулятивном характере распределения ила со слабым варьированием по профилю (табл. 1, рис. 6), но в пределах гумусовых горизонтах – о слабом обеднении илом поверхностного горизонта.

Таблица 1. Соотношение основных минеральных фаз во фракции ила (< 1 мкм)
Table 1. Ratio of basic mineral phases in silt fraction (< 1 micron)

Горизонт	Глубина, см	Фракция < 1 мкм, %	Фракция < 1мкм, %				Почва в целом, %			
			СМ	И	Х	Кл	СМ	И	Х	Кл
Лугово-каштановая (раз. ЗК-1)										
AU1	0–25	31.3	35	48	4	13	10.8	15.1	1.4	4.0
AU2	25–34	33.9	39	37	6	17	13.4	12.6	2.2	5.7
BMK	34–46	27.0	39	33	10	18	10.6	8.9	2.6	4.9
BM	46–60	30.7	44	30	6	20	13.4	9.2	1.9	6.2
BCAnc,q	60–100	27.6	49	28	7	16	13.4	7.7	2.0	4.5
BC	100–120	25.6	50	27	7	16	12.8	7.0	1.7	4.1
C	120–150	29.5	47	30	7	16	13.9	8.8	1.9	4.8
Солонец (раз. ЗК-2) (Варламов и др., 2018)										
SEL	0–5	11.7	23	52	6	20	2.6	6.1	0.7	2.3
BSN1	5–16	39.7	52	30	5	14	20.6	11.8	1.8	5.5
BSN2	16–26	51.6	46	33	3	18	23.7	17.0	1.4	9.4
BSN3s	26–35	28.3	41	35	5	19	11.7	9.9	1.3	5.4
BCA s.cs	35–45	25.7	37	37	6	20	9.6	9.6	1.4	5.1
BCAnc	45–60	27.9	42	31	5	19	14.1	10.1	2.0	6.3
Cca.s	110–130	32.5	42	30	6	23	11.7	8.3	1.5	6.4

Примечание. СМ – смешанослойная; И – иллит; Х – хлорит; Кл – каолинит.

Илистая фракция лугово-каштановой почвы представлена следующими минеральными фазами: иллитом, смешанослойной фазой, каолинитом и хлоритом. В толще с гумусовыми горизонтами (гор. AU 0–34 см) содержание иллита больше, чем смешано-

слойных минералов, особенно в самой верхней части гумусового горизонта (0–25 см). Ниже до конца профиля наблюдается преобладание смешанослойных минералов над иллитом. Содержание хлорита в данной почве наименьшее по сравнению с остальными минеральными фазами. Наблюдается небольшое повышение по содержанию хлорита и каолинита в средней части профиля – в горизонтах BMK и BCAnc,q соответственно (табл. 1, рис. 7).

При пересчете на почву в целом в составе ила по всему профилю лугово-каштановой почвы также преобладают смешанослойные минералы и иллит, хотя наблюдается неравномерное распределение смешанослойных минералов (рис. 3). Наибольшее количество иллита содержится в верхних горизонтах (AU1 и AU2). Распределение хлорита и каолинита также неравномерное (рис. 3А).

Диагностика минералов фракции ила лугово-каштановой почвы (разрез ЗК-1)

Иллит диагностирован по наличию рефлексов 1 нм, 0.5 нм и 0.3 нм как триоктаэдрический. При насыщении этиленгликолем и при прокаливании при 550 °С положение пиков не меняется. Форма пиков и интенсивность при обработках возрастает за счет смектитовой фазы. По соотношению I001/I002 в верхнем горизонте AU1 октаэдрический слой иллита заполнен преимущественно Mg (соотношение I001/I002 составило 3.5) в отличие от нижележащих горизонтов, где заполнение преимущественно Al + Fe (соотношение I001/I002 – 2.6–2.9) и Al (соотношение I001/I002 – 2.4 и 2.5) (табл. 2) (Рентгеновские методы…, 1965). Также это соотношение (I001/I002 – 3.5) говорит о присутствии значительной доли иллита, пополняемого из фракций других размерностей (тонкой и средней пыли) при их физическом дроблении, которые в основном триоктаэдрические с невысокой устойчивостью к выветриванию. Присутствие синтетического иллита наблюдается за счет иллитизации смектита.

Таблица 2. Соотношение рефлексов иллита I001/I002 в лугово-каштановой почве
Table 2. I001/I002 ratio of illite reflexes in meadow-chestnut soil.

Горизонт	**Глубина, см**	**I001/I002**
AU1	0–25	3.5
AU2	25–34	2.7
BMK	34–46	2.9
BM	46–60	2.9
BCAnc,q	60–100	2.6
BC	100–120	2.5
C	120–150	2.4

Смешанослойная фаза в лугово-каштановой почве представлена иллит-смектитовым образованием. Небольшое количество индивидуальной смектитовой фазы появляется в нижних горизонтах с глубины 46–50 см (рис. 9). В смешанослойной фазе иллитовые пакеты преобладают над смектитовыми в верхних горизонтах AU1 и AU2 (рис. 1 и рис. 2), вниз по профилю наблюдается преобладание смектитовых пакетов (рис. 3 и рис. 4). В почвообразующей породе на глубине 100–120 см в состав смешанослойного образования входит хлорит. Наблюдается тенденция к упорядочиванию кристаллической структуры с глубины 25–34 см (рис. 2). Таким образом, минералогический состав гор. BC и C по кристаллохимическому состоянию смешанослойных минералов отличается от вышележащих почвенных горизонтов по появлению индивидуальной смектитовой фазы и хлоритовых пакетов, которых не было выше профилю. Супердисперсное состояние данной фазы наблюдается только в горизонте AU1 на глубине 0–25 см.

Хлорит диагностирован по наличию рефлексов 1.45 нм, 0.71 нм, 0.47 нм и 0.354 нм. Диагностические рефлексы не изменяются при прокаливании при 550 °C и при насыщении этиленгликолем (рис. 1–4). Диоктаэдрический хлорит является магнезиальным, так как присутствуют четкие отражения 001, 002, 003 и 004. Ближе к нижней части профиля, начиная с горизонта BCAnc,q (60–100 см)

(рис. 3), хлорит становится менее разрушенным и более окристаллизованным.

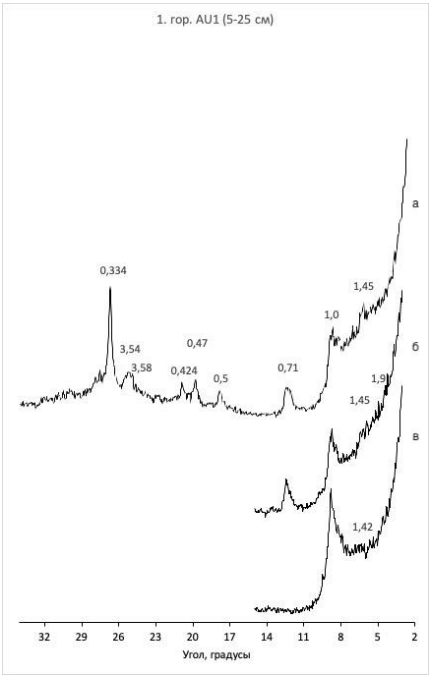


Рис. 1. Рентгендифрактограмма гор. AU1 (0–25 см) лугово-каштановой почвы: а – воздушно- сухое состояние образца, б – после сольватации этиленгликолем, в – после прокаливания при 550°С в течение 2 ч, межплоскостные расстояния в нм.

Fig. 1. X-ray diffractogram of the horizon AU1 (0–25 cm) of meadow-chestnut soil: a – air-dry soil sample, b – after ethylene glycol solvation, c – after calcination at 550 °C for 2 hours, interplanar distances in nm.

Каолинит диагностирован по рефлексам 0.71 и 0.358 нм. При насыщении этиленгликолем изменение межплоскостного расстояния не происходит. Прокаливание при 550 °С приводит к разрушению структуры каолинита, и рефлексы полностью исчезают. В профиле почвы структура каолинита в верхнем горизонте AU несовершенная, так как пик 002 не остроконечный и имеет широкое основание. К нижней части профиля в горизонтах BM,

BCAnc,q и BC (рис. 6 и рис. 7) структура становится более совершенной. Итак, самый поверхностный горизонт AU1 отличается от всех нижележащих горизонтов несовершенной структурой каолинита.

Калиевые полевые шпаты и кварц. Также в иле диагностировано незначительное количество кварца и калиевых полевых шпатов в горизонте AU на глубине 0–25 см (рис. 1).

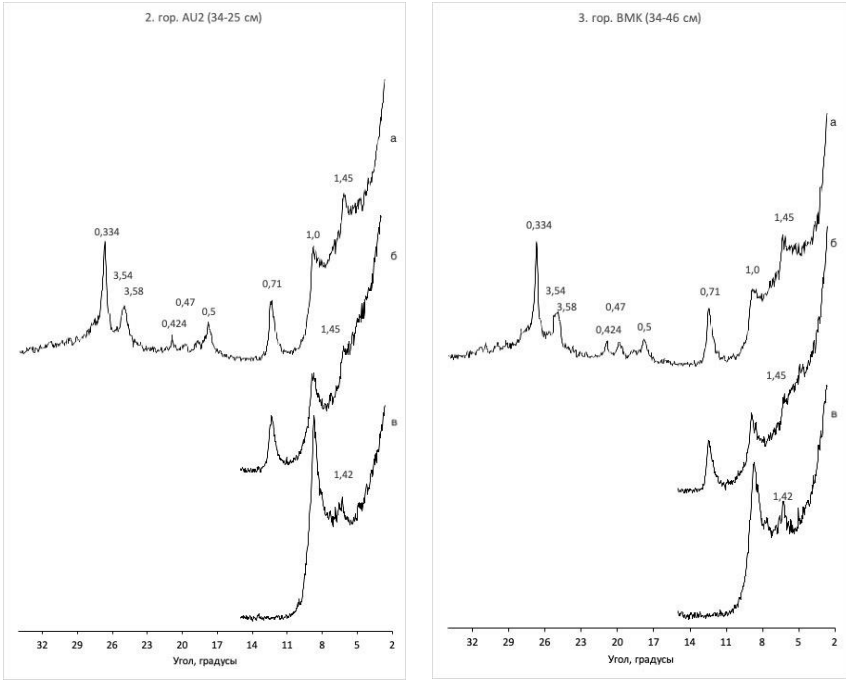


Рис. 2. Рентгендифрактограммы гор. AU2 (25–34 см) и гор. BMK (34–46 см) лугово-каштановой почвы: а – воздушно- сухое состояние образца, б – после сольватации этиленгликолем, в – после прокаливания при 550°С в течение 2 ч, межплоскостные расстояния в нм.

Fig. 2. X-ray diffractogram of the horizons AU2 (25–34 cm) and BMK (34–46 cm) of meadow-chestnut soil: a – air-dry soil sample, b – after ethylene glycol solvation, c – after calcination at 550 °C for 2 hours, interplanar distances in nm.

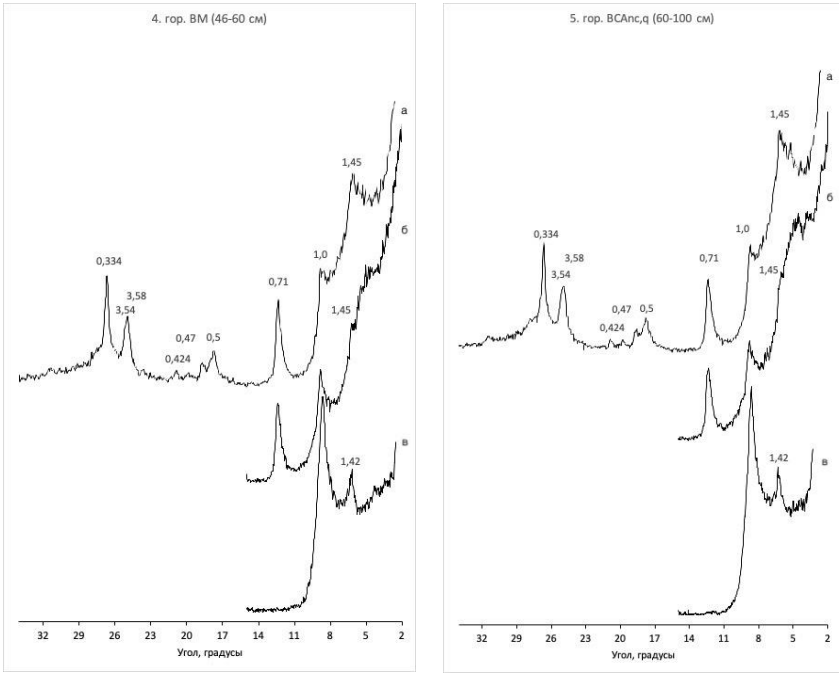


Рис. 3 Рентгендифрактограммы гор. ВМ (46–50 см) и гор. BCAnc,q (60–100 см) лугово-каштановой почвы: а – воздушно- сухое состояние образца, б – после сольватации этиленгликолем, в – после прокаливания при 550°С в течение 2 ч, межплоскостные расстояния в нм.

Fig. 3. X-ray diffractogram of the horizons BM (46–50 cm) and BCAnc,q (60–100 cm) and BMK (34–46 cm) of meadow-chestnut soil: a – air-dry soil sample, b – after ethylene glycol solvation, c – after calcination at 550 °C for 2 hours, interplanar distances in nm.

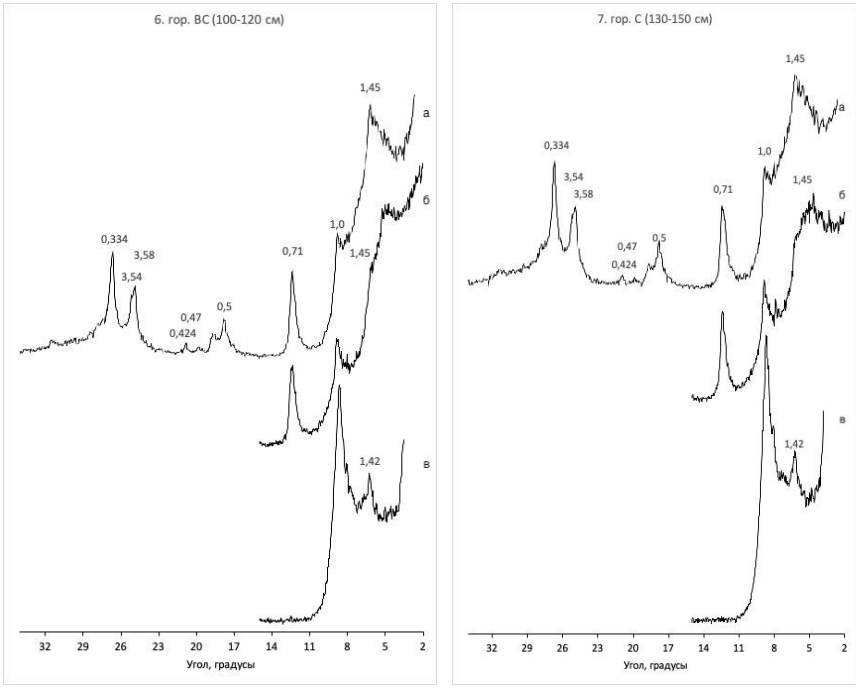


Рис. 4. Рентгендифрактограммы гор. BC (100–120 см) и гор. C (120–150 см) лугово-каштановой почвы: а – воздушно- сухое состояние образца, б – после сольватации этиленгликолем, в – после прокаливания при 550 °С в течение 2 ч, межплоскостные расстояния в нм.
Fig. 4. X-ray diffractogram of the horizons BC (100–120 cm) and C (120–150 cm) and BMK (34–46 cm) of meadow-chestnut soil: a – air-dry soil sample, b – after ethylene glycol solvation, c – after calcination at 550 °C for 2 hours, interplanar distances in nm.

