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

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

БЮЛЛЕТЕНЬ

ПОЧВЕННОГО ИНСТИТУТА имени В.В. ДОКУЧАЕВА

Выпуск 103

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)

Volume 103

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 им. Н. Пушкарова, Болгария)

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

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

Editorial board:

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

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

© Federal Research Centre "V.V. Dokuchaev Soil Science Institute", 2020

СОДЕРЖАНИЕ

Статьи

Анализ сведений о площади засоленных почв России на конец XX и начало XXI веков
Панкова Е.И., Горохова И.Н. 5

Создание электронной карты плодородия почв Карелии
Новиков С.Г. 34

Особенности элементного состава почв Пур-Тазовского междуречья
Московченко Д.В., Романенко Е.А. 51

Выход денсиметрических фракций из типичных черноземов разного землепользования
Фарходов Ю.Р., Ярославцева Н.В., Яшин М.А., Хохлов С.Ф., Ильин Б.С., Лазарев В.И., Холодов В.А. 85

Возможности использования реологических параметров почв в качестве физических показателей трансформации их структурного состояния
Клюева В.В., Хайдапова Д.Д. 108

Электрофизические и геоинформационные методы картографирования биологических свойств торфоземов
Позднякова А.Д., Поздняков Л.А. 149

Ранжирование кислых почв по приоритетности проведения известкования в Российской Федерации
Иванов А.Л., Столбовой В.С., Гребенников А.М., Оглезнев А.К., Петросян Р.Д., Шилов П.М. 168

Генеалогическое древо современного российского почвоведения
Савин И.Ю. 188

Научные рецензии

Новое прочтение
Апарин Б.Ф. 211

CONTENTS

Scientific articles

Analysis of information about the alkaline soil areas in Russia at the end of the XX and beginning of the XXI centuries
Pankova E.I., Gorokhova I.N. *5*

Producing the digital soil fertility map of Karelia
Novikov S.G. *34*

Elemental composition of soils of the Pur-Taz interfluve
Moskovchenko D.V., Romanenko E.A. *51*

The yield values of densimetric fractions from typical chernozems of different land use types
Farkhodov Yu.R., Yaroslavtseva N.V., Yashin M.A., Khokhlov S.F., Iliyn B.S., Lazarev V.I., Kholodov V.A. *85*

Possibilities of using rheological parameters as physical indicators of soil structural changes
Klyueva V.V., Khaydapova D.D. *108*

Electrophysical and geoinformational methods of mapping the biological properties of peats
Pozdnyakova A.D., Pozdnyakov L.A. *149*

Ranking of acidic soils by priority of liming in the Russian Federation
Ivanov A.L., Stolbovoy V.S., Grebennikov A.M., Ogleznev A.K., Petrosyan R.D., Shilov P.M. *168*

Genealogical tree of modern Russian Soil Science
Savin I.Yu. *188*

Reviews

New reading
Aparin B.F. *211*

СТАТЬИ

УДК 631.4

DOI: 10.19047/0136-1694-2020-103-5-33

Ссылки для цитирования:
Панкова Е.И., Горохова И.Н. Анализ сведений о площади засоленных почв России на конец XX и начало XXI веков // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2020. Вып. 103. С. 5-33. DOI: 10.19047/0136-1694-2020-103-5-33

Cite this article as:
Pankova E.I., Gorokhova I.N., Analysis of information about the alkaline soil areas in Russia at the end of the XX and beginning of the XXI centuries, Dokuchaev Soil Bulletin, 2020, V. 103, pp. 5-33, DOI: 10.19047/0136-1694-2020-103-5-33

Анализ сведений о площади засоленных почв России на конец XX и начало XXI веков

© 2020 г. Е. И. Панкова, И. Н. Горохова*

ФИЦ "Почвенный институт им. В.В. Докучаева", Россия, 119017, Москва, Пыжевский пер, 7, стр. 2,
https://orcid.org/0000-0002-0428-3330, e-mail: g-irina14@yandex.ru.

Поступила в редакцию 23.05.2020, *после доработки* 13.08.2020, *принята к публикации* 10.09.2020

Резюме: В статье даны определения понятий "засоленные" и "засоленно-солонцовые почвы". На основе обобщения материалов конца XX и начала XXI веков приведены опубликованные в разных источниках данные о площадях засоленных почв в почвенном фонде страны и на землях сельскохозяйственных угодий Российской Федерации. Показано, что данные, приведенные в Государственных докладах 2016 и 2019 гг., в монографии "Глобальный климат и почвенный покров России" (2019), а также в других анализируемых источниках, не всегда совпадают и не позволяют получить четкого представления о площадях засоленных почв на территории страны и в пределах ее сельскохозяйственных угодий, а главное, ознакомиться и оценить методические подходы, используемые в настоящее время для получения информации о распространении и изменении площади засоленных и засоленно-солонцовых почв на территории отдельных регионов страны и России в целом. Приведенные

в статье материалы свидетельствуют о том, что данные о площадях засоленных, и в том числе засоленно-солонцовых почв, нуждаются в уточнении на основе современных дистанционных методов и наземного почвенного картографирования. При этом необходимы разработка и утверждение единых методических подходов для учета засоленных и засоленно-солонцовых почв на территории Российской Федерации. Отмечено, что площади орошаемых земель нуждаются в самостоятельном мониторинге и выделении их из общего фонда сельскохозяйственных угодий, а также необходимо отдельно учитывать залежные, засоленные и солонцовые почвы на орошаемых землях.

Ключевые слова: засоленные почвы, засоленно-солонцовые почвы, сельскохозяйственные угодья, орошаемые земли, площадь засоленных почв.

Analysis of information about the alkaline soil areas in Russia at the end of the XX and beginning of the XXI centuries

E. I. Pankova, I. N. Gorokhova*

Federal Research Centre "V.V. Dokuchaev Soil Science Institute",
7 Bld. 2 Pyzhevskiy per., Moscow 119017, Russian Federation,
https://orcid.org/000-0002-0428-3330, e-mail: g-irina14@yandex.ru.

Received 23.05.2020, *Revised* 13.08.2020, *Accepted* 10.09.2020

Abstract: The definitions of "alkaline" and "alkaline-solonetzic soils" are given in the paper. The data on the alkaline soils distribution in the national Soil Fund and in Russian agricultural areas are represented based on the summary of materials from late XX and early XXI centuries. It is shown that the data provided in the State reports of 2016 and 2019, in the monograph "Global climate and soil cover of Russia" (2019) and in other reviewed sources do not always coincide and do not allow us to get a clear idea about the alkaline soils distribution throughout the territory of the country and within the agricultural lands. However, the most important issue is to become acquainted and evaluate methodological approaches, currently used to obtain information about the distribution and changes of alkaline and alkaline-solonetzic soils on the territory of certain regions of the country and Russia as a whole. The materials presented in the paper indicate that the data on the areas of alkaline and alkaline-solonetzic soils need to be clarified on the basis of state-of-the-art remote sensing methods and ground-based soil mapping. At the same time, it is necessary to develop and approve unified methodological

approaches for consideration of alkaline and alkaline-solonetzic soils on the territory of the Russian Federation. It is noted that the areas of irrigated lands need to be independently monitored and separated from the total Soil Fund of agricultural land, as well as a separate calculation of fallow, alkaline and solonetzic soils on irrigated land.

Keywords: alkaline soils, alkaline-solonetzic soils, agricultural land, irrigated land, alkaline soil area.

ВВЕДЕНИЕ

Для оценки качества и стоимости земель необходимо иметь четкое представление о свойствах почв, определяющих и ограничивающих их плодородие. К числу таких свойств относятся засоленность и солонцеватость почв. Данные свойства наиболее широко распространены в почвах Южных регионов России, поэтому их необходимо учитывать: 1) в почвенном фонде страны; 2) на землях сельскохозяйственных угодий и в том числе отдельно на орошаемых землях.

Засоленность почв является крайне динамичным свойством, требующим постоянного контроля над процессом засоления-рассоления на основе мониторинга, особенно в условиях аридизации климата. Однако в настоящее время в открытых источниках сведения о методах, используемых для учета площадей засоленных почв, и достоверные данные о площадях засоленных почв в пределах страны не приводятся. Не дается также определение понятия “засоленные почвы”, которые должны подлежать учету, не указано, в каком слое почвы необходимо учитывать наличие легкорастворимых солей для отнесения почв к категории засоленных, а солонцы и солонцовые почвы не всегда рассматриваются и учитываются как засоленные.

Часто засоление и солонцеватость почв рассматривают в совокупности с другими деградационными процессами (эрозией, дефляцией и др.). В книге “Деградация земель и опустынивание в России…” (2019) определена доля деградированных земель по отдельным субъектам Российской Федерации за период 2000–2015 гг. Показано, что на землях южных регионов страны (Астраханская, Оренбургская, Саратовская, Волгоградская и Ростовская области, Краснодарский край и Крым) наблюдается явное проявле-

ние деградационных процессов, включая засоление и осолонцевание почв, которые охватывают от 20 до 66.9% площади земель регионов.

Согласно статье "Почвенные ресурсы России – современные вызовы" (Столбовой, 2018), 79% солонцов или щелочно-глинистых дифференцированных почв используются в сельском хозяйстве. Также широко используются (83%) малогумусовые аккумулятивно-карбонатные почвы, в состав которых входят светло-каштановые и бурые полупустынные почвы, которые в большинстве своем относятся к солонцовым и засоленным. Это говорит о том, что большая часть засоленных почв используется в сельскохозяйственном производстве и потому нуждается в учете и постоянном контроле за их состоянием.

Целью данной статьи является анализ опубликованных материалов о площадях засоленных и засоленно-солонцовых почв России на конец XX и первые десятилетия XXI века. Информация о распространении засоленных почв рассматривается в статье отдельно: а) для почвенного и земельного фонда страны; б) для сельскохозяйственных угодий, включая орошаемые земли.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Объектом исследований являются засоленные и засоленно-солонцовые почвы России. Метод исследований – сравнительный анализ опубликованных данных о площадях засоленных почв России на конец XX и начало XXI веков.

Засоленные почвы (Salt affected soils) – это большая группа почв разного генезиса и свойств, объединенная одним диагностическим признаком – наличием в профиле почв легкорастворимых солей в количестве, ухудшающем развитие растений и снижающем плодородие почв. Среди засоленных почв выделяют: 1) почвы засоленные нейтральными солями (Saline soils) – хлоридные и сульфатные; 2) почвы засоленные щелочными солями (Alkaline soils) – содовые и с участием соды; 3) почвы со структурным (солонцовым) горизонтом (Solonetz soils), которые могут быть засолены как нейтральными, так и щелочными солями.

Согласно принятым критериям, к реально засоленным почвам относятся почвы, содержащие хотя бы в одном горизонте поч-

венного профиля до глубины 1 метра легкорастворимые токсичные соли в количестве, превышающем указанные ниже пороги.

По данным анализа водной вытяжки 1 : 5, пороги токсичности по отдельным ионам составляют: по Cl^- – 0.3 смоль(экв)/кг почвы, по SO_4^{2-} (связанному с Na^+ и Mg^{2+}) – 1.7 смоль(экв)/кг почвы, $HCO_{3\,токс.}^-$ (связанному с Na^+ и Mg^{2+}) – 0.8 смоль(экв)/кг почвы и $HCO_{3\,общ.}^-$ – 1.4 смоль(экв)/кг почвы (Общесоюзная инструкция по почвенному обследованию…, 1973). По сумме легкорастворимых солей водной вытяжки 1 : 5 к засоленным относятся почвы при хлоридном и содовом засолении, содержащие >0.1% солей, при сульфатном (без гипса) – >0.3%, а с учетом растворимого гипса – >1–1.2% (Общесоюзная инструкция по почвенному обследованию…, 1973; Засоленные почвы России, 2006). При наличии легкорастворимых солей во втором метре почвенного профиля почвы относятся к глубокозасоленным. Они также должны подлежать учету, т. к. являются опасными для культур, имеющих глубокую корневую систему, и в связи с тем, что при промачивании почв соли из второго метра легко мигрируют в верхние слои почвенного профиля. Для мелиоративных целей важно также учитывать содержание легкорастворимых солей в слое глубже 2 м и в грунтовых водах, находящихся на небольшой глубине (около 3–4 м). Почвы, содержащие легкорастворимые соли на глубине 2–5 м, относятся к потенциально засоленным.

Таким образом, при учете площадей засоленных почв необходимо указывать глубину расположения солевого горизонта, мощность солевого горизонта, состав и количество солей.

Среди засоленных почв выделяется особая группа засоленно-солонцовых почв. Часто солонцовые почвы учитываются отдельно от других засоленных почв, поскольку они наряду с засолением легкорастворимыми солями обладают специфическим свойством – плотным, столбчато-глыбистым, набухающим солонцовым горизонтом, содержащим поглощенный натрий, который усложняет использование и мелиорацию этих почв. Солонцовые почвы часто имеют щелочную реакцию. Почвы солонцового ряда, как правило, содержат в своем профиле легкорастворимые соли, поэтому они должны учитываться как засоленные почвы и быть включены в общую площадь засоленных почв. К сожалению, во

многих официальных источниках не указано, включены ли солонцовые почвы в категорию засоленных или подсчитаны отдельно.

Засоленные почвы (включая солонцовые) делят на природно засоленные, в которых засоление – результат природных почвенных процессов, и вторично засоленные, в которых засоление обусловлено антропогенным воздействием. Вторичное засоление в настоящее время рассматривается как основной деградационный почвенный процесс, ограничивающий плодородие орошаемых почв засушливых регионов разных стран мира, в том числе и в России.

В заключение еще раз подчеркнем, что все почвы, содержащие в своем профиле легкорастворимые соли, относящиеся к природно и вторично засоленным, с солонцовым горизонтом и без него, должны подлежать учету как засоленные почвы. При этом следует выделять: 1) собственно засоленные почвы (0–1 м); 2) глубокозасоленные почвы (1–2 м); 3) потенциально засоленные почвы (2–5 м); 4) засоленно-солонцовые почвы (0–1 м). Такое выделение тем более актуально, что засоленные почвы – огромный потенциал почвенного фонда страны, который в настоящее время и в перспективе может использоваться в сельскохозяйственном производстве.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Известно, что в России засоленные (в том числе солонцовые) почвы широко распространены в южных регионах страны: на юге Восточно-Европейской равнины и Западно-Сибирской низменности, меньшую площадь они занимают на юге Центральной и Восточной Сибири, а также на Дальнем Востоке. Основная часть их приурочена к зоне активного сельскохозяйственного использования земель, поэтому учет и оценка засоленных почв имеют большое практическое значение.

Площади засоленных почв в почвенном и земельном фонде России

Почвенный фонд в РФ представляет собой территории, занятые почвенными образованиями без учета водных, каменистых, песчаных и других непочвенных поверхностей, а земельный фонд

состоит из площади страны или площади отдельных субъектов федерации.

Согласно имеющимся опубликованным данным, площади разных типов почв в пределах России определялись, главным образом, по картографическим материалам (Почвенная карта РСФСР, М 1 : 2 500 000, 1988). В работах В.С. Столбового и Б.В. Шеремета (Столбовой, Шеремет, 1997) и в коллективной монографии Почвенного института им. В.В. Докучаева "Почвенный покров и земельные ресурсы Российской Федерации" (2001) приведены сведения о площадях разных типов почв России на конец XX века. В первом случае даны площади, подсчитанные на основе Почвенной карты М 1 : 5 000 000, которая была составлена путем генерализации Почвенной карты РСФСР М 1 : 2 500 000 (1988). В работе "Почвенный покров…" (2001) площади почв были определены непосредственно по контурам Почвенной карты РСФСР М 1 : 2 500 000 (1988). Естественно, что площади в указанных работах несколько различаются между собой. Такие различия связаны с генерализацией карты более крупного масштаба в мелкий. В работе В.С. Столбового и Б.В. Шеремета (Столбовой, Шеремет, 1997) к засоленным отнесен отдел галоморфных почв, в который включены солончаки и маршевые засоленные почвы, и отдел щелочных глинисто-дифференцированных почв, в который входят солонцы. В сумме почвы этих двух отделов составляют 0.81% от общего почвенного фонда страны, что соответствует 13 513.79 тыс. га. В книге "Почвенный покров…" (2001) к категории засоленных почв отнесены солончаки, солонцы и солоди, которые занимают 0.84% (13 744.69 тыс. га) от общего почвенного фонда России. Таким образом, судя по указанным работам, при подсчете площадей в категорию засоленных почв не были включены почвы солончаковые, солончаковатые и солонцеватые, относящиеся к разным генетическим типам – черноземам, каштановым, бурым полупустынным, лугово-черноземным, лугово-каштановым, различным гидроморфным, в том числе аллювиальным засоленным и солонцеватым почвам и их комплексам с другими почвами. По нашему мнению, эти почвы наряду с солончаками и солонцами следует относить к засоленным, так как они в большинстве случаев, находясь в южных засушливых регионах страны, накапливают