Если сравнивать минералогический профиль лугово-каштановой почвы с солонцом данного комплекса, то можно сказать, что содержание илистой фракции по профилю лугово-каштановой почвы дифференцировано существенно слабее и то только в пределах верхней толщи (рис. 5, табл. 1).

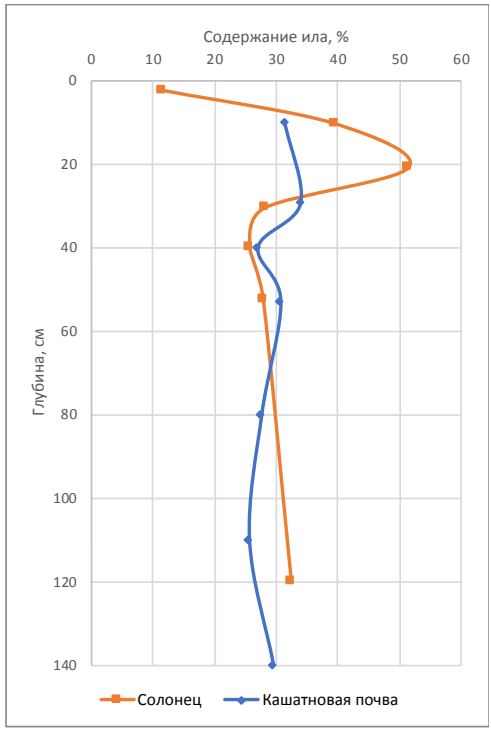
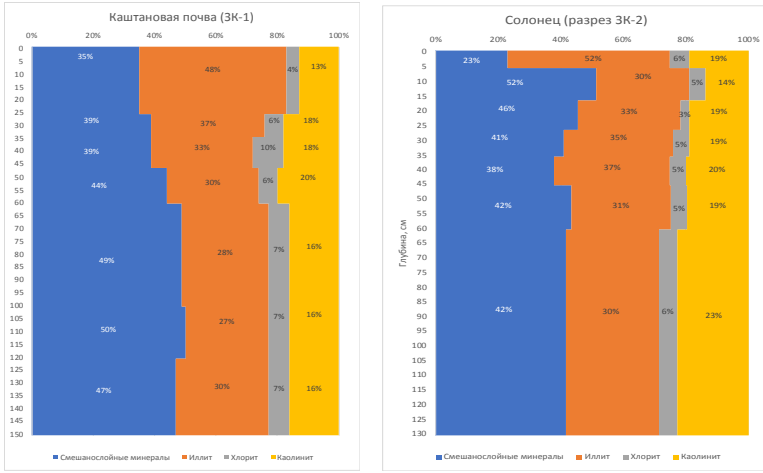


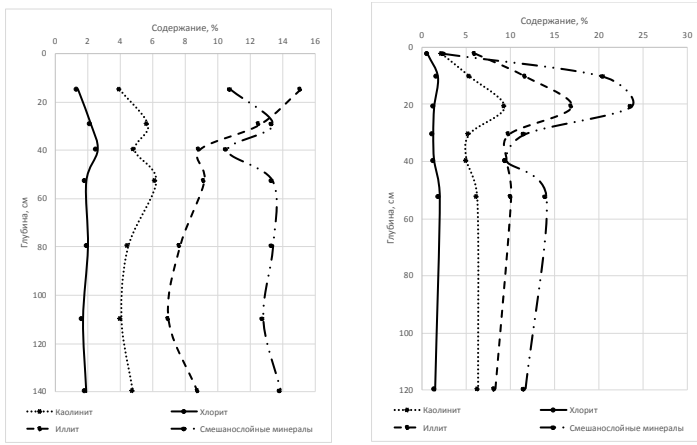
Рис. 5. Распределение ила в солонце и в лугово-каштановой почве.
Fig. 5. Distribution of silt in solonetz and meadow-chestnut soil.

Сравнение минералогического состава илистой фракции двух разрезов показало, что в лугово-каштановой почве она представлена теми же минеральными фазами, что и в солонце: иллитом, смешанослойной фазой (иллит-смектит), хлоритом и каолинитом (рис. 6 и рис. 7). При пересчете на почву в целом характер распределения минералов в сравниваемых почвах связан с распределением ила по профилю, поэтому в солонце и лугово-каштановой почвы минимальное содержание ила в поверхностных горизонтах находит отражение при пересчете минеральных фаз на почву в целом (табл. 1).



A B

Рис. 6. Содержание минералов во фракции ила лугово-каштановой почвы (А) и солонца (В).
Fig. 6. Content of minerals in silt fraction in meadow-chestnut soil (A) and solonetz (B).



A B

Рис. 7. Содержание минералов в почве в целом: А – лугово-каштановая почва, В – солонец.
Fig. 7. Content of minerals in soil in general: A – meadow-chestnut soil, B – solonetz.

Проведем анализ отдельных минеральных фаз сравниваемых почв солонцового комплекса.

Иллит. Во всех горизонтах лугово-каштановой почвы, как и в солонце, отмечено преобладание иллита и смешанослойных минералов (табл. 1). Максимальное количество иллита отмечено исключительно в поверхностных горизонтах – в солонце в горизонте SEL (51.8%), в лугово-каштановой в горизонте AU1 немного меньше – 48% (рис. 8). Ниже по профилю как в лугово-каштановой почве, так и солонце среди преобладающих минералов на первое место выступает смешанослойная фаза. Для горизонта SEL в солонце для иллита характерно заполнение октаэдрического слоя Al + Fe. Для гор. BSN1, BSN2, BSN3s (в толще верхних 5–35 см) – как Mg, так и Al + Fe. В лугово-каштановой почве выявлено несколько иное заполение октаэдричесого слоя – в верхнем горизонте AU1 (0–25 см) отмечено заполнение его Mg, а ниже в AU2 (25–34 см) – Al + Fe.

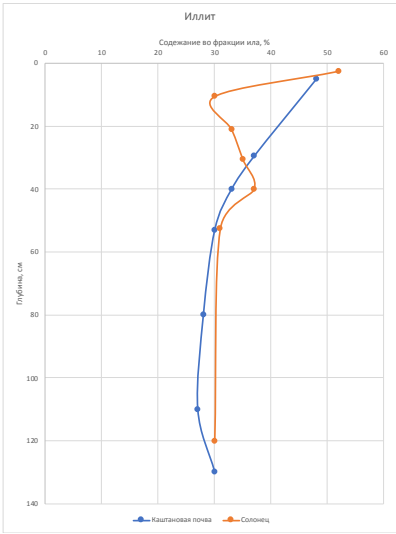


Рис. 8. Распределение иллита во фракции ила в лугово-каштановой почве и в солонце.
Fig. 8. Distribution of illite in silt fraction of meadow-chestnut soil and solonetz.

Смешанослойные минералы. Закономерности распределения смешанослойных минералов в лугово-каштановой почве существенно более равномерны по сравнению с солонцом. В солонце максимальное содержание данной фазы отмечается в горизонтах BSN, минимальное – в горизонте (SEL) (рис. 9). Горизонт SEL содержит преимущественно иллит-смектитовое образование, ниже по профилю отмечено увеличение доли хлоритовых пакетов, особенно в почвообразующей породе (Варламов и др., 2018). Интересно, что супердисперсность смешанослойной фазы отмечается в самых поверхностных горизонтах сравниваемых почв – в верхнем горизонте SEL солонца и в верхнем горизонте AU1 лугово-каштановой почвы.

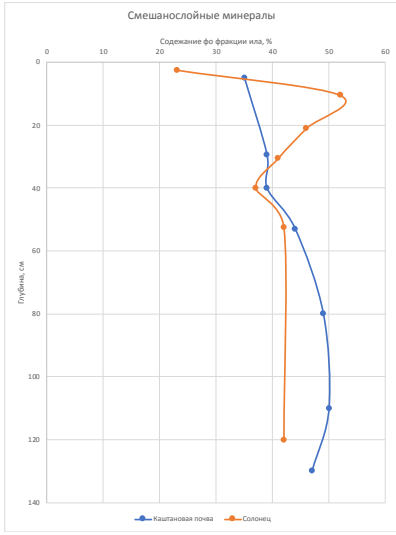


Рис. 9. Распределение смешанослойных минералов во фракции ила в лугово-каштановой почве и в солонце.
Fig. 9. Distribution of mixed layer lattice minerals in silt fraction of meadow-chestnut soil and of solonetz.

Индивидуальная смектитовая фаза отмечена в сравниваемых почвах в разных генетических горизонтах и немного на разной глубине. В солонце незначительное ее количество появляется в горизонте BSN1 на глубине 5–16 см, а в лугово-каштановой почве

его появление наблюдается в горизонте BM с глубины 46–50 см. В поверхностных горизонтах он отсутствует как в лугово-каштановой почве, так и в солонце.

Каолинит. Если сравниваемые почвы различаются по его количественному содержанию в генетических горизонтах в пределах верхних 40 см (рис. 10), то структура каолинита в обоих разрезах имеет одну и ту же особенность – в этой толще он отличается несовершенством структуры (рис. 1–2). Ниже по профилю степень совершенства каолинита возрастает как в лугово-каштановой почве, так и в солонце.

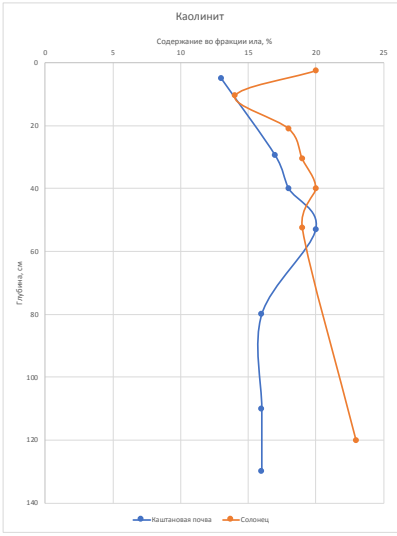


Рис. 10. Распределение каолинита во фракции ила в лугово-каштановой почве и в солонце.
Fig. 10. Distribution of kaolinite in silt fraction of meadow-chestnut soil and and of solonetz.

Хлорит. Качественной минералогической особенностью хлорита является слабая устойчивость к разрушению в зоне гипергенеза, что находит отражение в его минимальном количестве при пересчете на почву в целом в гор. SEL. Аналогичная тенденция

наблюдается и в верхнем горизонте AU1 лугово-каштановой почвы, где содержание хлорита также наименьшее (рис. 11). Во фракции ила содержание хлорита минимально в обоих профилях по сравнению с другими минеральными фазами.

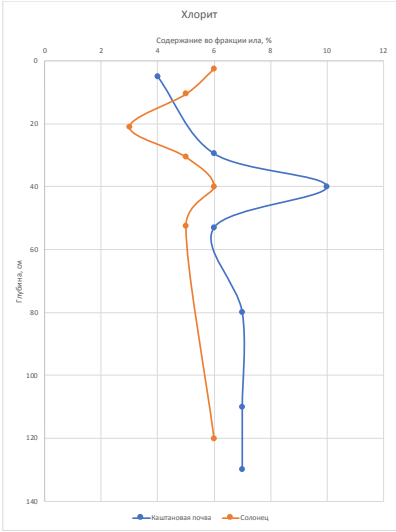


Рис. 11. Распределение хлорита во фракции ила в лугово-каштановой почве и в солонце.
Fig. 11. Distribution of chlorite in silt fraction of meadow-chestnut soil and and of solonetz.

Калиевые полевые шпаты и кварц. В обоих разрезах в верхних горизонтах наблюдается наличие небольшого количество калиевых полевых шпатов, плагиоклаза и кварца тонкодисперсной размерности (< 1 мкм). Их количество несколько больше в солонце, чем в лугово-каштановой почве (рис. 1).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные результаты по анализу минералогического состава ила сравниваемых почв солонцового комплекса на ключе “Борси” без выраженного микрорельефа, но с контрастным почвенным покровом, показывают близкие значения как по содержа-

нию минеральных фаз, так и их распределению по профилям. И в солонце, и в лугово-каштановой почве во всех генетических горизонтах (за исключением поверхностных) и в почвообразующих породах в составе ила преобладают смешанослойные минералы и иллит, каолинит по содержанию занимает промежуточное положение, хлорит – минимальное. Исключением являются только самые поверхностные горизонты сравниваемых почв, в которых иллит преобладает над смешанослойными минералами. Мощность поверхностных горизонтов существенно различается (в 5 раз), а разница по содержанию иллита в иле невелика – в солонце гор. SEL (0–5 см) содержит 52% иллита, а в каштановой почве гор. AU1 (0–25 см) – 48%.

Для сравниваемых почв отмечены следующие общие свойства по кристаллохимическому состоянию: 1) в верхних 40 см отмечено несовершенство структуры каолинита; 2) смешанослойные минералы гор. BC и C обоих почв отличаются от вышележащих почвенных горизонтов по появлению индивидуального смектита и хлоритовых пакетов, которых не было выше по профилю; 3) оба разреза характеризуются супердисперсным состоянием смешанослойной фазы в верхних горизонтах (SEL в солонце и AU1 в лугово-каштановой почве).

Наибольшая разница в содержании ила между генетическими горизонтами выражена в пределах верхних 40 см обоих разрезов: максимальная элювиально-иллювиальная дифференциация выражена в солонце, в лугово-каштановой эта дифференциация выражена на уровне трендов, что находит отражение и в содержании минералов при расчете их содержания на почву в целом. То есть в сравниваемых почвах подтверждается отмечаемое многими исследователями более интенсивное элювиально-иллювиальное перераспределение ила в солонце, связанное как с процессом лессиважа, так и щелочного гидролиза, в результате чего зарегистрировано минимальное содержание лабильных минералов в самых поверхностных горизонтах. Если считать, что эти процессы являются ответственными за особенности профильного распределения лабильных минералов минеральных фаз в солонце, то и в лугово-каштановой почве, вероятно, эти процессы протекали. На это также указывает повышенное супердисперсное состояние смешано-

слойной фазы в самых верхних горизонтах (SEL в солонце и AU1 в лугово-каштановой почве).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Борзенко С.Г., Дронова Т.Я., Колесников А.В., Соколова Т.А., Толпешта И.И., Сиземская М.Л.* Химико-минералогическая характеристика солончакового солонца и лугово-каштановой почвы // Вестник МГУ. Сер. 17. Почвоведение. 2003. № 3. С. 3–8.
2. *Варламов Е.Б., Лебедева М.П., Чурилин Н.А., Чурилина А.Е.* Особенности профильного распределения минералов во фракциях разной размерности в солонце корковом светлом сухостепной зоны юга России // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2018. Вып. 93. С. 144–172. DOI: 10.19047/0136-1694-2018-93-144-168.
3. *Градусов Б.П.* Минералы со смешанослойной структурой в почвах. М.: Изд-во АН СССР, 1976. 127 с.
4. *Егоров В.В., Иванова Е.Н. и Фридланд В.М.* Классификация и диагностика почв СССР. М.: Колос, 1977. 225 с.
5. *Конюшкова М.В., Абатуров Б.Д.* Особенности микрорельефа и свойства почв солонцового комплекса на поздних стадиях развития в Прикаспийской низменности // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2016. Вып. 83. С. 53–76. DOI: 10.19047/0136-1694-2016-83-53-76.
6. *Корнблюм Э.А., Дементьева Т.Г., Зырин Н.Г., Бирина А.Т.* Изменение глинистых минералов при образовании южного и слитого черноземов, лиманной солоди и солонца // Почвоведение. 1972. № 1. С. 67–85.
7. Полевой определитель почв. М., 2008. 182 с.
8. Рентгеновские методы изучения и структура глинистых минералов / Под. ред. Брауна Г. М.: Мир, 1965. 599 с.
9. *Роде А.А., Польский М.Н.* Почвы Джаныбекского стационара, их морфологическое строение, механический и химический состав и физические свойства // Тр. Почв. ин-та им. В.В. Докучаева. Т. 56. Почвы полупустыни Северо-Западного Прикаспия и их мелиорация (по работам Джаныбекского стационара). М.: Изд-во АН СССР, 1961. С. 3–214.
10. *Соколова Т.А., Григорьева Е.Е.* О количественном определении минералов группы почвенных хлоритов // Почвоведение. 1985. № 7. С. 132– 136.
11. *Соколова Т.А., Дронова Т.Я. Толпешта И.И.* Глинистые минералы в почвах. М., 2005.
12. *Травникова Л.С., Мясников В.В.* Особенности глинистого материала почв солонцового комплекса лимана Б. Царын Сарпинской низменности

// Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 1973. Вып. 6. С. 100–109.
13. *Biscaye R.E.* Mineralogy and sedimentation of recent deep-sea clay in the Atlantic Ocean and adjacent Seas and Oceans // Geological Soc. Am. Bull. 1965. Vol. 76. No. 7. P. 803–832.