в своем профиле легкорастворимые соли. Сказанное выше определило необходимость пересчета площадей почв, которые, по предлагаемым нами критериям, относятся к категории засоленных почв. Согласно таким подходам все солонцеватые, солончаковые и солончаковатые почвы различных генетических типов были отнесены к категории засоленных почв, поэтому при подсчете, сделанном нами по материалам В.С. Столбового и Б.В. Шеремета (Столбовой, Шеремет, 1997), засоленные почвы составили 43 377.6 тыс. га, или 2.6% от площади почвенного фонда страны, а по данным, приведенным в работе "Почвенный покров…" (2001), – 53 997.0 тыс. га, или 3.3% от площади почв России (табл. 1, 2).

Приведенные данные (табл. 1, 2) имеются в монографии "Засоленные почвы России" (2006). Кроме того, в монографии на каждую административную область, в пределах которой выделены засоленные почвы, составлена карта засоления, даны описания свойств почв и аналитические материалы, иллюстрирующие региональные особенности засоленных почв на территории России. При этом в категорию засоленных почв были включены как засоленные почвы без структурного солонцового горизонта, так и солонцовые почвы, содержащие соли в верхнем метре почвенного профиля.

За последние 20 лет в Российской Федерации картографические сведения о распространении засоленных почв были представлены в открытом доступе в Национальном электронном атласе России (https://xn--80aaaa1bhnclcci1cl5c4ep.xn--p1ai/cd2/index.html). Однако данные о площадях засоленных почв в атласе не приводятся.

В отделе Генезиса и мелиорации засоленных и солонцовых почв Почвенного института им. В.В. Докучаева в 2003 г. была создана Карта засоления почв России на основе Почвенной карты РСФСР (1988) и региональных почвенных карт более крупного масштаба[1].

[1] Схема развития и размещения мелиорации и водного хозяйства СССР / Серия почвенно-мелиоративных карт СССР М 1 : 500 000. М: Союзводпроект, 1987.

Таблица 1. Площадь засоленных почв России (по материалам В.С. Столбового, Б.В. Шеремета (1997)
Table 1. Area of saline soils in Russia, thousand hectares (based on V.S. Stolbovoi, B.V. Sheremet (1997)

Почвы	Площадь, тыс. га	% от общей площади
Отдел аккумулятивно-гумусовых почв		
Черноземы солонцеватые	2 491.0	0.15
Лугово-черноземные солонцеватые и солончаковатые	8 393.9	0.50
Темно-каштановые солонцеватые и солончаковатые	2 447.0	0.15
Каштановые солонцеватые и солончаковатые	3 444.2	0.21
Светло-каштановые солонцеватые и солончаковатые	2 483.7	0.15
Лугово-каштановые солонцеватые	545.2	0. 03
Луговые солонцеватые и солончаковатые	5 497.0	0.33
Лугово-болотные солонцеватые и солончаковатые	740.2	0.04
Отдел малогумусных аккумулятивно-карбонатных почв		
Бурые солончаковатые и солончаковые	2 817.4	0.17
Отдел щелочных глинисто-дифференцированных почв		
Солонцы автоморфные	2 560.2	0.15
Солонцы луговые (полугидроморфные)	4 599.4	0.28
Солонцы луговые гидроморфные	3 998.1	0.24
Отдел галоморфных почв		
Солончаки типичные	636.4	0.04
Солончаки луговые	340.6	0.02
Маршевые засоленные и солонцеватые	1 417.6	0.08
Отдел аллювиальных почв		
Аллювиальные засоленные	965.7	0.06
Итого:	43 377.6	2.60

Таблица 2. Площадь засоленных почв России (по материалам "Почвенный покров…", 2001)
Table 2. Area of saline soils in Russia, thousand hectares (based on the materials "Soil cover…", 2001)

Почвы	Площадь, тыс. га	% от общей площади
Черноземы солонцеватые	2 844.8	0.2
Лугово-черноземные солонцеватые и солончаковатые	7 402.0	0.5
Темно-каштановые солонцеватые и солончаковатые	1 704.1	0.1
Каштановые солонцеватые	386.8	0.02
Светло-каштановые солонцеватые и солончаковые	1 530.4	0.09
Светло-каштановые солонцеватые и солончаковатые	957.6	0.05
Лугово-каштановые солонцеватые	371.5	0.02
Бурые солонцеватые и солончаковатые	1 193.4	0.07
Лугово-болотные солончаковатые и солонцеватые	1 549.0	0.09
Торфяные болотные солончаковатые	177.4	0.01
Луговые солонцеватые и солончаковатые	3 973.8	0.2
Луговые солонцеватые и солончаковые	378.0	0.02
Солоди	1 588.9	0.1
Солонцы автоморфные	3 071.7	0.2
Солонцы полугидроморфные	2 432.2	0.15
Солонцы гидроморфные	4 895.4	0.3
Солончаки типичные	664.9	0.04
Солончаки соровые	83.5	0.005
Солончаки луговые	579.6	0.04
Пойменные засоленные	2 797.2	0.2
Маршевые засоленные и солонцеватые	5 821.0	0.35

Почвы	**Площадь, тыс. га**	**% от общей площади**
Сочетания и комплексы		
Черноземы солонцеватые и солонцы (автоморфные)	52.2	0.002
Темно-каштановые солонцеватые и солончаковатые и солонцы	336.9	0.02
Каштановые солонцеватые и солончаковатые и солонцы	1 606.2	0.1
Светло-каштановые солонцеватые и солончаковатые и солонцы	888.2	0.05
Лугово-черноземные солонцеватые и солончаковатые и солонцы полугидроморфные	431.2	0.03
Солонцы автоморфные и светло-каштановые солонцеватые и солончаковатые	305.0	0.02
Каштановые, лугово-каштановые и солонцы полугидроморфные	272.6	0.02
Темно-каштановые солонцеватые и солончаковатые, солонцы полугидроморфные и лугово-каштановые	179.3	0.01
Светло-каштановые солонцеватые и солончаковатые, солонцы полугидроморфные и лугово-каштановые	646.4	0.04
Солонцы полугидроморфные, лугово-каштановые и светло-каштановые солонцеватые и солончаковатые	193.2	0.01
Солонцы полугидроморфные, светло-каштановые солонцеватые и солончаковатые и лугово-каштановые	734.9	0.04
Солонцы полугидроморфные и лугово-черноземные	78.9	0.003
Солонцы полугидроморфные и лугово-каштановые	39.8	0.001
Бурые солонцеватые и солонцы автоморфные	1 621.8	0.1
Солонцы гидроморфные и солончаки (луговые) типичные	281.7	0.01
Луговые солонцеватые и солончаковатые и солонцы гидроморфные	63.6	0.002
Итого площадь засоленных почв	53 997.0	3.3

Карта засоления почв России (2003) в масштабе 1 : 2 500 000 до сих пор не издана, и имеется только ее авторский экземпляр. Главными редакторами карты являются академик Л.Л. Шишов, д. с.-х. н. Е.И. Панкова и к. с.-х. н. А.Ф. Новикова. Составителями карты стал большой коллектив сотрудников Почвенного института и ряда региональных институтов России (Западной и Восточной Сибири, Якутии и др.). Данная карта была опубликована лишь в виде фрагментов и по отдельным областям России (Панкова, Новикова, 2002; Засоленные почвы России, 2006). Затем сотрудниками Почвенного института им. В.В. Докучаева Карта засоления почв России (2003) была откорректирована на основе материалов космической съемки и создана в электронном варианте, где были подсчитаны площади засоленных почв по отдельным регионам России. Подход к созданию электронной карты был дифференцированным: созданы отдельные слои, которые отражают долю засоленных почв в слое 0–1 м, 1–2 м, потенциально засоленные почвы на глубине 2–5 м, преобладающую степень и химизм засоленных почв и др. Подсчет площадей по данной карте проводился по глубине залегания, степени и химизму засоления почв, что необходимо учитывать при обработке и мелиорации засоленных почв (Хитров и др., 2009; Черноусенко и др., 2011).

В статье “Почвенные ресурсы России – современные вызовы” (Столбовой, 2018) приводятся данные, согласно которым общий земельный фонд России составляет 1 709.8 млн га (без учета Крыма), почвенный фонд РФ составляет 1 586.7 млн га, из них щелочные глинисто-дифференцированные (т. е. солонцовые) составляют 12.5 млн га (1% от земельного фонда), а собственно галоморфные (засоленные) почвы составляют 2 млн га (<1%) земельного фонда страны. В книге “Глобальный климат и почвенный покров России” (Т. 2, 2019) указаны следующие цифры: площадь всего земельного фонда страны составляет 1 712.3 млн га, включая Крым. Примерно 7% земель занято непочвенными образованиями, а почвенный фонд России составляет 1 586.7 млн га (93%), т. е. площади почвенного фонда России приводятся без учета Крыма. Там же в таблице на с. 79 даны сведения о щелочных глинисто-дифференцированных (12.5 млн га) и галоморфных (2 млн га) почвах без учета засоленных и солонцовых почв Крыма.

Кроме того, в таблице полностью отсутствуют галоморфные почвы на сельскохозяйственных угодьях (0), что не соответствует действительности.

В 2014 г. под эгидой Минсельхоза в Почвенном институте им. В.В. Докучаева создан "Единый государственный реестр почвенных ресурсов России" (электронная версия egrpr.esoil.ru), который призван министерством считаться официальным источником информации о почвах России. В данном реестре почвы всех административных единиц страны представлены в % от площади региона. На рисунке 1 показана карта административного деления РФ, на которой значком помечены регионы, где распространены засоленные и засоленно-солонцовые почвы.

В таблице 3 приведены площади засоленных и засоленно-солонцовых почв в 33 регионах страны, рассчитанные согласно реестру. Общая площадь по нашим подсчетам составила 664.41 тыс. кв. км или 66.441 млн га (3.9% от земельного фонда России), что больше приведенных цифр выше. Это связано с более детальным учетом всех засоленных и засоленно-солонцовых почв в России. Однако в реестре не даны площади засоленных почв Республики Крым.

Таким образом, приведенные материалы свидетельствуют о том, что сведения о площадях распространения засоленных и солонцовых почв в почвенном и земельном фонде России очень разняться и постоянно уточняются.

Площадь засоленных почв на сельскохозяйственных угодьях России

Прежде чем перейти к анализу площадей засоленных почв на сельскохозяйственных угодьях России, дадим определения понятий "земли сельскохозяйственного назначения" и "сельскохозяйственные угодья", чтобы лучше ориентироваться в справочных материалах.

Земли сельскохозяйственного назначения – это земли, в составе которых выделяются сельскохозяйственные угодья, а также земли, занятые лесополосами, внутрихозяйственными дорогами, коммуникациями, замкнутыми водоемами, строениями и др., то есть всем тем, что необходимо для функционирования сельского

хозяйства (Государственный (национальный) доклад…, 2016).

Сельскохозяйственные угодья – это земельные угодья, систематически используемые для получения сельскохозяйственной продукции. В состав земель сельскохозяйственных угодий входят пашня, залежь, сенокосы, пастбища и многолетние насаждения (искусственно созданные древесные и кустарниковые растения) (Государственный (национальный) доклад…, 2016). Земли сельскохозяйственных угодий подлежат особой государственной охране и постоянному учету.

До 2000 г. Комитет Российской Федерации по земельным ресурсам (РОСКОМЗЕМ), получая данные крупномасштабных почвенных съемок на территории хозяйств и районов, обобщал их для получения информации по областям, экономическим районам, республикам и в целом по России. По последним сведениям этого ведомства (на 01.01.1996 г., Качественная характеристика…, 1996), сельскохозяйственные угодья на территории России составляли 183 416.3 тыс. га, среди них засоленные почвы (из 96.14% всех обследованных почв) составляли 16 304.2 тыс. га (8.9%), а почвы солонцовых комплексов – 22 938.7 тыс. га (12.5%), в сумме – 39 242.9 тыс. га или 21.4% (табл. 4). Указывается, что в отдельных административных областях площади засоленных и засоленно-солонцовых почв составляли более 40% от площади сельскохозяйственных угодий, а в ряде областей – 50–60% (Республики Калмыкия, Дагестан, Астраханская, Новосибирская, Омская области) (Качественная характеристика…, 1996). При этом в отдельных регионах (например, Республика Калмыкия) в сумме площадь засоленных (2 653.2 тыс. га) и засоленно-солонцовых (4 342.2 тыс. га) почв превышает площадь сельскохозяйственных угодий (5 421.4 тыс. га) и составляет более 100%, что свидетельствует о двойном подсчете ряда почв из-за нечеткости определения “засоленные почвы”.

Рис. 1. Карта административных единиц России и регионов с засоленными и засоленно-солонцовыми почвами (по данным "Единого государственного реестра почвенных ресурсов России", 2014).
Fig. 1. Map of administrative districts of Russia and regions with saline and saline-alkaline soils (based on the "Unified state register of soil resources of Russia", 2014).

Таблица 3. Площадь засоленных и засоленно-солонцовых почв в земельном фонде субъектов Российской Федерации (Единый государственный реестр почвенных ресурсов России, 2014)
Table 3. Area of saline and saline-alkaline soils in the administrative districts of the Russian Federation (Unified state register of soil resources of Russia, 2014)

№	Субъект РФ	Площадь территории, тыс. кв. км	Площадь засоленных и засоленно-солонцовых почв, %	Площадь засоленных и засоленно-солонцовых почв, тыс. кв. км
1	Алтайский край	168.0	7.6	12.77
2	Архангельская область	589.9	0.1	0.59
3	Астраханская область**	49.0	44.2	21.66
4	Волгоградская область**	112.9	42.1	47.53
5	Забайкальский край	431.9	0.9	3.89
6	Иркутская область	774.8	0.1	0.77
7	Кемеровская область	95.7	0.6	0.57
8	Краснодарский край	75.5	4.1	3.1
9	Красноярский край	2 366.8	0.2	4.73
10	Курганская область**	71.5	46.9	33.53
11	Новосибирская область	177.8	40.6	72.19
12	Омская область	141.1	33.6	47.41
13	Оренбургская область**	123.7	5.3	6.56
14	Приморский край	164.7	0.2	0.33
15	Республика Башкортостан	142.9	0.2	0.28
16	Республика Бурятия	351.3	2.4	8.78
17	Республика Дагестан**	50.3	33.5	16.85
18	Республика Калмыкия**	74.7	83.3	62.22

№	Субъект РФ	Площадь территории, тыс. кв. км	Площадь засоленных и засоленно-солонцовых почв, %	Площадь засоленных и засоленно-солонцовых почв, тыс. кв. км
19	Республика Карелия	180.5	0.2	0.36
20	Республика Саха (Якутия)	3 083.5	0.3	9.25
21	Республика Северная Осетия-Алания	8.0	1.6	0.13
22	Республика Тыва	168.6	0.2	0.34
23	Республика Хакасия	61.6	0.3	0.18
24	Ростовская область**	101.0	20.7	20.91
25	Самарская область**	53.6	1.7	0.91
26	Саратовская область**	101.2	26.7	27.02
27	Свердловская область	194.3	0.1	0.19
28	Ставропольский край**	66.2	24.9	16.48
29	Тюменская область	1 464.2	13.8	202.06
30	Челябинская область	88.5	15.1	13.36
31	Чеченская республика	15.6	11.6	1.81
32	Чукотский автономный округ	721.5	1.7	12.26
33	Ямало-Ненецкий автономный округ	769.3	2.0	15.39
34	Всего			664.41

Примечание.

* – Источник информации о площадях субъектов РФ Росстат (gks.ru).