REFERENCES

1. Borzenko S.G., Dronova T.Ya., Kolesnikov A.V., Sokolova T.A., Tolpeshta I.I., Sizemskaya M.L., *Khimiko-mineralogicheskaya kharakteristika solonchakovogo solontsa i lugovo-kashtanovoi pochvy* (Chemical and mineralogical characteristics of solonchak solonetz and meadow-chestnut soil), *Vestnik MGU, Ser. 17, Pochvovedenie*, 2003, No. 3, pp. 3–8.
2. Varlamov E.B., Lebedeva M.P., Churilin N.A., Churilina A.E., Profile distribution of minerals in textural fractions of different dimensions in the solonets in dry steppe zone of Russia, *Dokuchaev Soil Bulletin*, 2018, Vol. 93, pp. 144–172, DOI: 10.19047/0136-1694-2018-93-144-168.
3. Gradusov B.P., *Mineraly so smeshanosloinoi strukturoi v pochvakh* (Minerals with a mixed structure in soils), Moscow: USSR AS Publish- ing, 1976, 127 p.
4. Egorov V.V., Ivanova E.N., Fridland V.M., *Klassifikatsiya i diagno-stika pochv SSSR* (Classification and diagnostics of soils of the USSR), Moscow: Kolos, 1977, 225 p.
5. Konjushkova M.V., Abaturov B.D., The specificities and properties of soils of solonetzic complex on the latest stages of development in the area of caspian sea region, *Dokuchaev Soil Bulletin*, 2016, Vol. 83, pp. 53–76. DOI: 10.19047/0136-1694-2016-83-53-76.
6. Kornbluym E.A., Dement'eva T.G., Zyrin N.G., Birina A.T., *Izmenenie glinistykh mineralov pri obrazovanii yuzhnogo i slitogo chernozemov, limannoi solodi i solontsa* (Clay minerals changing during formation of southern and vertic chernozems, liman solod and solonetz), *Pochvovedenie*, 1972, No. 1, pp. 67–85.
7. *Polevoi opredelitel' pochv* (Field soil guide), Moscow, 2008, 182 p.
8. *Rentgenovskie metody izucheniya i struktura glinistykh mineralov* (X-ray methods of studying and the structure of clay minerals), Braun G. (Ed.), Moscow: Mir, 1965, 599 p.
9. Rode A.A., Pol'skij M.N., Pochvy Dzhanybekskogo statsionara, ikh morfologicheskoe stroenie, mekhanicheskii i khimicheskii sostav i fizicheskie svoistva (Soils of Janybek station, their morphological structure, mechanical and chemical composition and physical properties), In: *Tr. Pochv. in-ta im. V.V. Dokuchaeva. Pochvy polupustyni Severo-Zapadnogo Prikaspiya i ikh*

melioratsiya (po rabotam Dzhanybekskogo statsionara) (Soils of the semi-desert of the North-Western Caspian region and their reclamation), Moscow: Izd-vo AN SSSR, 1961, Vol. 56, pp. 3–214.
10. Sokolova T.A., Grigor'eva E.E., O kolichestvennom opredelenii mineralov gruppy pochvennykh khloritov (Quantitative determination of soil chlorite group minerals), *Pochvovedenie*, 1985, No. 7, pp. 132–136.
11. Sokolova T.A., Dronova T.Ya., Tolpeshta I.I., *Glinistye mineraly v pochvakh* (Clay minerals in soils), Moscow, 2005.
12. Travnikova L.S., Myasnikov V.V., Features of the clay material of the solonetz soils complex of the estuary B. Tsaryn of the Sarpinsky lowland, *Dokuchaev Soil Bulletin*, 1973, Vol. 6, pp. 100–109.
13. Biscaye R.E., Mineralogy and sedimentation of recent deep-sea clay in the Atlantic Ocean and adjacent Seas and Oceans, *Geological Soc. Am. Bull.*, 1965, Vol. 76, No. 7, pp. 803–832.

УДК 631.445.4(470.23)
DOI: 10.19047/0136-1694-2020-101-182-201

Ссылки для цитирования:
Мамонтов В.Г., Артемьева З.С., Лазарев В.И., Родионова Л.П., Крылов В.А., Ахмедзянова Р.Р. Сравнительная характеристика свойств целинного, пахотного и залежного чернозема типичного Курской области // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2020. Вып. 101. С. 182-201. DOI: 10.19047/0136-1694-2020-101-182-201
Cite this article as:
Mamontov V.G., Artemyeva Z.S., Lazarev V.I., Rodionova L.P., Krylov V.A., Ahmetzyanova R.R., Comparative characteristics of the properties of Halpic Chernozem of the Kursk Region of different land use, Dokuchaev Soil Bulletin, 2020, V. 101, pp. 182-201, DOI: 10.19047/0136-1694-2020-101-182-201

Сравнительная характеристика свойств целинного, пахотного и залежного чернозема типичного Курской области

© 2020 г. В. Г. Мамонтов[1], З. С. Артемьева[2], В. И. Лазарев[3], Л. П. Родионова[1], В. А. Крылов[1], Р. Р. Ахмедзянова[1]

[1]РГАУ – МСХА имени К.А. Тимирязева, Россия, 27550, Москва, Тимирязевская ул., 49, e-mail: soillab@rgau-msha.ru.

[2]Почвенный институт им. В.В. Докучаева, Россия, 119017, Москва, Пыжевский пер, 7, стр. 2, e-mail: arteyievazs@mail.ru.

[3]Курский федеральный аграрный научный центр, Россия, 305021, Курск, ул. Карла Маркса, 70б.

Поступила в редакцию 16.01.2020, *после доработки* 28.02.2020, *принята к публикации* 04.03.2020

Резюме: Аналитические данные свидетельствуют о том, что длительное экстенсивное сельскохозяйственное использование чернозема типичного Курской области (Haplic Chernozem) вызывает неблагоприятные изменения некоторых его свойств. Это касается в первую очередь содержания гумуса и структурного состояния чернозема. Под влиянием бессменной озимой пшеницы (54 года) потери гумуса составили 24% от его содержания в целинной почве. Под влиянием бессменной кукурузы (54 года) потери гумуса достигли 32%, а под влиянием бессменного пара (54 года) – 48%. В результате минерализации гумуса, являющегося

одним из основных агрегирующих агентов, ухудшилась водоустойчивость структуры чернозема. Количество водоустойчивых агрегатов в вариантах с бессменной озимой пшеницей и бессменной кукурузой уменьшилось по сравнению с целинным черноземом (на 30% и 39% соответственно). С точки зрения водоустойчивости структура чернозема трансформировалась в агроценозах с “избыточно высокой” в “хорошую”. Под влиянием бессменного пара содержание водоустойчивых агрегатов уменьшилось на 75%, а структура стала “неводоустойчивой”. При этом средний диаметр водоустойчивых агрегатов уменьшился в вариантах с бессменной озимой пшеницей, бессменной кукурузой и бессменным паром в 2.8, 3.6 и 4.8 раза соответственно, тогда как содержание водопептизируемого ила возросло в 2.8–4.7 раза, а pH среды увеличилась на 0.16–0.57. Наряду с этим в черноземе агроценозов уменьшилось содержание обменного кальция (более чем в 1.1 раза), снизилась гидролитическая кислотность (в 1.1–1.7 раза), уменьшилось содержание органических форм фосфора (в 1.1–1.4 раза), а отношение органических форм фосфора к минеральным снизилось в 2.1–4.1 раза. При переводе бессменного пара в залежь свойства чернозема изменяются с неодинаковой интенсивностью. Наиболее существенные изменения произошли с водоустойчивыми агрегатами. Их содержание за 20 лет возросло на 53%, а структура трансформировалась из “неводоустойчивой” в “хорошую” по водоустойчивости, при этом содержание водопептизируемого ила уменьшилось в 2.1 раза. За 20-летний период на 1.9 и 1.03 мг-экв/100 г почвы увеличилось содержание обменного кальция и гидролитической кислотности. Содержание гумуса возросло на 0.78%, т. е. восстановление содержания гумуса происходило со скоростью всего лишь 0.04% в год. Это необходимо учитывать при регулировании гумусового состояния выпаханных и эродированных почв. В целом воздействие бессменного пара на свойства чернозема оказалось столь глубоким, что за 20 лет после перевода его в залежь свойства чернозема в большинстве своем восстановились лишь до уровня, свойственного вариантам с возделыванием сельскохозяйственных культур.

Ключевые слова: чернозем типичный целинный, бессменная озимая пшеница, бессменная кукуруза, бессменный пар, залежь, общий гумус, обменный кальций, водоустойчивые агрегаты, водопептизируемый ил.

Comparative characteristics of the properties of Halpic Chernozem of the Kursk Region of different land use

V. G. Mamontov[1], Z. S. Artemyeva[2], V. I. Lazarev[3], L. P. Rodionova[1], V. A. Krylov[1], R. R. Ahmetzyanova[1]

[1]Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy, 49 Timiryazevskaya Str., Moscow 27550, Russian Federation, e-mail: soillab@rgau-msha.ru.

[2]V.V. Dokuchaev Soil Science Institute, 7 Bld. 2 Pyzhevskiy per., Moscow 119017, Russian Federation, e-mail: arteyievazs@mail.ru.

[3]Kursk Federal Agricultural Research Centre, 70b Karl Marks Str., Kursk 305021, Russian Federation.

Received 16.01.2020, *Revised* 28.02.2020, *Accepted* 04.03.2020

Abstract: Analytical data show that prolonged extensive agricultural use of typical Chernozem of Kursk region (Haplic Chernozem) results in adverse changes in some soil properties. This primarily concerns the humus content and the structural state of the Chernozem. Under the influence of continuous winter wheat growing (for 54 years) the losses of humus made up 24% of its content in virgin soil. The permanent corn growing (for 54 years) led to humus 32% losses, and under the influence of the bare fallow (for 54 years) – 48%. As a result of mineralization of humus, which is one of the main aggregative agents, water resistance of Chernozem structure has deteriorated. The number of water-resistant aggregates in variants with continuous winter wheat and continuous corn decreased in comparison with virgin soil (by 30% and 39% respectively). In terms of water resistance, the structure of Chernozem was transformed in agrocenoses from "extremely high" to "good". Under the influence of the bare fallow the content of water-resistant units decreased by 75%, and the structure became "non-water resistant". At the same time, the average diameter of waterproof aggregates decreased 2.8, 3.6 and 4.8 times in variants with continuous winter wheat, corn and permanent bare fallow, respectively, whereas the content of the water peptized clay increased 2.8–4.7-fold, and pH of medium increased by 0.16–0.57. At the same time, the content of soil exchangeable calcium reduced (more than 1.1-fold), as well as hydrolytic acidity (1.1–1.7-fold), the content of organic forms of phosphorus (1.1–1.4-fold) and the ratio of organic forms of phosphorus to mineral ones also decreased 2.1–4.1-fold. When the bare fallow is transferred to the abandoned land, the properties of Chernozem vary with different intensity. The most significant changes occurred with water-resistant aggregates. Their content has increased by 53% over 20 years, and the structure has transformed from "non-water resistant" to "good", while the content water peptized clay has decreased 2.1 times. During the 20-year period, the content of

exchangeable calcium and hydrolytic acidity increased by 1.9 and 1.03 mg-eq/100 g of soil. The content of humus has increased by 0.78%, i. e. humus content restoration occurred with a speed of only 0.04% per year. It is necessary to consider this factor when regulating the humus status of the plowed and eroded soils. In general, the impact of continuous bare fallow on the properties of Chernozem was so profound that 20 years after its transfer to the category of abandoned lands, the properties of Chernozem, in most cases, have been restored only to the level typical of variants with crop cultivation.

Keywords: typical steppe chernozem, permanent winter wheat, permanent corn, bare fallow, abandoned land, total humus, exchange calcium, waterstable aggregates, water peptized clay.

ВВЕДЕНИЕ

Черноземная зона является важнейшим земледельческим регионом России. Именно в пределах черноземной зоны, особенно в центральной ее части, благоприятный для большинства сельскохозяйственных культур гидротермический режим сочетается с высоким потенциальным плодородием почв. Поэтому, несмотря на то, что площадь черноземных почв России составляет всего около 120 млн га или лишь 7% площади страны, здесь размещено более половины пахотных угодий и производится около двух третей всей сельскохозяйственной продукции (Щеглов, 2017). В связи с этим главная задача сельскохозяйственного производства заключается в том, чтобы не только получать высокие гарантированные урожаи возделываемых культур, но и не допустить снижения плодородия черноземов. Эта задача первостепенной важности, поскольку замена естественного почвообразовательного процесса на естественно-антропогенный почвообразовательный процесс влечет за собой ряд необратимых изменений в функционировании черноземов, что отражается на их режимах и свойствах. В первую очередь это связано с заменой естественной травянистой растительности культурными растениями агроценозов. В результате этого, в зависимости от возделываемой культуры, системы удобрений, урожая и способа уборки, масштабы ежегодного растительного опада, поступающего в пахотные почвы, снижаются в 2–8 раз (Лебедева и др., 2013; Фокин, 1996). На этом фоне возрастает аэрация почвенного профиля, обусловленная ежегодными механическими обработками почвы, что ведет к снижению коэффициентов гумифика-

ции органических остатков и увеличению коэффициентов минерализации гумусовых веществ. В итоге в пахотных почвах содержание гумуса уменьшается (Чекмарев, Лукин, 2013; Чендев и др., 2011; Щеглов, 1999; Cade-Menun et al., 2017). В большинстве случаев потери гумуса в пахотных черноземах, по сравнению с целинными аналогами, составляют 20–40% (Щербаков, Васенев, 2000; Артемьева, 2008; Чендев и др., 2011). При этом основные потери гумуса, по мнению некоторых ученых, происходят из-за обработки почвы и в паровых полях (Van den Bygaart et al., 2011).

Уменьшение содержания гумуса в пахотных черноземах обычно сопровождается снижением емкости обмена и содержания обменных катионов (Медведев и др., 1983; Щербаков, Васенев, 2000). При этом под пропашными культурами отмечается увеличение гидролитической кислотности, а под культурами сплошного сева – ее уменьшение (Медведев и др., 1983).