** – в площадь засоленных и засоленно-солонцовых почв включены площади почвенных комплексов с засоленными почвами.

Таблица 4. Распространение засоленных почв и почв солонцовых комплексов (тыс. га) в пределах сельскохозяйственных угодий природно-сельскохозяйственных районов России (по данным на 01.01.1996 г., составленная по материалам Качественной характеристики…, 1996)
Table 4. Distribution of alkaline soils and soils of alcaline complexes (thousand hectares) in agricultural lands of natural and agricultural regions of Russia (according to the data on 01.01.1996, compiled from the materials of "Qualitative characteristics…", 1996)

№	Природно-сельскохозяйственный район	Площадь с-х угодий	Площадь засоленных почв	Площадь почв солонцовых комплексов	Общая площадь засоленных и солонцо-вых почв	% от площади с-х угодий
1	Северный	2 259	5.1	не опр.	5.1	0.2
2	Центрально-Черноземный	11 664.5	68.7	339.6	469.5	4.0
3	Поволжский	35 908.5	5 337.7	9 719.6	15 057.3	41.9
4	Северо-Кавказский	22 079.4	3 272.6	2 575.6	5 848.2	26.5
5	Уральский	29 524.5	1 342.1	3 721	5 063.1	17.0
6	Западно-Сибирский	29 754.2	5 148.8	6 396.3	11 545.1	38.8
7	Восточно-Сибирский	18 231.5	716	178.2	894.2	4.9
8	Дальневосточный	5 302.9	413.2	8.4	421.6	8.0
9	Российская Федерация	183 416.3	16 304.2	22 938.7	39 242.9	21.4

Согласно “Концепции развития государственного мониторинга земель сельскохозяйственного назначения и земель, используемых для ведения сельского хозяйства в составе земель иных категорий, и формирования государственных информационных ресурсов об этих землях на период до 2020 г.”, утвержденной распоряжением Правительства Российской Федерации от 30.07.2010 № 1292-р., работы по подсчету площадей, выявлению происходящих изменений и развитию негативных процессов на землях сельскохозяйственных угодий осуществляют подведомственные Минсельхозу России учреждения.

Так, агрохимическая служба, служба химизации и сельскохозяйственной радиологии в форме отчетов отправляют свои материалы в Информационную систему Минсельхоза России. Данные службы осуществляют контроль за состоянием почв сельскохозяйственных угодий через систему агропочвенного мониторинга земель, который основан на наземном почвенном обследовании. Такой мониторинг необходим в связи с возрастанием антропогенных нагрузок на почвы. Полученные за последние годы материалы подтверждают важность мониторинга, анализ которого нужен для последующей выработки комплекса агрохимических мероприятий по стабилизации и восстановлению плодородия почв сельскохозяйственных угодий. Однако агрохимический мониторинг не включает в себя сбор данных о площадях и свойствах засоленных почв.

Неопределенность служб, ответственных за сбор информации о засоленных и засоленно-солонцовых почвах, приводит к появлению противоречивых сведений о засоленных почвах на сельскохозяйственных угодьях.

По данным ФГБНУ “Радуга” (табл. 5) (Методы оценки…, 2015), в 2015 г. площадь сельскохозяйственных угодий составила 217.4 млн га, засоленные и солонцовые площади составляют 39.35 млн га или 18.1%.

По данным Государственного (национального) доклада (2016), в 2015 г. площадь сельскохозяйственных угодий составила 222.07 млн га из них водной эрозии подвержено 17.8% площади, ветровой – 8.4%, переувлажненные и заболоченные почвы занимают 12.3%, площадь засоленных и солонцовых почв на сельско-

хозяйственных угодьях составляет 20.1% (44.63 млн га). Всего деградации подвержено 58.6% площади сельскохозяйственных угодий.

Таблица 5. Площади сельскохозяйственных земель России, подверженные деградационным процессам (Методы оценки…, 2015)
Table 5. Areas of agricultural land in Russia affected by salinization and alkalinization processes (Assessment Method…, 2015)

№	Природно-сельскохозяйственные районы	Сельхозугодья, тыс. га	Засоленные и засоленно-солонцовые почвы на землях сельхозугодий, %
1	Северный	2 885	0.8
2	Центрально-Черноземный	13 436	1.9
3	Поволжский	40 639	37.4
4	Северо-Кавказский	24 778	21.1
5	Уральский	35 312	14.8
6	Западно-Сибирский	34 434	35.1
7	Восточно-Сибсирский	23 196	3.8
8	Дальневосточный	7 932	4.3
9	Российская Федерация	217 406	18.1

По данным монографии “Глобальный климат…”, на начало 2019 г. (со ссылкой на Росреестр, 2019) площадь территории России (включая Крым) составляет 1 712.3 млн га, площадь сельскохозяйственных угодий составляет 197.8 млн га, при этом посевная площадь занимает около 80 млн га. Согласно тем же сведениям (с. 183) деградации подвержено 53.3% сельскохозяйственных угодий, в том числе водной эрозии – 18.6%, дефляции – 5.6%, засолению и солонцовому процессу – 18.2%, переувлажнению – 4.6%.

Такая разница в определении площади деградированных земель (58.6% и 53.3%), включая засоленные и солонцовые почвы (20.1% и 18.2%) на сельскохозяйственных угодьях в 2015 и 2019 гг. свидетельствует о разных подходах к подсчету площадей, а не о значительном улучшении состояния почв за столь короткий

срок.

Следует отметить, что площадь сельскохозяйственных угодий в России в последние десятилетия является изменчивой величиной. Это связано с тем, что ликвидируются сельскохозяйственные организации, крестьянские (фермерские) хозяйства и земли этой категории часто отводятся под строительство объектов промышленности, транспорта и связи. Осуществляется отвод земель сельскохозяйственного назначения для строительства нефтегазопроводов, населенных пунктов и т. д. В целом по Российской Федерации за период с 1990 по 2015 гг. площадь сельскохозяйственных угодий сократилась на 342.9 тыс. га. Некоторая компенсация произошла после 2014 г. в результате присоединения Крыма к России (+ 72.5 тыс. га) (Государственный (национальный) доклад…, 2016). Начиная с 2016 г. наблюдается положительная динамика и стабилизация площадей сельскохозяйственных угодий (табл. 6). Вслед за изменением площади сельскохозяйственных угодий меняется в них и доля засоленных почв.

Все приведенные площади обобщены в таблице 7, из которой следует, что сведения по площадям сельскохозяйственных угодий и площадям засоленных, засоленно-солонцовых почв на сельскохозяйственных угодьях России, по разным источникам, различаются даже за близкие даты.

Известно, что существенную долю среди засоленных почв составляют вторично засоленные почвы, образовавшиеся на орошаемых землях. По данным Государственного (национального) доклада (2016) и Доклада о состоянии… (2019), площадь орошаемых земель в России в 2015 г. составила 4 655.5 тыс. га, в 2017 г. – 4 686.7 тыс. га. Из них в неудовлетворительном состоянии (прежде всего, вторично засоленные, солонцовые почвы, а также почвы с высоким уровнем грунтовых вод) составили 1 153.9 и 895.3 тыс. га соответственно, и такое снижение площадей с неудовлетворительным состоянием почв (- 258.6 тыс. га) за два года вполне логично, потому что на орошаемых землях в результате реконструкции оросительных систем, а также из-за сокращения объемов поливов снижается уровень грунтовых вод и происходит рассоление вторично засоленных почв, поскольку процесс вторичного засоления является очень динамичным, и информация о площадях таких

почв может меняться из года в год.

Следует особо выделить проблему учета площади залежи на орошаемых землях, которую часто продолжают подсчитывать как используемые орошаемые земли. Отдельный подсчет площади залежи на орошаемых землях необходим, поскольку производятся значительные затраты на подачу воды и эксплуатацию головных оросительных каналов, а при сокращении объемов поливов вода по каналам проходит вхолостую, и наличие такой залежи приводит к существенным экономическим потерям. По данным Доклада о состоянии… (2019), на начало 2018 г. орошаемых земель в России было 4 686.688 тыс. га, из них использовалось 3 890.510 тыс. га, т. е. 796.178 тыс. га были залежью. На самом деле площадь залежи значительно больше, т. к. учитываются не все заброшенные в настоящее время поля, с чем мы столкнулись при работах на орошаемых землях в Волгоградской области. Выходом из создавшейся ситуации может стать ежегодный дистанционный мониторинг орошаемых земель, который самостоятельно не осуществляется.

На сегодняшний день регулярный дистанционный мониторинг на базе космической информации и наземных исследований по определению площадей, состоянию сельскохозяйственных угодий и почв проводится на уровне ряда субъектов федерации. Для этого созданы и создаются региональные геоинформационные системы (Доклад о состоянии…, 2019). Однако в представленных материалах не дифференцируются орошаемые земли, залежь, природно и вторично засоленные и солонцовые почвы на орошаемых землях, которые из-за динамичности и сложности протекающих почвенных процессов должны определяться и регистрироваться контролирующими органами отдельно, с учетом особенностей орошаемых почв.

Наблюдаемый в анализируемых источниках разброс цифр площадей засоленных и засоленно-солонцовых почв, возможно, связан с тем, что сведения получены разными методами, но ссылок, уточняющих на основе каких материалов получены данные и какие методические подходы использовались для определения площадей засоленных и засоленно-солонцовых почв, в источниках нет. Поэтому для сбора такой информации необходима разработка

нормативных документов, где было бы четко сформулировано понятие “засоленные почвы” и какие почвы следует к ним относить, определен орган, занимающийся обследованием, учетом и мониторингом засоленных почв на базе общей методики учета площадей засоленных и засоленно-солонцовых почв с применением современных материалов дистанционного зондирования и наземных обследований.

Таблица 6. Динамика площади земель сельскохозяйственного назначения и площади сельскохозяйственных угодий, млн га. (Доклад о состоянии…, 2019)
Table 6. Dynamics of agricultural land area, million hectares (Report on the state of…, 2019)

Объект		**Площадь земель с/х назначения**	**В том числе с/х угодья**
2010 г.	млн га	400.0	196.1
	%		49.0
2011 г.	млн га	393.4	196.1
	%		49.8
2012 г.	млн га	389.0	196.3
	%		50.5
2013 г.	млн га	386.1	196.2
	%		50.8
2014 г.	млн га	386.5	196.2
	%		50.76
2015 г.	млн га	385.5	196.2
	%		50.9
2016 г.	млн га	383.7	197.7
	%		51.5
2017 г.	млн га	383.6	197.7
	%		51.5
2018 г.	млн га	383.2	197.8
	%		51.6

Таблица 7. Площадь и доля засоленных почв на сельскохозяйственных угодьях России по разным источникам за разные годы
Table 7. Area and the share of alkaline soils on agricultural lands in Russia according to different sources for different years

	Источник и год, за который получены данные	Общая площадь с/х угодий	Площадь засоленных почв		Площадь солонцовых почв		Суммарная площадь засоленных и солонцовых почв	
		млн га	млн га	%	млн га	%	млн га	%
1	Качественная характеристика…, 1996 (1996 г.)	183.41	16.3	8.9	22.9	12.5	39.20	21.4
2	Проблемы деградациии…, 2008 (2007 г.)	217.40	-	-	-	-	39.35	18.1
3	Государственный (национальный) доклад, 2016 (2015 г.)	222.07	-	-	-	-	39.73	20.1
4	Методы оценки…, 2015 (2015 г.)	217.4	-	-	-	-	39.35	18.1
5	Доклад о состоянии…, Минсельхоз, 2019 (2017 г.)	197.78	-		-	-	39.20	21.4
6	Глобальный климат, 2019 (2018 г.)	197.80	-	-	-	-	36.0	18.2

ВЫВОДЫ

1. Обзор публикаций конца XX и начала XXI веков показал, что понятия засоленные, засоленно-солонцовые, глубокозасоленные, потенциально засоленные почвы нуждаются в уточнении и в их закреплении в нормативных документах. К засоленным почвам необходимо относить почвы, содержащие хотя бы в одном горизонте верхнего метра легкорастворимые соли в количестве, превышающем порог токсичности для растений. При содержании токсичных солей в слое 1–2 м почвы относятся к глубокозасоленным, а глубже 2 м – к потенциально засоленным. Почвы, содержащие солонцовый горизонт, следует относить к категории засоленно-солонцовых, так как они, как правило, содержат в своем профиле легкорастворимые соли, а при наличии солонцового горизонта – характеризуются не только засолением, но и плохими водно-физическими свойствами.

2. В настоящее время сведения о площадях и свойствах засоленных и засоленно-солонцовых почв в почвенном фонде страны и на землях сельскохозяйственных угодий, в том числе на орошаемых землях, нуждаются в уточнении, поскольку данные о площадях этих почв в открытых источниках различаются, при этом часто не указаны сроки проведения съемки и методические подходы, на основе которых проводился учет площадей засоленных почв.

3. Необходима разработка и утверждение единой методики по учету засоленных и засоленно-солонцовых почв в почвенном фонде и на сельскохозяйственных угодьях России, основанной на наземных и дистанционных методах обследования. Только проведение сплошной инвентаризации засоленных и засоленно-солонцовых почв на базе дистанционного мониторинга и наземных полевых съемок по единой методике даст возможность получить объективные и однозначные сведения о площадях распространения и о свойствах засоленных почв.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Глобальный климат и почвенный покров России: оценка рисков и эколого-экономических последствий деградации земель. Адаптивные

системы и технологии рационального природопользования (сельское и лесное хозяйство) / под ред. *А.И. Бедрицкого*). Т. 1. М.: Почвенный ин-т им. В.В. Докучаева, ГЕОС, 2018. 357 с.
2. Глобальный климат и почвенный покров России. Опустынивание и деградация земель, институциональные, инфраструктурные, технологические меры адаптации (сельское и лесное хозяйство). Т. 2. М.: МБА, 2019. 476 с.
3. Государственный (национальный) доклад о состоянии и использовании земель в Российской Федерации в 2015 году. М.: Росреестр, 2016. 202 с.
4. Деградация земель и опустынивание в России: новейшие подходы к анализу проблемы и поиску путей решения / Гл. ред. *Г.С. Куст* и др. М.: "Перо", 2019. 235 с.
5. Доклад о состоянии и использовании земель сельскохозяйственного назначения Российской Федерации в 2017 году. М.: ФГБНУ "Росинформагротех", 2019. 328 с.
6. Единый государственный реестр почвенных ресурсов России. М: Почвенный ин-т им. В.В. Докучаева, 2014. 768 с.
7. Засоление почвы России. М.: ИКЦ "Академкнига", 2006. 854 с.
8. Качественная характеристика и культуртехническое состояние земель Российской федерации на 01.01.1996. М.: Роскомзем, 1996. 141 с.
9. Методы оценки деградации сельскохозяйственных земель. Коломна: ФГБНУ ВНИИ "Радуга", 2015. 32 с.
10. Национальный атлас России. Природа. Экология. М.: Федеральное агенство геодезии и картографии (Роскартография). Т. 2. 2000. URL: https://xn--80aaaa1bhnclcci1cl5c4ep.xn--p1ai/cd2/index.html.
11. Общесоюзная инструкция по почвенным обследованиям и составлению крупномасштабных почвенных карт землепользования. М.: "Колос", 1973. 94 с.
12. *Панкова Е.И., Новикова А.Ф.* Карта засоленных почв России // Почвоведение. 2002. № 7. С. 817–831.
13. Почвенная карта РСФСР. М 1 : 2 500 000. Гл. ред. *В.М. Фридланд*. М.: ГУГК СССР, 1988.
14. Почвенный покров и земельные ресурсы Российской Федерации. М.: Почвенный ин-т им. В.В. Докучаева, 2001. 400 с.
15. Проблемы деградации и восстановления продуктивности земель сельскохозяйственного назначения в России / Под ред. *Гордеева А.В., Романенко Г.А.* М.: Росинформагротех, 2008. 67 с.
16. *Столбовой В.С.* Почвенные ресурсы России – современные вызовы // Материалы международной научной конференции: XXI Докучаевские

молодежные чтения “Почвоведение – мост между науками”. СПб. 2018. С. 24–41.
17. *Столбовой В.С., Шеремет Б.В.* О почвенном фонде России // Почвоведение. 1997. № 12. С. 1429–1439.
18. *Хитров Н.Б., Рухович Д.И., Калинина Н.В., Новикова А.Ф., Панкова Е.И., Черноусенко Г.И.* Оценка площади засоленных почв на территории Европейской части России по электронной версии каты засоления почв М 1 : 2 500 000 // Почвоведение. 2009. № 6. С. 627–637.
19. *Черноусенко Г.И., Калинина Н.В., Хитров Н.Б., Панкова Е.И., Рухович Д.И., Ямнова И.А., Новикова А.Ф.* Оценка площадей засоленных и солонцовых почв на территории уральского округа России // Почвоведение. 2011. № 4. С. 403–416.