В зависимости от генетических особенностей черноземов, возделываемой культуры и системы удобрений реакция среды может изменяться как в сторону подкисления, так и в сторону подщелачивания, хотя чаще происходит подкисление пахотных черноземов, особенно под влиянием минеральных удобрений (Чекмарев, Лукин, 2013; Черногоров и др., 2012; Щербаков, Васенев, 2000).

Уменьшение содержания гумуса и негативные изменения в почвенном поглощающем комплексе являются одной из причин неблагоприятной трансформации структурного состояния пахотных черноземов – явления, получившего практически повсеместное распространение (Мамонтов и др., 2013; Медведев и др., 1983; Щеглов, 1999; Щербаков, Васенев, 2000; Артемьева, 2008). В результате этого в худшую сторону изменяется водно-воздушный режим черноземов, что отрицательным образом сказывается на их плодородии.

Плодородие черноземов во многом зависит от их обеспеченности элементами минерального питания, к числу важнейших из которых относятся фосфор и калий, выполняющие в растениях важные физиологические функции. Обобщение материалов, характеризующих динамику основных показателей плодородия почв Центрально-черноземных областей, показало снижение обеспе-

ченности черноземов подвижными формами фосфора, тогда как содержание подвижного калия не претерпело существенных изменений (Чекмарев, Лукин, 2012; Артемьева и др., 2016).

В последние десятилетия проблема ухудшения свойств и режимов пахотных черноземов обострилась. Связано это с отказом сельхозпроизводителей от севооборотов и ориентацией на узкую специализацию и даже на длительное бессменное возделывание одной культуры. Усугубляет ситуацию низкая культура земледелия и ненормированное использование тяжелой сельскохозяйственной техники, ограниченное применение удобрений (или их полное отсутствие), в первую очередь органических, или же ненормированное внесение минеральных удобрений, содержащих одновалентные катионы (K^+, Na^+, NH_4^+), вызывающие негативные изменения в почвенном поглощающем комплексе и ухудшение физических свойств почв. Наряду с этим в конце прошлого века значительные площади пахотных земель России были выведены из активного сельскохозяйственного оборота, переведены в залежь и в настоящее время представляют собой территории, занятые естественной зональной растительностью. В настоящее время общая площадь бывших сельскохозяйственных угодий, перешедших в категорию залежи, составляет более 4.9 млн га (Государственный…, 2017) и является важным резервом увеличения площади пахотных земель. Поэтому оценка особенностей изменения свойств черноземов при длительном экстенсивном сельскохозяйственном использовании и при нахождении в залежи в течение четко установленного периода имеет важное практическое и научное значение.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Объект исследования – среднесуглинистый чернозем типичный, согласно международной классификации, – Haplic Chernozem (Loamic, Pachic) (45 WRB, 2014) на лёссовидных отложениях с содержанием ила 18.4–22.9% (Когут и др., 2019).

Образцы целинного чернозема отбирались в Центрально-Черноземном государственном биосферном заповеднике им. А.А. Алехина на некосимом участке Стрелецкой степи (N51.282072°; E36.131072°) из гумусово-аккумулятивного гори-

зонта А1 (слой мощностью 5–25 см) в 3-кратной повторности. Верхний слой (5 см) представлял собой мощную дернину, более чем наполовину состоящую из корней травянистой растительности, поэтому в состав анализируемых образцов этот слой не включался.

Образцы пахотного чернозема типичного были отобраны на стационарном полевом опыте Петринского опорного пункта Курского НИИ АПП, заложенном в 1964 г. Изучались следующие варианты опыта: бессменная озимая пшеница без удобрений (54 года), бессменная кукуруза без удобрений (54 года), бессменный пар (54 года). Размер делянок 296 м^2. В 1998 г. 2/3 участка пара было оставлено под бессменное парование, а 1/3 участка отведена под залежь (20 лет). Образцы отбирались из пахотного слоя мощностью 0–20 см.

В почвенных образцах определяли общий гумус по методу Тюрина, р$Н_{H_2O}$, гидролитическую кислотность (Нг) – по методу Каппена, обменные кальций и калий – по методу Гедройца, подвижные P_2O_5 – по методу Чирикова, водорастворимый кальций, органофосфаты (Аринушкина, 1970), водопептизируемый ил – по методу Качинского, агрегатный анализ – по методу Саввинова (Вадюнина, Корчагина, 1986). Все показатели определяли в индивидуальных образцах в 3-кратной повторности и находили средние значения. Для нахождения $НСР_{05}$ использовали программный комплекс статистической обработки экспериментальных данных STRAZ.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Длительное сельскохозяйственное использование чернозема типичного оказало заметное влияние на его свойства (табл. 1). Аналитические данные свидетельствуют, что наиболее обогащен органическим веществом чернозем варианта степь – 8.13% на массу почвы (табл. 1, рис. 1). В пахотных почвах содержание гумуса заметно ниже и уменьшается в следующей последовательности: бессменная озимая пшеница (6.2% на массу почвы) > бессменная кукуруза (5.5% на массу почвы) > бессменный пар (4.2% на массу почвы). Это в 1.3, 1.5 и 1.9 раза соответственно меньше по сравне-

нию с целинным черноземом.

Согласно таблице показателей гумусного состояния почв (Орлов и др., 2004), в целинном типичном черноземе содержание гумуса высокое, в черноземе под бессменной озимой пшеницей – среднее, а в черноземе под бессменной кукурузой и бессменным паром – ниже среднего. В целом под влиянием длительного экстенсивного сельскохозяйственного использования потери гумуса в черноземе увеличиваются в ряду: 24% (бессменное возделывание озимой пшеницы) < 32% (бессменное возделывание кукурузы) < 48% (в условиях бессменного пара).

Таблица 1. Влияние различных вариантов использования на химические свойства чернозема типичного Курской области
Table 1. Influence of different land use cases on chemical properties of typical Chernozem of Kursk region

Вариант	**Общий гумус, %**	**Водорастворимый Ca^{2+}, мг-экв/100 г почвы**	**Доступные**		**P_2O_5 орг**	**$\frac{P_2O_5 \text{ орг}}{P_2O_5 \text{ мин}}$**
			K_2O	**P_2O_5**		
			мг/кг почвы			
Некосимая степь	8.13	0.80	181.00	58.60	360.00	6.10
Бессменная озимая пшеница	6.18	1.00	173.60	147.20	265.10	1.80
Бессменная кукуруза	5.54	0.75	119.70	113.30	325.50	2.90
Бессменный пар	4.22	0.69	123.00	177.80	263.30	1.50
Залежь	5.00	0.69	122.30	97.00	314.20	3.20
$НСР_{05}$	0.37	0.30	39.30	31.60	78.30	-

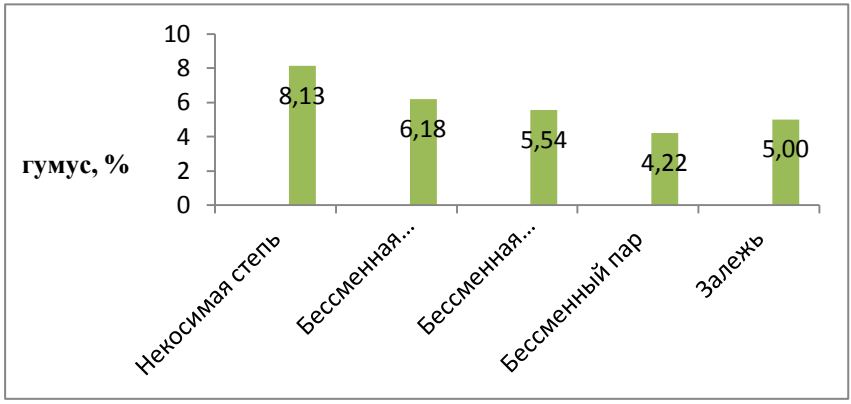


Рис. 1. Влияние различных вариантов использования на содержание гумуса в черноземе типичном Курской области
Fig 1. Influence of different use cases on the humus content in Chernozem typical of the Kursk region

В результате перевода пара в залежь содержание гумуса в черноземе типичном за 20 лет увеличилось на 0.78%. Соответственно, прирост гумуса составил 0.039% в год. Близкие данные по темпам прироста гумуса при замене пашни залежью были получены для обыкновенных черноземов (Русанов, Тесля, 2012). Несмотря на увеличение содержания гумуса при переводе бессменного пара в залежь, за истекший период (20 лет) его количество не только не достигло уровня целинного чернозема, но даже и уровня почв агроценозов. Содержание гумуса в черноземе залежи достигало 5.0% на массу почвы, что составляет 62% от его количества в целинном черноземе.

Важнейшим компонентом почвенного раствора черноземов является ион кальция. Доминирование кальция в почвенном растворе обеспечивает насыщенность им почвенного поглощающего комплекса, благоприятную реакцию среды, коагуляцию новообразованных гумусовых веществ и минеральных коллоидов. Гуматы кальция являются одними из главных факторов формирования агрономически ценных водоустойчивых агрегатов. Поэтому от режима кальция во многом зависят агрономические свойства черно-

земов.

Длительное сельскохозяйственное использование чернозема не оказало существенного влияния на содержание водорастворимого кальция. Количество его изменяется от 0.69 мг-экв в черноземе бессменного пара и залежи до 1.0 мг-экв в варианте с бессменной озимой пшеницей (табл. 1).

В черноземе типичном содержится значительное количество обменного калия. Содержание его варьирует в пределах 119.7–173.6 мг/кг почвы. Различное использование чернозема не оказало существенного влияния на содержание обменного калия, обеспеченность которым остается на высоком уровне (табл. 1).

Содержание подвижного фосфора в целинном черноземе составило 58.6 мг/кг почвы. В пахотных почвах его содержание резко возрастает – до 113.3–177.8 мг/кг почвы и достигает высокого уровня обеспеченности (табл. 1). Обусловлено это минерализацией органического вещества и переходом органического фосфора в минеральные формы. Известно, что до 70–80% всех запасов фосфора в почвах приходится на долю его органических соединений (Орлов и др., 2004). В целинном черноземе содержание органических форм фосфора самое высокое и составляет 360.0 мг/кг почвы (табл. 1).

Ежегодная вспашка сопровождается минерализацией гумуса, в результате чего содержание органических форм фосфора в почвах агроценозов снижается до 263.3–325.5 мг/кг почвы. В результате высвобождения органических форм фосфора происходит увеличение содержания его подвижных форм. При этом больше всего подвижных фосфатов содержится в черноземе бессменного пара, а в черноземе под бессменной кукурузой подвижного фосфора меньше, чем в варианте с бессменной озимой пшеницей (табл. 1). При переводе бессменного пара в залежь содержание подвижного фосфора снижается, что обусловлено активным включением его в состав органических соединений гумуса. Так, по сравнению с черноземом бессменного пара в черноземе залежи содержится в 1.2 раза больше органических форм фосфора. Тем не менее содержание подвижного фосфора в залежном черноземе остается более высоким, нежели в целинном черноземе (табл. 1, рис. 2).

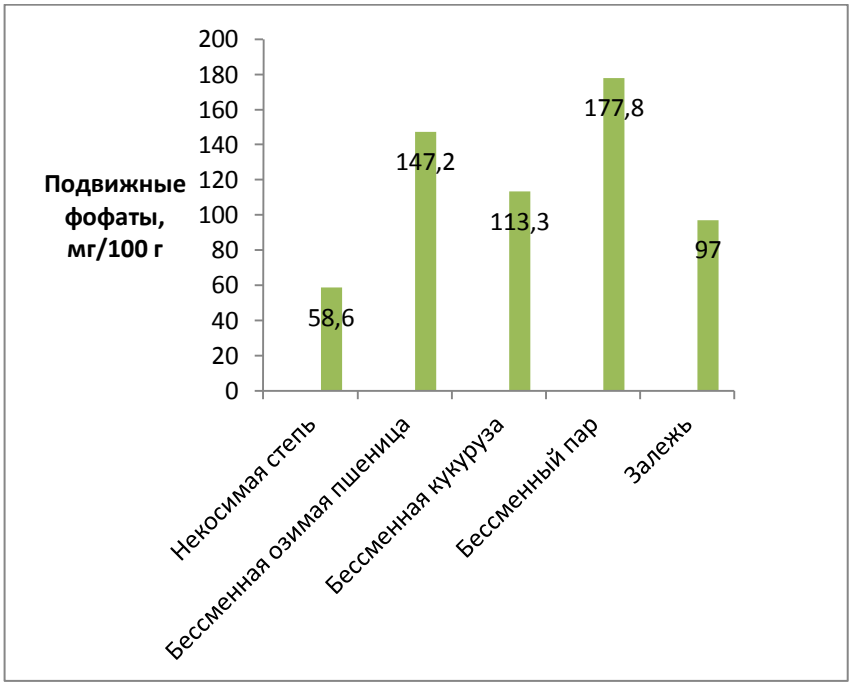


Рис. 2. Влияние различных вариантов использования на содержание подвижногоP_2O_5 в черноземе типичном Курской области.
Fig 2. Influence of different use cases on the content of mobile P_2O_5 in the Chernozem typical of the Kursk region.

В пахотных почвах отмечено существенное снижение величины отношения содержания органических форм фосфора к минеральным формам фосфора ($P_{орг}/P_{мин}$), которое образует ряд: 6.1 (степь) > 2.9 (бессменная кукуруза) > 1.8 (бессменная озимая пшеница). Это может свидетельствовать о более активном высвобождении фосфора из органических соединений под влиянием озимой пшеницы. Самая низкая величина отношения $P_{орг}/P_{мин}$ – 1.5 отмечается в варианте бессменного пара, где произошла наиболее значительная минерализацией органического вещества почвы (табл. 1). В результате замены бессменного пара залежью происходит не только увеличение в почве гумуса, но и количества фосфора в его составе, вследствие чего отношение $P_{орг}/P_{мин}$ увеличилось до 3.2.

Различные условия использования чернозема типичного неодинаково отражаются на его физико-химических и физических свойствах (табл. 2).

Таблица 2. Влияние различных вариантов использования на физико-химические и физические свойства чернозема типичного Курской области

Table 2. Influence of different land use cases on physical-chemical and physical properties of typical black soil of Kursk region

Вариант	pH_{H_2O}	Нг	Обменный Ca^{2+}	Водоустойчивые агрегаты		Водопептизируемый ил, %
		мг-экв/100 г почвы		% в почве	средний диаметр, мм	
Некосимая степь	6.20	5.52	55.20	82.10	2.27	0.81
Бессменная озимая пшеница	6.36	5.12	49.90	52.00	0.81	2.29
Бессменная кукуруза	6.77	3.35	54.20	43.00	0.63	3.05
Бессменный пар	6.42	4.38	48.50	7.60	0.47	3.81
Залежь	6.22	5.41	50.40	60.50	1.20	1.82
$НСР_{05}$	0.07	0.69	4.70	2.60	0.19	0.39

Значения pH_{H_2O} исследуемых почв лежат в нейтральной области, тем не менее между вариантами наблюдаются некоторые различия. Самое низкое значение pH_{H_2O} – 6.20 наблюдается в целинном черноземе. В пахотных почвах реакция среды несколько возрастает: под влиянием бессменной озимой пшеницы и бессменного пара pH_{H_2O} увеличился на 0.16 и 0.22 единицы, а в варианте с бессменной кукурузой достиг 6.77. При переводе бессменного пара в залежь величина pH_{H_2O} уменьшилась до 6.22 (табл. 2), что отражает неодинаковое влияние растений на почву.