REFERENCES

1. *Global'nyi klimat i pochvennyi pokrov Rossii: otsenka riskov i ekologo-ekonomicheskikh posledstvii degradatsii zemel'. Adaptivnye sistemy i tekhnologii ratsional'nogo prirodopol'zovaniya (sel'skoe i lesnoe khozyaistvo)* (Global climate and soil cover of Russia: assessment of risks and ecological and economic consequences of land degradation. Adaptive systems and technologies for environmental management (agriculture and forestry)), Vol. 1, Moscow: V.V. Dokuchaev Soil Science Institute, GEOS, 2018, 357 p.
2. *Global'nyi klimat i pochvennyi pokrov Rossii. Opustynivanie i degradatsiya zemel', institutsional'nye, infrastrukturnye, tekhnologicheskie mery adaptatsii (sel'skoe i lesnoe khozyaistvo)* (Global climate and soil cover of Russia. Desertification and land degradation, institutional, infrastructural, technological adaptation measures (agriculture and forestry)), Vol. 2, Moscow: IBA, 2019, 476 p.
3. Kust G.S. (Ed.), *Gosudarstvennyi (natsional'nyi) doklad o sostoyanii i ispol'zovanii zemel' v Rossiiskoi Federatsii v 2015 godu* (State (national) report on the state and use of land in the Russian Federation in 2015), Moscow: Rosreestr, 2016, 202 p.
4. *Degradatsiya zemel' i opustynivanie v Rossii: noveishie podkhody k analizu problemy i poisku putei resheniya* (Land Degradation and desertification in Russia: the latest approaches to the analysis of the problem and the search for solutions), Moscow: “Pero”, 2019, 235 p.
5. *Doklad o sostoyanii i ispol'zovanii zemel' sel'skokhozyaistvennogo naznacheniya Rossiiskoi Federatsii v 2017 godu* (Report on the state and use of agricultural land in the Russian Federation in 2017), Moscow: FGNU “Rosinformagrotech”, 2019, 328 p.

6. *Edinyj gosudarstvennyj reestr pochvennyh resursov Rossii* (Unified state register of soil resources in Russia), Moscow: V.V. Dokuchaev Soil Science Institute, 2014, 768 p.
7. *Zasolenie pochvy Rossii* (Salinization of the soil of Russia), Moscow: ICC "Akademkniga", 2006, 854 p.
8. *Kachestvennaya kharakteristika i kul'turtekhnicheskoe sostoyanie zemel' Rossiiskoi federatsii na 01.01.1996.* (Qualitative characteristics and cultural and technical condition of the lands of the Russian Federation on 01.01.1996), Moscow: Roskomzem, 1996, 141 p.
9. *Metody otsenki degradatsii sel'skokhozyaistvennykh zemel'* (Methods for assessing agricultural land degradation), Kolomna: "Raduga", 2015, 32 p.
10. *Natsional'nyi atlas Rossii* (The national Atlas of Russia), Vol. 2, Roskartografiya, 2000, URL: https://xn--80aaaa1bhnclcci1cl5c4ep.xn--p1ai/cd2/index.html.
11. *Obshchesoyuznaya instruktsiya po pochvennym obsledovaniyam i sostavleniyu krupnomasshtabnykh pochvennykh kart zemlepol'zovaniya* (All-Union instructions for soil surveys and the preparation of large-scale soil maps of land use), Moscow: "Kolos", 1973, 94 p.
12. Pankova E.I., Novikova A.F., Karta zasolennykh pochv Rossii (Map of saline soils in Russia), *Pochvovedenie*, 2002, No. 7, pp. 817–831.
13. *Pochvennaya karta RSFSR, M 1 : 8 000 000* (Soil map of the RSFSR, Scale 1 : 8 000 000), Moscow: GUGK SSSR, 1988.
14. *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.
15. Gordeev A.V., Romanenko G.A. (Eds), *Problemy degradatsii i vosstanovleniya produktivnosti zemel' sel'skokhozyaistvennogo naznacheniya v Rossii* (Problems of degradation and restoration of agricultural land productivity in Russia), Moscow: Rosinformagrotech, 2008, 67 p.
16. Stolbovoj V.S., Pochvennye resursy Rossii – sovremennye vyzovy (Soil resources of Russia – modern challenges), *Trudi mezhdunarodnoj nauchnoj konferencii XXI Dokuchaevskie molodezhnye chteniya "Pochvovedenie – most mezhdu naukami"* (Proc. Intern. Sci. Conf. XXI Dokuchaev youth readings "Soil science – the bridge between Sciences"), 2018, Saint Petersburg, 2018, pp. 24–41.
17. Stolbovoj V.S., Sheremet B.V., O pochvennom fonde Rossii (About the soil Fund of Russia), *Pochvovedenie*, 1997, No. 12, pp. 1429–1439.
18. Khitrov N.B., Ruhovich D.I., Kalinina N.V., Novikova A.F., Pankova E.I., Chernousenko G.I., Otsenka ploshchadi zasolennykh pochv na territorii Evropeiskoi chasti Rossii po elektronnoi versii karty zasoleniya pochv M 1 : 2 500 000 (Estimation of the area of saline soils on the territory of the

European part of Russia according to the electronic version of the soil salinity map Scale 1 : 2 500 000), *Pochvovedenie*, 2009, No. 6, pp. 627–637.
19. Chernousenko G.I., Kalinina N.V., Khitrov N.B., Pankova E.I., Ruhovich D.I., Yamnova I.A., Novikova A.F., Otsenka ploshchadei zasolennykh i solontsovykh pochv na territorii ural'skogo okruga Rossii (Assessment of saline and alkaline soils on the territory of the Ural district of Russia), *Pochvovedenie*, 2011, No. 4, pp. 403–416.

УДК 912.4

DOI: 10.19047/0136-1694-2020-103-34-50

Ссылки для цитирования:
Новиков С.Г. Создание электронной карты плодородия почв Карелии // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2020. Вып. 103. С. 34-50. DOI: 10.19047/0136-1694-2020-103-34-50

Cite this article as:
Novikov S.G., Producing the digital soil fertility map of Karelia, Dokuchaev Soil Bulletin, 2020, V. 103, pp. 34-50, DOI: 10.19047/0136-1694-2020-103-34-50

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

Acknowledgments:
The financial support of the research was provided from the federal budget for the state assignment of Karelian Research Centre of the Russian Academy of Sciences (Forest Research Institute of the Karelian Research Centre of the Russian Academy of Sciences).

Создание электронной карты плодородия почв Карелии

© 2020 г. С. Г. Новиков

Институт леса КарНЦ РАН,
ФИЦ "Карельский научный центр РАН", Россия,
185910, Республика Карелия, Петрозаводск, ул. Пушкинская, 11
https://orcid.org/0000-0003-2387-2656,
e-mail: novikovsergey.nsg@gmail.com.

Поступила в редакцию 29.06.2020, *после доработки* 27.07.2020,
принята к публикации 10.09.2020

Резюме: В настоящее время развитие почвенного цифрового картирования открывает новые возможности для решения научно-практических задач почвенно-экологического мониторинга, инвентаризации почвенно-земельных ресурсов, а также способствует оптимизации природопользования. Для территории Карелии разработка методов оценки лесных почв имеет большое значение, так как 95% земель республики – это лесные почвы. Данная работа показывает

процесс создания дополненной современными данными электронной карты плодородия лесных почв Карелии масштаба 1 : 500 000. Для этой цели архивная карта продуктивности почв республики, созданная на бумажном носителе Р.М. Морозовой, была отсканирована и переведена в векторный формат при помощи программного пакета MapInfo Professional 8.5. Полученное изображение было наложено на имеющуюся оцифрованную почвенную карту Карелии, которая послужила основой для построения тематического слоя по данным о плодородии каждого типа почв. В результате выполнения представленной работы дополнена имеющаяся оценочная шкала, а также рассчитано процентное соотношение различных по продуктивности почв Карелии. Подготовленная карта является важным информационным источником архивных и современных данных, а также входит в состав ГИС по почвам Карелии.