Схожим образом изменилась и величина гидролитической кислотности (табл. 2). В целинном черноземе она составила 5.52 мг-экв/100 г почвы. Под влиянием бессменной озимой пшеницы

гидролитическая кислотность уменьшилась на 0.4, а бессменного пара – на 1.14 мг-экв/100 г почвы. Самая низкая величина гидролитической кислотности – 3.35 мг-экв/100 г почвы отмечается в варианте с бессменной кукурузой, где наблюдается и самое высокое значение pH_{H_2O} (табл. 2). Замена бессменного пара залежью сопровождается увеличением гидролитической кислотности до 5.41 мг-экв/100 г почв.

Ион кальция является важнейшим обменным катионом. Поэтому насыщенность им почвенного поглощающего комплекса имеет большое значение для создания и формирования благоприятных для культурных растений физико-химических и физических свойств почвы.

Для черноземов характерно высокое содержание обменного кальция (Медведев и др., 1983; Щеглов, 1999; Щербаков, Васенев, 2000). В целинном черноземе типичном его количество составило 55.2 мг-экв/100 г почвы (табл. 2). В пахотных почвах содержится неодинаковое количество обменного кальция. В варианте с бессменной кукурузой количество обменного кальция находится на уровне чернозема целинного. В варианте с бессменной озимой пшеницей содержание обменного кальция снизилось до 49.9 мг-экв/100 г почвы, а под влиянием бессменного пара – до 48.5 мг-экв/100 г почвы. В залежном черноземе содержание обменного кальция составило 50.4 мг-экв/100 г почвы. В целом можно констатировать, что с учетом величины гидролитической кислотности в пахотном черноземе произошло уменьшение величины емкости обмена. В зависимости от особенностей использования чернозема емкость обмена уменьшилась на 3.17–7.84 мг-экв/100 г почвы.

Наиболее выражено это в условиях бессменного пара (табл. 2). Даже последующая трансформация бессменного пара в залежь хотя и способствует увеличению емкости обмена, тем не менее ее величина лишь приближается к показателям, характерным для вариантов с возделыванием сельскохозяйственных культур, и не достигает значений, свойственных целинному черноземе.

Большое значение для эффективного использования пашни имеет характер почвенной структуры, от качества которой непосредственно зависит водно-воздушный режим почвы и условия произрастания культурных растений. Для целинного чернозема

характерно очень высокое содержание водоустойчивых агрегатов – 82.1% и водоустойчивость структуры является избыточно высокой (Вадюнина, Корчагина, 1986; Когут и др., 2019). Средний диаметр водоустойчивых агрегатов равен 2.27 мм.

Длительная ежегодная вспашка чернозема, сопровождающаяся механическим разрушением структурных отдельностей под воздействием сельскохозяйственной техники и минерализацией гумуса, привела к уменьшению содержания водоустойчивых агрегатов в почве. Их количество снижается от 43% (бессменная кукуруза) до 52% (бессменная озимая пшеница). Исходя из этого, можно предположить, что возделывание озимой пшеницы в течение длительного времени (54 года) имело менее выраженный негативный эффект на структуру почвы по сравнению с возделыванием кукурузы. В то же время водоустойчивость структуры чернозема в обоих случаях оценивается как хорошая. Наряду со снижением количества водоустойчивых агрегатов, по сравнению с таковым целинного чернозема, уменьшился и их средний диаметр: в 2.8 раза (бессменная озимая пшеница) и в 3.6 раза (бессменная кукуруза) (табл. 2).

Бессменный пар самым отрицательным образом повлиял на водоустойчивость структуры чернозема. Здесь сохранилось всего 7.6% водоустойчивых агрегатов, и структура стала неводоустойчивой. При этом, даже по сравнению с вариантами длительного (54 года) бессменного возделывания озимой пшеницы и кукурузы, средний диаметр водоустойчивых агрегатов в варианте с бессменным паром уменьшился в 1.7 и 1.3 раза соответственно.

Замена бессменного пара залежью способствовала заметному улучшению условий агрегирования почвенной массы. Это находит отражение в увеличении количества водоустойчивых агрегатов, которое достигает 60.5%, а также в трансформации исходной “неводоустойчивой” структуры в “отличную” с точки зрения водоустойчивости. Это сопровождается увеличением среднего диаметра водоустойчивых агрегатов в 2.6 раза по сравнению с таковым в варианте пара.

Содержание водопептизируемого ила является одним из показателей агрофизического состояния почвы. При повышенном содержании этой категории илистых частиц почва приобретает

ряд неблагоприятных свойств. Во влажном состоянии увеличиваются вязкость и липкость, возрастает набухание почвенной массы, в результате чего ухудшается фильтрация, уменьшается количество воздухоносных пор и затрудняется газообмен почвенного воздуха с атмосферным.

Чернозем типичный характеризуется невысоким содержанием водопептизируемого ила (табл. 2). В целинном черноземе его количество составило 0.81%. В результате минерализации гумуса и разрушения почвенной структуры в почвах агроценозов количество водопептизируемого ила возрастает: до 2.29% (бессменная озимая пшеница) и 3.05% (бессменная кукуруза). Наиболее высоким содержанием водопептизируемого ила характеризуется варианте с бессменным паром – 3.81%. По-видимому, это обусловлено не только минерализацией гумуса и ежегодным механическим разрушением почвенной структуры в результате обработки почвы. Возможно, практически полное отсутствие поступления в почву свежего органического материала в течение столь длительного времени негативно влияет на условия склеивания тонкодисперсных частиц за счет органических веществ корневых выделений и новообразованных из растительных остатков гумусовых соединений. Благодаря этому в черноземе бессменного пара увеличивается количество неагрегированных тонкодисперсных частиц, пептизирующихся водой. При переводе бессменного пара в залежь содержание водопептизируемого ила снижается до 1.82%, однако все равно остается более высоким, нежели в целинном черноземе.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Длительное экстенсивное сельскохозяйственное использование чернозема типичного Курской области привело к существенному изменению его свойств. В пахотном черноземе произошло увеличение значений pH, содержания водопептизируемого ила и подвижного фосфора. В то же время содержание обменного кальция, органических форм фосфора и емкости обмена заметно уменьшилось. Наиболее существенные изменения произошли с содержанием гумуса и водоустойчивых агрегатов. В результате экстенсивного сельскохозяйственного использования содержание гумуса в черноземе типичном уменьшилось на 1.95–3.91% или на

24–48% от его содержания в целинной почве, водоустойчивых агрегатов – на 30–75%, при этом средний диаметр водоустойчивых агрегатов стал меньше на 1.46–1.80 мм, содержание водопептизируемого ила возросло в 2.8–4.7 раза. Самые заметные негативные изменения произошли в черноземе бессменного пара. Они настолько глубокие, что при замене бессменного пара залежью в большинстве случаев свойства чернозема восстанавливаются лишь до уровня свойств почв агроценозов с постоянным возделыванием сельскохозяйственных культур. При этом восстановление содержания гумуса происходит медленно, со скоростью примерно 0.04% в год, что необходимо учитывать при регулировании гумусового состояния почв.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Аринушкина Е.В.* Руководство по химическому анализу почв. М.: МГУ, 1970. 489 с.
2. *Артемьева З.С.* Органические и органно-глинистые комплексы агрогенно-деградированных почв: Автореф. дис. … док. биол. наук. Москва, 2008. 48 с.
3. *Артемьева* З.С., *Кириллова* Н.П., *Силева* Т.М., *Сошникова Е.И.* Органические и органо-минеральные составляющие фосфатного режима эродированных почв центра Русской равнины // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2016. Вып. 84. С. 75–100. DOI: 10.19047/0136-1694-2016-84-75-100.
4. *Вадюнина А.Ф., Корчагина З.А.* Методы исследования физических свойств почв. М.: Агропромиздат, 1986. 416 с.
5. Государственный (национальный) доклад о состоянии и использовании земель в Российской Федерации в 2016 году. М.: Росреестр, 2017. 220 с.
6. *Когут Б.М., Артемьева З.С., Кириллова Н.П., Яшин М.А., Сошникова Е.И.* Компонентный состав органического вещества воздушно-сухих и водоустойчивых макроагрегатов типичного чернозема в условиях контрастного землепользования // Почвоведение. 2019. № 2. С. 161–170. DOI: 10.1134/S106422931902008X.
7. *Лебедева И.И., Королева И.Е., Гребенников А.М.* Концепция эволюции черноземов в условиях агроэкосистем // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2013. Вып. 71. С. 16–26. DOI: 10.19047/0136-1694-2013-71-16-26.

8. *Мамонтов В.Г., Байбеков Р.Ф., Лазарев В.И., Юдин С.А., Цветков С.А., Таллер Е.Б.* Изменение структурного состояния чернозема типичного Курской области под влиянием бессменных пара и озимой пшеницы // Земледелие. 2019. № 1. С. 7–10.
9. *Медведев В.В., Адерихин П.Г., Гаврилюк Ф.Я., Чесняк Г.Я.* Физико-химические свойства черноземов // Русский чернозем – 100 лет после Докучаева. М.: Наука, 1983. С. 199–214.
10. *Орлов Д.С., Бирюкова О.Н., Розанова М.С.* Дополнительные показатели гумусного состояния почв и их генетических горизонтов // Почвоведение. 2004. № 8 С. 918–926.
11. *Фокин А.Д.* Идеи В.В. Докучаева и проблема органического вещества почв //Почвоведение. 1996. № 2. С. 187–196.
12. *Русанов А.М., Тесля А.В.* Изменение основных свойств степных черноземов как результат их постагрогенной трансформации // Вестник ОГУ. 2012. № 6 (142). С. 98–101.
13. *Чекмарев П.А., Лукин С.В.* Мониторинг плодородия пахотных почв центрально-черноземных областей России // Агрохимия. 2013. № 4. С. 11–22.
14. *Чендев Ю.Г., Смирнова Л.Г., Петин А.Н., Кухарук Н.С., Новых Л.Л.* Длительное изменение содержания гумуса в пахотных черноземах центра Восточно Европейской равнины // Достижения науки и техники АПК. № 8. 2011. С. 6–9.
15. *Черногоров А.Л., Чекмарев П.А., Васенев И.И., Гогмадзе Г.Д.* Агроэкологическая оценка земель и оптимизация землепользования. М.: Изд-во МГУ, 2012. 268 с.
16. *Щеглов, Д. И.* Черноземы центра Русской равнины и их эволюция под влиянием естественных и антропогенных факторов / Д. И. Щеглов. М.: Изд-во “Наука”, 1999. 214 с.
17. *Щеглов Д.И.* Черноземы центральных областей России: современное состояние и направление эволюции // Черноземы Центральной России: генезис, эволюция и проблемы рационального использования. Воронеж: Издательско-полиграфический центр “Научная книга”, 2017. С. 5–18.
18. *Щербаков А.П., Васенев И.И.* Русский чернозем на рубеже веков // Антропогенная эволюция черноземов. Воронеж: Воронежский государственный университет. 2000. С. 32–67.
19. *Cade-Menun B.J., Bainard L.D., LaForge K., Schellenberg M., Houston B., Hamelc C.* Long-term agricultural land use affects chemical and physical properties of soils from southwest Saskatchewan // Canadian Journal of Soil Science. 2017. 97(4). P. 650–666.
20. *Van den Bygaart A.J., Bremer, E., B.G. McConkey, B.H. Ellert, H.H. Janzen, D.A. Angers, M.R. Carter, Drury C.F., Lafond G.P., McKenzie R.H.*

Impact of sampling depth on differences in soil carbon stocks in long-term Agroecosystem experiments // Soil Science Society America Journal. 2011. 75 (1). P. 226–234.

REFERENCES

49. Arinushkina E.V., *Rukovodstvo po himicheskomu analizu pochv* (Chemical soil analysis guide), Moscow: MGU, 1970, 489 p.
50. Artem'eva Z.S., *Organicheskie i organno-glinistye kompleksy agrogenno-degradirovan-nyh pochv: Avtoref. diss. ... dokt. biol. nauk* (Organic and organo-clay complexes of agrogenically degraded soils, Extended abstract of Dr. biol. sci. thesis). Moscow, 2008, 48 p.
51. Artem'eva Z.S., Kirillova N.P., Sileva T.M., Soshnikova E.I., The organic and organo-mineral components of phosphate regime of eroded soils in the centre of Russian Plain, *Dokuchaev Soil Bulletin*, 2016, Vol. 84, pp. 75–100, DOI: 10.19047/0136-1694-2016-84-75-100.
52. Vadjunina A.F., Korchagina Z.A., *Metody issledovanija fizicheskih svojstv pochv* (Methods of studying the physical properties of soils), Moscow: Agropromizdat, 1986, 416 p.
53. Gosudarstvennyj (nacional'nyj) doklad o sostojanii i ispol'zovanii zemel' v Rossijskoj Federacii v 2016 godu (State (national) report on the state and use of land in the Russian Federation in 2016), Moscow: Rosreestr, 2017, 220 p.
54. Kogut B.M., Artem'eva Z.S., Kirillova N.P., Jashin M.A., Soshnikova E.I., Komponentnyj sostav organicheskogo veshhestva vozdushno-suhih i vodoustojchivyh makroagregatov tipichnogo chernozema v uslovijah kontrastnogo zemlepol'zovanija (The component composition of the organic matter of air-dry and waterproof macroaggregates of a typical chernozem in contrasting land use), *Pochvovedenie*, 2019, No. 2, pp. 161–170, DOI: 10.1134/S106422931902008X.
55. Lebedeva I.I., Koroleva I.E., Grebennikov A.M., The concept of evolution of chernozems in agroecosystems, *Dokuchaev Soil Bulletin*, 2013, Vol. 71, pp. 16–26, DOI: 10.19047/0136-1694-2013-71-16-26.
56. Mamontov V.G., Bajbekov R.F., Lazarev V.I., Judin S.A., Cvetkov S.A., Taller E.B., Izmenenie strukturnogo sostojanija chernozema tipichnogo Kurskoj oblasti pod vlijaniem bessmennyh para i ozimoj pshenicy (The change in the structural state of chernozem typical of the Kursk region under the influence of permanent steam and winter wheat), *Zemledelie*, 2019, No. 1, pp. 7–10.
57. Medvedev V.V., Aderihin P.G., Gavriljuk F.Ja., Chesnjak G.Ja., Fiziko-himicheskie svojstva chernozemov (Physico-chemical properties of chernozems), In: *Russkij chernozem – 100 let posle Dokuchaeva* (Russian

chernozem – 100 years after Dokuchaev), Moscow: Nauka, 1983, pp. 199–214.
58. Orlov D.S., Birjukova O.N., Rozanova M.S., Dopolnitel'nye pokazateli gumusnogo sostojanija pochv i ih geneticheskih gorizontov (Additional indicators of the humus state of soils and their genetic horizons), *Pochvovedenie*, 2004, No. 8, pp. 918–926.
59. Fokin A.D., Idei V.V. Dokuchaeva i problema organicheskogo veshhestva pochv (Ideas V.V. Dokuchaeva and the problem of soil organic matter), *Pochvovedeni*e, 1996, No. 2, pp. 187–196.
60. Rusanov A.M., Teslja A.V., Izmenenie osnovnyh svojstv stepnyh chernozemov kak rezul'tat ih postagrogennoj transformacii (Change in the basic properties of steppe chernozems as a result of their post-agrogenic transformation), *Vestnik OGU*, 2012, No. 6 (142), pp. 98–101.
61. Chekmarev P.A., Lukin S.V., Monitoring plodorodija pahotnyh pochv central'no-chernozemnyh oblastej Rossii (Monitoring of fertility of arable soils in the central chernozem regions of Russia), *Agrohimija*, 2013, No. 4, pp. 11–22.
62. Chendev Ju.G., Smirnova L.G., Petin A.N., Kuharuk N.S., Novyh L.L., Dlitel'noe izmenenie soderzhanija gumusa v pahotnyh chernozemah centra Vostochno Evropejskoj ravniny (A Long-Term Change in the Humus Content in Arable Black Soils of the Center of the East European Plain), *Dostizhenija nauki i tehniki APK*, No. 8, 2011, pp. 6–9.
63. Chernogorov A.L., Chekmarev P.A., Vasenev I.I., Gogmadze G.D., *Agrojekologicheskaja ocenka zemel' i optimizacija zemlepol'zovanija* (Agroecological assessment of land and land use optimization), Moscow: Izd-vo MGU, 2012, 268 p.
64. Shheglov D.I., *Chernozemy centra Russkoj ravniny i ih jevoljucija pod vlijaniem estestvennyh i antropogennyh faktorov* (Chernozems of the center of the Russian Plain and their evolution under the influence of natural and anthropogenic factors), Moscow: Izd-vo “Nauka”, 1999, 214 p.
65. Shheglov D.I., Chernozemy central'nyh oblastej Rossii: sovremennoe sostojanie i napravlenie jevoljucii (Chernozems of the central regions of Russia: current status and direction of evolution), In: *Chernozemy Central'noj Rossii: genezis, jevoljucija i problemy racional'nogo ispol'zovanija* (Chernozems of Central Russia: genesis, evolution and problems of rational use), Voronezh: Izdatel'sko-poligraficheskij centr “Nauchnaja kniga”, 2017, pp. 5–18.
66. Shherbakov A.P., Vasenev I.I., Russkij chernozem na rubezhe vekov (Russian chernozem at the turn of the century), In: *Antropogennaja jevoljucija chernozemov* (Anthropogenic evolution of chernozems), Voronezh: Voronezhskij gosudarstvennyj universitet, 2000, pp. 32–67.

67. Cade-Menun B.J., Bainard L.D., LaForge K., Schellenberg M., Houston B., Hamelc C., Long-term agricultural land use affects chemical and physical properties of soils from southwest Saskatchewan, *Canadian Journal of Soil Science*, 2017, 97(4), pp. 650–666.
68. Van den Bygaart A.J., Bremer, E., B.G. McConkey, B.H. Ellert, H.H. Janzen, D.A. Angers, M.R. Carter, C.F. Drury, C.F., G.P. Lafond and R.H. McKenzie, Impact of sampling depth on differences in soil carbon stocks in long-term Agroecosystem experiments, *Soil Science Society America Journal*, 2011, 75 (1), pp. 226–234.

УДК 631.4
DOI: 10.19047/0136-1694-2020-101-202-219

Ссылки для цитирования:
Иванов И.В., Замотаев И.В. Научные идеи почвоведа-географа В.М. Фридланда, их истоки и развитие (к 100-летию со дня рождения) // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2020. Вып. 101. С. 202-219. DOI: 10.19047/0136-1694-2020-101-202-219

Cite this article as:
Ivanov I.V., Zamotaev I.V., Scientific ideas of pedologist-geographer V.M. Fridland, their origins and development (to the 100th anniversary), Dokuchaev Soil Bulletin, 2020, V. 101, pp. 202-219, DOI: 10.19047/0136-1694-2020-101-202-219

Благодарность:
Исследование выполнено в рамках Государственных заданий Института физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН тема № 0191-2019-0046 и Института географии РАН тема № 0148-2019-0006.

Acknowledgments:
The studies were carried out in the framework of the scientific Government assignments for both Institute of Physical, Chemical and Biological Problems in Soil Science issue No. 0191-2019-0046 and for Institute of Geography issue No. 0148-2019-0006.

Научные идеи почвоведа-географа В. М. Фридланда, их истоки и развитие (к 100-летию со дня рождения)

© 2020 г. И. В. Иванов[1], И. В. Замотаев[2]

[1]Институт физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН – обособленное подразделение ФИЦ ПНЦБИ РАН, Россия, 142290, г. Пущино, ул. Институтская, д. 2, к. 2,
e-mail: ivanov-v-28@mail.ru.

[2]Институт географии РАН, Россия, 119017, Москва, Старомонетный переулок, д. 29, стр. 4,
e-mail: zivigran@rambler.ru.

Поступила в редакцию 27.02.2020, *после доработки* 01.03.2020, *принята к публикации* 04.03.2020

Резюме: В.М. Фридланд (1919–1983) – выдающийся советский почвовед-географ и картограф, окончил МГУ имени М.В. Ломоносова, доктор

географических наук, профессор, лауреат премии имени В.В. Докучаева АН СССР. Разработал учение о структуре почвенного покрова. Главный редактор и автор карт: Почвенной карты РСФСР, масштаб 1 :2 500 000 (1988); Учебной почвенной карты мира, масштаб 1 : 15 000 000 (1984). Один из первых российских исследователей почв влажных и аридных тропиков и субтропиков, автор классификаций почв СССР, ряда книг о почвах. Статья представляет собой доклад на пленарном заседании "Третьей Всероссийской открытой конференции "Почвенные и земельные ресурсы: состояние, оценка, использование" к 100-летию со дня рождения В.М. Фридланда", проведенной Почвенным институтом и Обществом почвоведов им. В.В. Докучаева 9–11декабря 2019 года в Москве.

Ключевые слова: В.М. Фридланд, структура почвенного покрова, Почвенная карта России, классификация почв.

Scientific ideas of pedologist-geographer V.M. Fridland, their origins and development (to the 100th anniversary)

I. V. Ivanov[1], I .V. Zamotaev[2]

[1]*Institute of Physical, Chemical and Biological Problems in Soil Science, Russian Academy of Sciences,*
2 Bld. 2 Institutskaya Str.., Puschino 142290, Russian Federation,
e-mail: ivanov-v-28@mail.ru.

[2]*Institute of Geography, Russian Academy of Sciences,*
29 Staromonetniy lane., Moscow 119017, Russian Federation,
e-mail: zivigran@rambler.ru.

Received 27.02.2020, *Revised* 01.03.2020, *Accepted* 04.03.2020

Abstract: V.M. Fridland (1919–1983) – distinguished Soviet pedologist-geographer and cartographer, graduated from Moscow State University, Doctor of geographical sciences, Professor, laureate of the Dokuchaev Prize of USSR Academy of Sciences. He developed the doctrine of the structure of soil cover. Editor-in-chief and author of Soil maps: RSFSR, scale 1 :2 500 000 (1988); Educational Soil Map of the World, scale 1 : 15 000 000 (1984). One of the first Russian soil researchers of humid and arid tropics and subtropics, author of the USSR soil classifications, and of a number of books on soils.

Keywords: V.M. Fridland, the structure of soil cover, Soil map of Russia, soil classification.

Статья – доклад на пленарном заседании "Третьей Всероссийской открытой конференции "Почвенные и земельные ресурсы: состояние, оценка, использование" к 100-летию со дня рождения В.М. Фридланда", проведенной Почвенным институтом и Обществом почвоведов им. В.В. Докучаева 9–11декабря 2019 г. в Москве.

Основные вехи жизни. Выдающийся советский ученый почвовед-географ Владимир Маркович Фридланд (24.12.1919–03.10.1983) родился в г. Новомосковск (ныне Украина). В 1937 г. поступил в МГУ им. М.В. Ломоносова на почвенно-географический факультет, окончил его в 1941 г. как выпускник геолого-почвенного факультета по специальности "почвоведение". В 1941–1944 гг. – он слушатель Высшего военного гидрометеорологического института Красной Армии в Москве, с декабря 1944 по декабрь 1945 г. – инженер-синоптик Черноморского флота в г. Севастополь.

Основная деятельность В.М. Фридланда прошла в Почвенном институте им. В.В. Докучаева: 1945–1948 гг. – аспирант (рук. – чл.-корр. АН СССР зав. отделом И.П. Герасимов), 1948–1962 гг. – младший (по 1954 г.) и старший научный сотрудник отдела генезиса, географии и классификации почв, 1962–1964 гг. – и. о. зав. отделом крупномасштабной почвенной картографии, в 1970–1983 гг. – зав. отделом генезиса, географии и классификации почв. В 1965–1970 гг. В.М Фридланд – с. н. с. Института географии АН СССР. В 1949 г. он защитил кандидатскую диссертацию (к. г.-м. н., "Опыт изучения вертикальной зональности почв Большого Кавказа"), в 1964 г. – докторскую диссертацию (д. геогр. н., "Почвы и коры выветривания влажных тропиков на примере Северного Вьетнама"). С 1964 г. – с. н. с., 1974 г. – профессор, 1983 г. – лауреат премии имени В.В. Докучаева АН СССР. Награжден орденом Трудового Красного Знамени, орденом Труда ДРВ.

В.М. Фридланд активно участвовал в общественной научной жизни. С 1950 г. он – член Всесоюзного общества почвоведов, с 1956 г. – секретарь оргкомитета по созыву его 1-го съезда, в 1964 г. (на 3-ем съезде) избран вице-президентом ВОП. Был председателем Межведомственной комиссии по классификации почв

ВАСХНИЛ и ГКНТ, вице-президентом Советско-Пакистанского общества культурных связей, членом многих научных комиссий, представлял советских почвоведов на международных совещаниях и конгрессах. Под руководством В.М. Фридланда защищено около 19 кандидатских диссертаций, пять его соратников стали докторами наук (В.П. Белобров, В.С. Столбовой, Э.Н. Молчанов, И.И. Лебедева, Е.М. Наумов).

Круг научных интересов ВМ. Фридланда был широким. Рассмотрим важнейшие из его научных достижений (Фридланд Владимир Михайлович…, 2019).

Структура почвенного покрова (СПП). В.М. Фридланд разработал учение о СПП на основании всестороннего и глубокого обобщения идей о неоднородности почвенного покрова, высказанных В.В. Докучаевым, Н.М. Сибирцевым, С.А. Захаровым, Н.А. Димо, Я.Н. Афанасьевым, С.С. Неуструевым, Н.Д. Понагайбо, Г.А. Маландиным, Е.Н. Ивановой, исследователями разных стран. Были учтены представления Г.Н. Высоцкого об ороклиматических закономерностях размещения почв, Милна – о “катенах”, Б.Б. Полынова и М.А. Глазовской о геохимических сопряжениях по рельефу. В науку были введены понятия об элементарном почвенном ареале и его характеристиках, о почвенных комбинациях (общее понятие о неоднородностях почвенного покрова), о группах почвенных комбинаций (мозаики, ташеты, комплексы, сочетания, вариации, пятнистости и др.) (Фридланд, 1965, 1972, 1984). Проблема СПП увлекла В.М. Фридланда уже при первых полевых исследованиях в южной тайге (в Приокско-Террасном заповеднике) и при изучении комплексного почвенного покрова Прикаспийской низменности. Вместе с Е.Н. Ивановой он обратил внимание на сходство комплексности почвенного покрова полярных и аридных территорий, что придало проблеме еще более фундаментальный характер. В рецензии на книгу В.М. Фридланда 1972 г. было отмечено, что с изучением СПП исследование почв становится не только “профильным”, но и “пространственным” и объемным (Крупеников, 1974).

В.М. Фридланд организовал пять конференций, посвященных различным аспектам изучения СПП с изданием тезисов и трудов (1969, 1971, 1975, 1978, 1980, 1983). Число публикаций по

проблеме СПП увеличилось за 30 лет в 10 раз: от одной сотни за неполное столетие до 1965 г. до 1000 к 1991 г. (Структура…, 1980; Козловский, Горячкин, 1993). За рубежом аналогичные исследования также усилились. В.М. Фридланд лично посвятил проблеме СПП более 50 работ. Ядро учения было разработано им достаточно детально, остальные направления были намечены (Добровольский, 1993).

В процессе развития учения о СПП при жизни его основателя и впоследствии было высказано немало новых идей и оценок. Отмечалось преобладание в классификации СПП статичных геометрических форм, отсутствие среди факторов формирования СПП времени и климата, необходимость концептуальных динамических и экспериментальных моделей СПП (Апарин, 2007). С.В. Горячкин (2007) подчеркнул, что в настоящее время учение о СПП находится принципиально в иной научно-технической среде по сравнению со временем своего основания. Предложена идея функционально-эволюционного подхода (Козловский, 1992; Козловский, Горячкин, 1993). Отмечалась теснейшая связь СПП с учением о ландшафтах (Кирюшин, 2013), целесообразность применения бассейнового подхода, элементов метода “пластики рельефа” (Корсунов и др., 2002; Савин, 2019), которые отражают общий тренд развития территории. Ключом к объяснению формирования ландшафтов и структуры почвенного покрова может служить идея типов геохимических сопряжений (Глазовская, 1964) (первоначально было выделено 12 типов: водно-поверхностно-почвенный; водно-грунтовый; водно-поверхностно-почвенный потускулярный; водно-почвенно-эрозионный; дефляционный и др.). Устно и письменно М.А. Глазовская отмечала важность использования идеи сезонного расчленения гидрографа стока (Воронков, 1955) для познания механизма динамики почв и ландшафтов. В США структура почвенного покрова получила название почвенных ландшафтов (Красильников, Таргульян, 2019). Сборник американских ученых под редакцией Хоула и Кэмпбелла (1985) был посвящен памяти В.М. Фридланда. Появилось учебное пособие (Скрябина, 2007). Учение о СПП под разными названиями продолжает развиваться, хотя и медленнее чем в первые десятилетия, и сохраняет свой потенциал.

Почвенная карта РСФСФ, 1988, масштаб ***1 : 2.5 млн***. Ее составление – вторая по значимости заслуга В.М. Фридланда. Работа над Почвенной картой СССР масштаба 1 : 2.5 млн началась с обсуждения проекта ее программы в 1971 г. (Программа…, 1972). К 1980 г. авторский макет карты на всю территорию СССР был завершен. Однако начавшаяся "перестройка" и распад единого государства привели к прекращению работы над картой. Она была издана только в 1989 г. на территорию России (16 листов, тир. 4000 экз.). Пояснительная записка к карте – книга "Почвенный покров и земельные ресурсы Российской Федерации" (2001).

Почвенный покров показан на карте наложением четырех слоев контуров: 1) типов и подтипов почв с буквенными индексами и цветовым заполнением; 2) основных видов СПП, показанных цветной штриховкой; 3) гранулометрического и петрографического состава почвообразующих пород: черной штриховкой – рыхлые породы, черными значками – плотные породы; 4) положение почв по рельефу – равнинное и горное (наклонные цветные полосы). Такого детального изображения почвенного покрова не имеют другие крупные страны мира. На карте использовано около 205 названий почв и показано размещение их около 25 000 контуров почв (Единый…, 2014). Содержание карты дополнено двумя картосхемами: 1. Сельскохозяйственное использование и структура почвенного покрова; 2. Почвенно-экологическое районирование – в масштабе 1 : 15 000 000, – которые разработаны Н.Н. Розовым, В.М. Фридландом и Е.Н. Рудневой; и двумя таблицами: 1. Параметры атмосферных и почвенных режимов по природным зонам равнинных и горных территорий России; 2. Сельскохозяйственные угодья по экономическим районам и природно-сельскохозяйственным зонам. Приведен список 88 авторов карты из многих учреждений систем ВАСХНИЛ, АНСССР, Госагропрома. Титульное учреждение – Почвенный институт имени В.В. Докучаева.

Карта стала основой для главных почвенных документов страны: Национального атласа почв России (Добровольский и др., 2011), Единого государственного кадастра почвенных ресурсов России (Единый…, 2014) и др. Карта оцифрована, переведена в формат ГИС, доступна международным организациям. К сожа-

лению, В.М. Фридланд не успел выполнить новое фундаментальное обобщение о почвах страны. В.М. Фридландом были составлены и другие почвенные карты (Учебная…, 1979; Учебная…, 1980).

Классификация почв. В научной деятельности В.М. Фридланда важное место занимала разработка классификации почв. В 1949–1967 гг. он участвовал в составлении "Указаний по классификации и диагностике почв" (руководители Е.Н. Иванова и Н.Н. Розов), ему принадлежала ведущая роль в подготовке "Классификации и диагностики почв СССР" (1977). Важная особенность последней – выделение фациальных подтипов почв (Фридланд, 1975). "Классификация…, 1977" была официально утверждена и служила руководящим документом при выполнении крупномасштабных почвенных съемок, бонитировки и оценки земель сельскохозяйственного назначения. При подготовке Почвенной карты масштаба 1 :2 500 000 список почв был расширен за счет горных и лесных почв, не вошедших в классификацию 1977 г. Все типы и группы почвы получили более детальную характеристику для диагностики. Вопрос о базовой научной классификации почв по-прежнему оставался очень актуальным. Это было связано с появлением Почвенной карты Мира ФАО-ЮНЕСКО и легенды к ней, с разработкой Soil Taxonomy, World Reference (1994) (WRB…, 2017), с теоретическими классификационными построениями М.А. Глазовской, Б.Г. Розанова, И.П. Герасимова и идеями о почве-памяти и почве-моменте В.О. Таргульяна и И.А. Соколова и др. В конце своей жизни В.М. Фридланд приступил к работе над универсальной базовой классификацией почв, включавшей профильную генетическую, литологическую и режимную компоненты (Градусов и др., 1986; Фридланд, 1980б, 1982, 1986). Новейшие классификации почв России (Классификация и диагностика…, 2004; Полевой определитель…, 2008), созданные последователями В.М. Фридланда (Л.Л. Шишов, В.Д. Тонконогов, И.И. Лебедева, М.И.Герасимова), лишь частично соответствуют его начальному замыслу. Будущее покажет, удастся ли реализовать трехкомпонентную схему классификации почв (Герасимова, 2019).

В.М. Фридланд опубликовал значительное число интересных статей по вопросам географии почв: о роли соляных куполов

в почвообразовании, о зональной зрелости и др. (Фридланд, 1951, 1953, 1958, 1959, 1962, 1970, 1977, 1978, 1980а). Он посвятил статьи научному творчеству С.С. Неуструева, Л.И. Прасолова, И.П. Герасимова, В. Кубиены, С.А. Захарова (Фридланд, 1975, 1976, 1956, 1980), опубликовал свыше 20 рецензий и заметок о научных конференциях.

Изучение кор выветривания (КВ) и почв влажных и сухих тропиков, субтропиков (Сев. Вьетнам, Пакистан, Индонезия, Закавказье), наряду с СПП, было излюбленной темой В.М. Фридланда (Фридланд, 1961, 1962, 1964, 1968; Добровольский, 1964). Им были рассмотрены вопросы формирования развитых профилей КВ под влажными тропическими лесами при длительном (10^{4-5} лет) выветривании и образования сингенетичных и синхронных им кислых фульватных, текстурно-дифференцированных, фито- и зоотурбированных почв. Показаны существенные различия между КВ и почвами на кислых и основных породах, широкое развитие восстановительных процессов, образование на кислых породах горизонтов железистых конкреций и латеритов. Выявлены особенности формировании железистого латерита в гидроморфных условиях и его отличия от ферраллитизации – накопления продуктов, обогащенных алюминием, железом, и сильно обедненных кремнием. Показано уменьшение химических различий между свойствами почв на кислых и основных породах по сравнению с КВ на них. В основу классификации тропических почв Вьетнама положены различия минералогического состава по содержанию галлуазита, гиббсита и каолинита. Детальное изучение особенностей почв и кор выветривания аридных территорий Западного Пакистана дало важнейший материал для сравнительной характеристики с почвами и КВ влажных тропиков (Фридланд, 1968). Впервые были получены данные об особенностях структуры почвенного покрова тропиков и субтропиков.

В.М. Фридландом (Почвы на древних…, 1979) исследовались каштановые почвы и черноземы в Актюбинской, Оренбургской областях и подзолистые почвы в Свердловской области на палеозойских и мезозойских тропических корах выветривания Зауральского плато и возвышенности Мугоджары. Были изучены особенности современных почв на древних тропических корах

выветривания в сравнении с почвами на лессовых породах, а также выявлена минералогическая трансформация и дифференциация минеральной массы тропических кор в ходе современных процессов почвообразования в разных почвенных горизонтах подзолистых и каштановых почв, черноземов, солонцов и солодей.

Изучение В.М. Фридландом кор выветривания проводилось в русле научного направления Б.Б. Полынова (1934) и И.И. Гинзбурга (1947). Полученные В.М Фридландом научные результаты были подтверждены последующими исследованиями И.П. Герасимова и А.И. Ромашкевич (Ромашкевич, 1974), А.Г. Черняховского (Замотаев, Черняховский, 1996), Б.П. Градусова. Следует отметить, что подходы к разделению тропических почв В.М. Фридландом и в WRB (WRB…, 2017) (выделение нитисолей, акрисолей, алисолей и др.), заметно разделенные во времени (1960–1990-е гг.), оказались весьма близкими и основанными на оценке степени выветрелости и характера текстурной дифференциации почвенной массы.

Всего В.М. Фридландом было опубликовано около 300 работ. Из них: монографий без соавторов – 7, в соавторстве – 3, типографски изданных карт – 14, статей в журнале “Почвоведение” – 67 (в том числе: информационных заметок – 9, статей об ученых – 5, рецензий –15) (Материалы…, 1999), публикаций на иностранных языках ~ 25.

В заключение сделаем несколько эпистемологических выводов. В.М. Фридланд наиболее часто пользовался индуктивным методом. От фактов он старался далеко не отходить. Его научный метод не был похож на методы И.П. Герасимова, В.А. Ковды, Р.С. Ильина, В.Р. Вильямса. Рискнем предположить, что по стилю научной работы В.М. Фридланд наиболее близок к Л.И. Прасолову и К.Д. Глинке. Фридланд В.М. любил работать с большим фактическим материалом. Диапазон рассмотренных им вопросов – от философских, картографических и до геохимических – показывает, что его потенциал ученого был реализован не полностью. Закончим сообщение словами ученика В.М. Фридланда – Виктора Петровича Белоброва: “Владимир Маркович Фридланд … аккумулировал в себе черты, присущие ученым и всем родившимся под знаком Стрельца – любителям природы, путешествий и в ка-

кой-то степени искателям приключений на непознанной почве знаний. Высокий и стройный, красивый, вежливый со всеми … галантный с женщинами всех возрастов, он оставался при этом строгим, взыскательным … и чрезвычайно работоспособным человеком. Библиофил и эрудит, с трепетом относившийся к трудам предшественников, он всегда смотрел вперед, туда, где любимое почвоведение соприкасается с другими смежными и параллельными науками, в частности с философией, которой он отдавал заметный приоритет, легко видимый в его классических научных трудах. … Владимир Маркович не чужд был юмора. Как ничто другое, это отражало его внутреннюю свободу, способность переносить неприятности и невзгоды …" (Белобров, 2012).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Апарин Б.Ф.* Учение о структуре почвенного покрова: новые вызовы. Матер. Междунар. научн. конф. "Пространственно-временная организация почвенного покрова: теоретические и прикладные аспекты". СПб: Изд. Дом С.-ПбГУ, 2007. С. 5–8.
2. Библиографический справочник: Материалы, опубликованные в журнале "Почвоведение" за 100 лет. М.: Наука, 1999. 630 с.
3. *Белобров В.П.* Владимир Маркович Фридланд. В нашем доме на Старомонетном, на выселках и в поле. М.: Тов. науч. изданий КМК, 2012. С. 504–507.
4. *Воронков П.П.* Формирование химического состава поверхностных вод степной и лесостепной зон Европейской территории СССР. М.: Гидрометеоиздат, 1955. 353 с.
5. *Герасимова М.И.* Классификация почв России: путь к следующей версии // Почвоведение. 2019. № 1. С. 32–42.
6. *Гинзбург И.И.* Древняя кора выветривания на ультраосновных породах Урала. Труды ГИН АН СССР. Вып. 81. М.: Изд-во АН СССР, 1947. С. 1–132.
7. *Глазовская М.А.* Геохимические основы типологии и методики исследований природных ландшафтов. М.: Изд-во Москов. ун-та, 1964. 230 с.
8. *Горячкин С.В.* Теория и подходы к изучению почвенного покрова: современное состояние в мировой науке и перспективы развития // Мат. междунар. науч. конф. "Пространственно-временная организация почвенного покрова: теоретические и прикладные аспекты". СПб: Изд. Дом СПбГУ, 2007. С. 12–14.

9. *Градусов Б.П., Фридланд В.М., Чижикова Н.П.* Литолого-минералогическая компонента генетической классификации почв. Успехи почвоведения. М., 1986. С. 196–201.
10. *Добровольский Г.В.* Интересное исследование тропических почв // Почвоведение. 1965. № 12. С. 103–105.
11. *Добровольский Г.В.* Развитие учения о структуре почвенного покрова как раздела географии почв // Почвоведение. 1993. № 7. С. 5–11.
12. Единый государственный реестр почвенных ресурсов России. Коллективная монография / Гл. ред. А.Л. Иванов, С.А. Шоба. М.: Почвенный институт им. В.В. Докучаева Россельхозакадеми, 2014. 760 с.
13. *Замотаев И.В., Черняховский А.Г.* Внутрипочвенное выветривание как отражение эндогенных и экзогенных взаимодействий // Почвоведение. 1996. № 4. С. 454–461.
14. *Кирюшин В.И.* Агрономическое почвоведение. СПб.: Квадро, 2013. 680 с.
15. Классификация и диагностика почв России. Смоленск, 2004. 342 с.
16. Классификация и диагностика почв СССР. М.: Колос, 1977. 224 с.
17. *Козловский Ф.И.* Пути и перспективы дальнейшего развития структуры почвенного покрова // Почвоведение. 1992. № 4. С. 5–14.
18. *Козловский Ф.И.*, *Горячкин С.В.* Современное состояние и пути развития теории развития почвенного покрова // Почвоведение. 1993. № 7. С. 31–43.
19. *Корсунов В.М., Красеха Е.Н., Ральдин Б.Б.* Методология почвенных эколого-географических исследований и картографии почв. Улан-Удэ: из-во Бурятского научного центра СО РАН, 2002. 232 с.
20. *Красильников П.В., Таргульян В.О.* На пути к новой географии почв: вызовы и решения (обзор) // Почвоведение. 2019. № 2. С. 131–139.
21. *Крупеников И.А.* Новый подход к характеристике почвенного покрова // Почвоведение. 1974. № 3. С. 125–126.
22. Национальный атлас почв Российской Федерации / под ред. С.А. Шобы. М.: АСТРЕЛЬ, 2011. 632 с.
23. Полевой определитель почв России. М., 2008. 182 с.
24. *Полынов Б.Б.* Кора выветривания. М.-Л.: Из-во АН СССР. 1934. 242 с.
25. Почвенная карта РСФСР масштаба 1 : 2 500 000 / под ред. *В.М. Фридланда*. М.: ГУГК, 1988. 16 листов.
26. Почвенная карта Нечерноземной зоны СССР в масштабе 1 : 1.5 млн. М.: ГУГК, 1978. 4 листа.
27. Почвенный покров и земельные ресурсы Российской Федерации. М.: Почвенный институт имени В.В. Докучаева, 2001. 400 с.
28. Почвы на древних корах выветривания / под ред. В.В. Егорова. Науч. тр. Почвенного института имени В.В. Докучаева. М., 1979. 160 с.

29. *Ромашкевич А.И.* Почвы и коры выветривания влажных субтропиков Западной Грузии. М.: Наука, 1974. 218 с.
30. *Савин И.Ю., Жоголев А.В., Прудникова Е.Ю.* Современные тренды и проблемы почвенной картографии // Почвоведение. 2019. № 5. С. 517–528.
31. *Скрябина О.А.* Структура почвенного покрова и методы ее изучения. Пермь: ПТСХА, 2007. 206 с.
32. *Столбовой В.С., Белобров В.П., Молчанов Э.Н., Савин И.Ю., Иванов И.В., Колесникова Л.Г.* Фридланд Владимирович Маркович к 100-летию со дня рождения / под. ред. *А.Л. Иванова*. М.: ФГБНУ Почвенный институт имени В.В. Докучаева, 2019. 64 с.
33. Структура почвенного покрова (библиографический указатель отечественной литературы за 1969–1979 гг.). Минск, 1980. 156 с.
34. Учебная Почвенная карта Мира для средней школы в масштабе 1 : 20 млн. М.: ГУГК, 1979.
35. Учебная Почвенная карта мира в масштабе 1 : 15 млн для Высших учебных заведений (М.А. Глазовская, В.М. Фридланд). М.: ГУГК, 1980.
36. *Фридланд В.М.* Опыт почвенно-географического разделения горных систем СССР // Почвоведение. 1951. № 9. С. 521–535.
37. *Фридланд В.М.* Соляные купола и засоление почв Прикаспийской низменности // Вопросы географии. Сб. 33. М.: Географгиз, 1953. С. 261–275.
38. *Фридланд В.М.* Об оподзоливании и иллимеризации (обезылливание) // Почвоведение. 1958. № 1. С. 27–38.
39. *Фридланд В.М.* К вопросу о факторах зональности // Изв. АН СССР, сер. географ., 1959, № 5. С. 22–37.
40. *Фридланд В.М.* Природа Северного Вьетнама. М.: изд-во АН СССР, 1961. 175 с.
41. *Фридланд В.М.* Почвы и коры выветривания влажных тропиков на примере Северного Вьетнама / под ред. Е.Н. Ивановой. М.: Наука, 1964. 312 с.
42. *Фридланд В.М.* Тропические почвы рисовых полей на примере Северного Вьетнама. В кн.: Генезис и география почв зарубежных стран по исследованиям советских географов. М., 1964. С. 76–110.
43. *Фридланд В.М.* О структуре (строении) почвенного покрова // Почвоведение. 1965. № 4. С. 15–26.
44. *Фридланд В.М.* Почвы и коры выветривания Западного Пакистана. В кн.: Генезис и география почв зарубежных стран по исследованиям советских географов. Доклады к 10-му Междун. Конгрессу почвоведов. 1968. С. 153–115.

45. *Фридланд В.М.* Влияние степени выветрелости почвообразующих пород на процессы формирования почв в различных биоклиматических зонах // Почвоведение. 1970. № 12. С. 5–15.
46. *Фридланд В.М.* Структура почвенного покрова. М.: Мысль, 1972. 423 с.
47. *Фридланд В.М.* Учение о фациях в почвоведении // Изв. АН СССР, сер. геогр., 1975, № 6. С. 11–17.
48. *Фридланд В.М.* Классификация структур почвенного покрова и типизация земель // Почвоведение. 1980а. № 11. С. 5–17.
49. *Фридланд В.М.* Основы профильно-генетического компонента базовой классификации почв // Почвоведение. 1980б. № 6. С. 106–118.
50. *Фридланд В.М.* Индексы и определения почвенных горизонтов // Почвоведение. 1982. № 12. С. 122–130.
51. *Фридланд В.М.* Структуры почвенного покрова Мира. М.: Мысль, 1984. 235 с.
52. *Фридланд В.М.* Проблемы географии, генезиса и классификации почв. М.: Наука, 1986. 243 с.
53. *Фридланд В.М., Бондарев А.Г., Градусов Б.П., Кузнецова И.В., Тонконогов В.Д., Чижикова Н.П.* Сравнительная характеристика дерново-подзолистых почв Европейской России и лессивированных почв Франции // Генезис, география и картография почв. Науч. тр. Почв. ин-та, М., 2000. С. 29–76.
54. *Фридланд В.М., Буяновский Г.А.* Просто Земля. М.: Просвещение, 1977. 143 с.
55. *Фридланд В.М., Караева З.С.* О происхождении кислых засоленных почв // Почвоведение. 1962. № 7. С. 77–81.
56. *Фридланд В.М., Караваева Н.А., Руднева, Н.А. и др.* Программа почвенной карты СССР масштаба 1 : 2 500 000. М., 1972.
57. *Hole F.D., Campbell J.B.* Soil landcape analysis. Rowman 8l Allanheld Publishers. 1985. 216 p.
58. IUSS Working Group WRB. 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, 2015. 202 p.

REFERENCES

1. Aparin B.F., Uchenie o strukture pochvennogo pokrova: novye vyzovy (The doctrine of the structure of soil cover: new challenges), Proc. Intern. Conf. "*Spatio-temporal organization of soil cover: theoretical and applied aspects*", St. Petersburg: Izd. Dom SPbGU, 2007, pp. 5–8.

2. *Bibliograficheskii spravochnik: Materialy, opublikovannye v zhurnale "Pochvovedenie" za 100 let* (Bibliographic reference: Materials published in the journal "Soil Science" over 100 years), Moscow: Nauka, 1999, 630 p.
3. Belobrov V.P., *Vladimir Markovich Fridland. V nashem dome na Staromonetnom, na vyselkakh i v pole* (Vladimir Markovich Friedland. In our house on Staromonetny, on settlements and in the field), Moscow: Tov. nauch. izdanii KMK, 2012, pp. 504–507.
4. Voronkov P.P., *Formirovanie khimicheskogo sostava poverkhnostnykh vod stepnoi i lesostepnoi zon Evropeiskoi territorii SSSR* (The formation of the chemical composition of surface water in the steppe and forest-steppe zones of the European territory of the USSR), Moscow: Gidrometeoizdat, 1955, 353 p.
5. Gerasimova M.I., Klassifikatsiya pochv Rossii: put' k sleduyushchei versii (Russian Soil Classification: The Path to the Next Version), *Pochvovedenie*, 2019, No. 1, pp. 32–42.
6. Ginzburg I.I., Drevnyaya kora vyvetrivaniya na ul'traosnovnykh porodakh Urala (Ancient weathering crust on ultrabasic rocks of the Urals), *Trudy GIN AN SSSR*, Iss. 81, Moscow: Izd-vo AN SSSR, 1947, pp. 1–132.
7. Glazovskaya M.A., *Geokhimicheskie osnovy tipologii i metodiki issledovanii prirodnykh landshaftov* (Geochemical foundations of typology and research methods of natural landscapes), Moscow: Izd-vo Moskov. un-ta, 1964, 230 p.
8. Goryachkin S.V., Teoriya i podkhody k izucheniyu pochvennogo pokrova: sovremennoe sostoyanie v mirovoi nauke i perspektivy razvitiya (Theory and approaches to the study of soil cover: current status in world science and development prospects), Proc. Intern. Conf. "*Spatio-temporal organization of soil cover: theoretical and applied aspects*", St. Petersburg: Izd. Dom SPbGU, 2007, pp. 12–14.
9. Gradusov B.P., Fridland V.M., Chizhikova N.P., Litologo-mineralogicheskaya komponenta geneticheskoi klassifikatsii pochv (Lithological and mineralogical component of the genetic classification of soils), In: *Uspekhi pochvovedeniya* (Advances in soil science), Moscow, 1986, pp. 196–201.
10. Dobrovol'skii G.V., Interesnoe issledovanie tropicheskikh pochv (An interesting study of tropical soils), *Pochvovedenie*, 1965, No. 12, pp. 103–105.
11. Dobrovol'skii G.V., Razvitie ucheniya o strukture pochvennogo pokrova kak razdela geografii pochv (The development of the doctrine of the structure of soil cover as a section of soil geography), *Pochvovedenie*, 1993, No. 7, pp. 5–11.
12. Ivanov A.L., Shoba S.A. (Eds), *Edinyi gosudarstvennyi reestr pochvennykh resursov Rossii* (Unified State Register of Soil Resources of Russia), Moscow: V.V. Dokuchaev Soil Science Institute, 2014, 760 p.

13. Zamotaev I.V., Chernyakhovskii A.G., Vnutripochvennoe vyvetrivanie kak otrazhenie endogennykh i ekzogennykh vzaimodeistvii (Intrasoil weathering as a reflection of endogenous and exogenous interactions), *Pochvovedenie*, 1996, No. 4, pp. 454–461.
14. Kiryushin V.I., *Agronomicheskoe pochvovedenie* (Agronomic soil science), St. Petersburg: Kvadro, 2013, 680 p.
15. *Klassifikatsiya i diagnostika pochv Rossii* (Classification and diagnostics of Russian soils), Smolensk, 2004, 342 p.
16. *Klassifikatsiya i diagnostika pochv SSSR* (Classification and soil diagnostics of the USSR), Moscow: Kolos, 1977, 224 p.
17. Kozlovskii F.I., Puti i perspektivy dal'neishego razvitiya struktury pochvennogo pokrova (Ways and prospects of further development of soil cover structure), *Pochvovedenie*, 1992, No. 4, pp. 5–14.
18. Kozlovskii F.I., Goryachkin S.V., Sovremennoe sostoyanie i puti razvitiya teorii razvitiya pochvennogo pokrova (The current state and development paths of the theory of development of soil cover), *Pochvovedenie*, 1993, No. 7, pp. 31–43.
19. Korsunov V.M., Krasekha E.N., Ral'din B.B., *Metodologiya pochvennykh ekologo-geograficheskikh issledovanii i kartografii pochv* (Methodology of soil ecological and geographical research and soil mapping), Ulan-Ude: iz-vo Buryatskogo nauchnogo tsentra SO RAN, 2002, 232 p.
20. Krasil'nikov P.V., Targul'yan V.O., Na puti k novoi geografii pochv: vyzovy i resheniya (obzor) (On the way to a new geography of soils: challenges and solutions (review)), *Pochvovedenie*, 2019, No. 2, pp. 131–139.
21. Krupenikov I.A., Novyi podkhod k kharakteristike pochvennogo pokrova (A new approach to the characterization of soil cover), *Pochvovedenie*, 1974, No. 3, pp. 125–126.
22. Shoba S.A., *Natsional'nyi atlas pochv Rossiiskoi Federatsii* (National Atlas of Soils of the Russian Federation), Moscow: ASTREL, 2011, 632 p.
23. *Polevoi opredelitel' pochv Rossii* (Field determinant of Russian soils), Moscow, 2008, 182 p.
24. Polynov B.B., *Kora vyvetrivaniya* (Weathering crust), Moscow-Leningrad: Iz-vo AN SSSR, 1934, 242 p.
25. *Pochvennaya karta RSFSR masshtaba 1 : 2 500 000,* V.M. Fridland (Ed.) (Soil map of the RSFSR, scale 1 : 2 500 000), Moscow: GUGK, 1988, 16 sheets.
26. *Pochvennaya karta Nechernozemnoi zony SSSR v masshtabe 1 : 1.5 mln.* (Soil map of the Non-chernozem zone of the USSR on a scale of 1 : 1.5 million), Moscow: GUGK, 1978, 4 sheets.

27. *Pochvennyi pokrov i zemel'nye resursy Rossiiskoi Federatsii* (Soil cover and land resources of the Russian Federation), Moscow: V.V. Dokuchaev Soil Science Institute, 2001, 400 p.
28. *Pochvy na drevnikh korakh vyvetrivaniya*, V.V. Egorov (Ed.) (Soils on ancient weathering crusts), Nauch. tr. Pochvennogo instituta imeni V.V. Dokuchaeva, Moscow, 1979, 160 p.
29. Romashkevich A.I., *Pochvy i kory vyvetrivaniya vlazhnykh subtropikov Zapadnoi Gruzii* (Soils and weathering crust of wet subtropics of Western Georgia), Moscow: Nauka, 1974, 218 p.
30. Savin I.Yu., Zhogolev A.V., Prudnikova E.Yu., Sovremennye trendy i problemy pochvennoi kartografii (Modern trends and problems of soil cartography), *Pochvovedenie*, 2019, No. 5, pp. 517–528.
31. Skryabina O.A., *Struktura pochvennogo pokrova i metody ee izucheniya* (The structure of the soil cover and methods for its study), Perm': PTSKhA, 2007, 206 p.
32. Stolbovoi V.S., Belobrov V.P., Molchanov E.N., Savin I.Yu., Ivanov I.V., Kolesnikova L.G., *Fridland Vladimirovich Markovich k 100-letiyu so dnya rozhdeniya*, A.L. Ivanov (Ed.) (Fridland Vladimirovich Markovich, to the 100th anniversary), Moscow: V.V. Dokuchaev Soil Science Institute, 2019, 64 p.
33. *Struktura pochvennogo pokrova (bibliograficheskii ukazatel' otechestvennoi literatury za 1969–1979)* (The structure of the soil cover (bibliographic index of Russian literature for 1969–1979 period)), Minsk, 1980, 156 p.
34. *Uchebnaya Pochvennaya karta Mira dlya srednei shkoly v masshtabe 1 : 20 M* (Educational Soil World Map for high school on a scale of 1: 20 million), Moscow: GUGK, 1979.
35. *Uchebnaya Pochvennaya karta mira v masshtabe 1 : 15 mln dlya Vysshikh uchebnykh zavedenii*, M.A. Glazovskaya, V.M. Fridland (Eds), (Educational Soil map of the world on a scale of 1 : 15 million for higher education institutions), Moscow: GUGK, 1980.
36. Fridland V.M., Opyt pochvenno-geograficheskogo razdeleniya gornykh sistem SSSR (Experience in the soil-geographical separation of the USSR mountain systems), *Pochvovedenie*, 1951, No. 9, pp. 521–535.
37. Fridland V.M., Solyanye kupola i zasolenie pochv Prikaspiiskoi nizmennosti (Salt domes and salinization of soils of the Caspian lowland), In: *Voprosy geografii* (Questions of geography), Vol. 33, Moscow: Geografgiz, 1953, pp. 261–275.
38. Fridland V.M., Ob opodzolivanii i illimerizatsii (obezyllivanie) (About podzolization and illimerization (silt removal)), *Pochvovedenie*, 1958, No. 1, pp. 27–38.

39. Fridland V.M., K voprosu o faktorakh zonal'nosti (To the question of zoning factors), *Izv. AN SSSR*, ser. geograf., 1959, No. 5, pp. 22–37.
40. Fridland V.M., *Priroda Severnogo V'etnama* (The nature of North Vietnam), Moscow: izd-vo AN SSSR, 1961, 175 p.
41. Fridland V.M., *Pochvy i kory vyvetrivaniya vlazhnykh tropikov na primere Severnogo V'etnama* (Soils and crusts of weathering of moist tropics on the example of North Vietnam), E.N. Ivanova (Ed.), Moscow: Nauka, 1964, 312 p.
42. Fridland V.M., Tropicheskie pochvy risovykh polei na primere Severnogo V'etnama (Tropical soils of rice fields by the example of North Vietnam), In: *Genezis i geografiya pochv zarubezhnykh stran po issledovaniyam sovetskikh geografov* (Genesis and geography of soils of foreign countries according to research by Soviet geographers), Moscow, 1964, pp. 76–110.
43. Fridland V.M., O strukture (stroenii) pochvennogo pokrova (On the structure (structure) of soil cover), *Pochvovedenie*, 1965, No. 4, pp. 15–26.
44. Fridland V.M., Pochvy i kory vyvetrivaniya Zapadnogo Pakistana (Soil and weathering crust of Western Pakistan), In: *Genezis i geografiya pochv zarubezhnykh stran po issledovaniyam sovetskikh geografov* (Genesis and geography of soils of foreign countries according to research by Soviet geographers), Moscow, 1968, pp. 153–115.
45. Fridland V.M., Vliyanie stepeni vyvetrelosti pochvoobrazuyushchikh porod na protsessy formirovaniya pochv v razlichnykh bioklimaticheskikh zonakh (The influence of parent rock weathering degree on the processes of soil formation in various bioclimatic zones), *Pochvovedenie*, 1970, No. 12, pp. 5–15.
46. Fridland V.M., *Struktura pochvennogo pokrova* (The structure of the soil cover), Moscow: Mysl', 1972, 423 p.
47. Fridland V.M., Uchenie o fatsiyakh v pochvovedenii (The doctrine of facies in soil science), *Izv. AN SSSR*, ser. geogr., 1975, No. 6, pp. 11–17.
48. Fridland V.M., Klassifikatsiya struktur pochvennogo pokrova i tipizatsiya zemel' (Classification of soil cover structures and land typification), *Pochvovedenie*, 1980a, No. 11, pp. 5–17.
49. Fridland V.M., Osnovy profil'no-geneticheskogo komponenta bazovoi klassifikatsii pochv (Fundamentals of the profile and genetic component of the basic classification of soils), *Pochvovedenie*, 1980b, No. 6, pp. 106–118.
50. Fridland V.M., Indeksy i opredeleniya pochvennykh gorizontov (Indices and definitions of soil horizons), *Pochvovedenie*, 1982, No. 12, pp. 122–130.
51. Fridland V.M., *Struktury pochvennogo pokrova Mira* (Structures of the soil cover of the World), Moscow: Mysl', 1984, 235 p.

52. Fridland V.M., *Problemy geografii, genezisa i klassifikatsii pochv* (Problems of geography, genesis and classification of soils), Moscow: Nauka, 1986, 243 p.
53. Fridland V.M., Bondarev A.G., Gradusov B.P., Kuznetsova I.V., Tonkonogov V.D., Chizhikova N.P., Sravnitel'naya kharakteristika dernovo-podzolistykh pochv Evropeiskoi Rossii i lessivirovannykh pochv Frantsii (Comparative characteristics of sod-podzolic soils of European Russia and lessivage in soils of France), In: *Genezis, geografiya i kartografiya pochv* (Genesis, geography and cartography of soils), Nauch. tr. Pochv. in-ta, Moscow, 2000, pp. 29–76.
54. Fridland V.M., Buyanovskii G.A., *Prosto Zemlya* (The soil only), Moscow: Prosveshchenie, 1977, 143 p.
55. Fridland V.M., Karaeva Z.S., O proiskhozhdenii kislykh zasolennykh pochv (About the origin of acid saline soils), *Pochvovedenie*, 1962, No. 7, pp. 77–81.
56. Fridland V.M., Karavaeva N.A., Rudneva N.A. et al., *Programma pochvennoi karty SSSR masshtaba 1 : 2 500 000* (The program of the soil map of the USSR on a scale of 1 : 2 500 000), Moscow, 1972.
57. Hole F.D., Campbell J.B., *Soil landcape analysis*, Rowman 8l Allanheld Publishers, 1985, 216 p.
58. IUSS Working Group WRB. *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, 2015, 202 p.

Научное издание

Бюллетень Почвенного института
имени В.В. Докучаева

101

Главный редактор *А.Л. Иванов*

Заместитель главного редактора *И.Ю. Савин*

Редактор, компьютерная верстка *А.Ю. Романовская*

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

Сдано в набор 25.03.2020 г.
Подписано в печать 25.03.2020 г.
Формат 60×84/16. Бумага офсетная.
Усл. печ. л. 12,7 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