Ключевые слова: почвенные карты, плодородие почв, лесные почвы, картография, ГИС.

Producing the digital soil fertility map of Karelia

S. G. Novikov

Forest Research Institute
of the Karelian Research Centre of the Russian Academy of Sciences,
11 Pushkinskaya Str., Petrozavodsk 185910,
Republic of Karelia, Russian Federation,
https://orcid.org/0000-0003-2387-2656,
e-mail: novikovsergey.nsg@gmail.com.

Received 29.06.2020, *Revised* 27.07.2020, *Accepted* 10.09.2020

Abstract: Recent advancements in soil digital mapping have opened new opportunities for handling the scientific and applied problems of ecological soil monitoring, inventory of land and soil resources, and are generally helpful in optimizing the management of natural resources. For Karelia the development of forest soil assessment techniques is essential, considering that 95% of the republic's land is forest soils. This paper tells about the process of creating an updated digital map of forest soils fertility in Karelia, scale 1 : 500 000. To this end, the archival soil productivity map of the republic, produced in paper version by R.M. Morozova in 2000, was scanned and converted into a vector layer with the use of the MapInfo Professional 8.5 software package. The resultant layer was aligned with the existing digitalized soil map of Karelia, which served as the basis for constructing the thematic layer according to the data on the fertility of each soil type. As a result of this

study, the soil fertility assessment scale was specified and the percentage ratio of soils of different productivity in Karelia was calculated. The digital soil fertility map is an important information source of archival and modern data, and also is a part of the GIS for soils of Karelia.

Keywords: soil maps, soil fertility, cartography, GIS, MapInfo.

ВВЕДЕНИЕ

Последние десятилетия отмечены бурным развитием информационных технологий, во многом определяющих перспективы развития различных направлений науки, в том числе почвоведения. Открываются возможности решений на новом уровне научно-практических задач: инвентаризации почвенно-земельных ресурсов, почвенно-экологического мониторинга, моделирования и прогнозирования почвенных процессов, что необходимо для оптимизации природопользования, воспроизводства плодородия и предотвращения деградации почв (Цифровая…, 2012). Интерес к проблеме цифрового почвенного картирования отражается в большом количестве как российских, так и зарубежных публикаций (Kwabena, 2011; Савин, 2014, 2019; Заносова, Гребенкина, 2016; Özyazici et al., 2017; Ахметова и др., 2018; Nussbaum et al., 2018; Савин и др., 2019). Для различных экологических целей специалисты чаще всего исследуют следующие почвенные свойства: содержание органического углерода, основных элементов минерального питания (N, P, K), поллютантов (тяжелые металлы), а также составляют карты гранулометрического состава, плотности, влажности почв, оценки деградации почвенного покрова (засоление, закисление и эрозия).

К настоящему времени в Институте леса КарНЦ РАН накоплено большое количество данных о свойствах почв Карелии, составлены различные тематические карты на бумажных носителях, которые датируются второй половиной XX века. Однако для поддержания актуальности картографические материалы необходимо периодически корректировать и обновлять. В связи с этим актуальной задачей является оцифровка и обновление имеющихся архивных карт. Такая работа активно ведется в лаборатории лесного почвоведения ИЛ КарНЦ РАН. Сотрудниками лаборатории оцифрована и обновлена почвенная карта Карелии (М 1 : 500 000)

1955 года (Ахметова, Бахмет, 2013; Ахметова, 2020).

Целью данного исследования являлось создание и анализ дополненной современными данными электронной карты плодородия лесных почв Карелии масштаба 1 : 500 000 на основе имеющейся архивной карты продуктивности почв и оцифрованной почвенной карты.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Для создания обновленной электронной карты продуктивности лесных почв Карелии использовали архивную карту масштаба 1 : 500 000 (Карта плодородия…). Она выполнена на бумажном носителе, на который нанесены контуры почв из почвенной карты (Почвенная…, 1955). Каждый контур закрашен вручную в соответствии с легендой, которая состоит из двух блоков – лесные и освоенные почвы. Основной блок включает в себя 22 наименования лесных почв, балл их продуктивности и цветовое обозначение. В дополнительном блоке представлены 4 типа освоенных почв, для них балл продуктивности не определялся. Точный год создания оригинальной версии карты не известен, предположительно 1980–1990 гг. Недатированный оригинал хранится в лаборатории лесного почвоведения ИЛ КарНЦ РАН.

В качестве основы для данной работы использовали электронную версию почвенной карты Карелии масштаба 1 : 500 000, на которую накладывали отсканированные растровые изображения архивной карты плодородия почв для их дальнейшей векторизации с помощью программного продукта MapInfo Professional 8.5.

Названия почв и их сочетаний в легенде созданной карты даны по Региональной классификации (Морозова, 1991).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Сложность решения проблемы оценки и картирования плодородия почв обусловлена отсутствием общепринятых критериев. Многие зарубежные исследователи в своих научных работах для характеристики почвенного плодородия используют индекс плодородия почвы – SFI (Soil Fertility Index), который представляет

собой интегральный показатель, учитывающий основные физико-химические свойства почв (pH, P, K, C и др.) (Moran et al., 2000; Andrews et al., 2004; Kwabena, 2011; Panwar et al., 2011; Özyazici et al., 2017). В 2012 году для оценки качества почвы ученые из США предложили использовать индекс продуктивности – PI (Productivity Index), основным отличием которого является то, что он не требует большого количества данных о почве (Schaetzl et al., 2012). PI варьирует от 0 (наименее продуктивные) до 19 (наиболее продуктивные) и определяется по таксономической принадлежности почв, а именно по уровню "семейство". В почвенной классификации США для определения семейства учитывают следующие почвенные свойства: гранулометрический и минералогический состав, карбонатность, температуру, мощность почвенного профиля и др. (Самофалова, 2012). По индексу PI построена и опубликована карта продуктивности почв США (Miller et al., 2012).

Для оценки плодородия лесных почв Карелии была разработана бонитировочная шкала на основе учета их генетических и лесорастительных свойств (Федорец и др., 2000). Оценочная таблица включает в себя полные названия почв, балл их продуктивности по 100-балльной системе, мощность рыхлой толщи почвообразующих пород, а также следующие характеристики ландшафта: форма рельефа, тип леса и его производительность (класс бонитета). Первоначальный вариант шкалы периодически изменяется и дополняется новыми данными (Федорец и др., 2003). Создание электронной карты продуктивности почв также включало в себя корректировку оценочной таблицы. В связи с получением нового экспериментального материала в нее были добавлены следующие почвы:

1. Подбуры типичные грубогумусные среднемощные песчаные на песчаной морене, располагающиеся на склонах моренных холмов и гряд, под сосняками брусничными IV класса бонитета, с мощностью рыхлой толщи более 50 см, оценены в 35–40 баллов.
2. Подзолы иллювиально-гумусово-железистые песчаные на песчаной морене, располагающиеся на склонах моренных гряд и холмов под сосняками брусничными и черничными III или IV классов бонитета, с мощностью рыхлой толщи более 50 см, оценены в 55–60 баллов.

3. Пятнисто-подзолистые супесчаные на супесчаной морене, встречающиеся в моренном мелкохолмистом ландшафте под ельниками и березняками разнотравно-черничными II–III классов бонитета, с мощностью рыхлой толщи более 50 см, оценены в 75–80 баллов.
4. Подзолистые грунтово-глееватые супесчаные на супесчаной морене, встречающиеся в моренном мелкохолмистом ландшафте под ельниками черничными III класса бонитета, с мощностью рыхлой толщи более 50 см, оценены в 75–80 баллов.
5. Подзолистые вторично-дерновые песчаные на песчаной морене, располагающиеся на волнистых моренных равнинах под сосняками брусничными III класса бонитета, с мощностью рыхлой толщи более 50 см, оценены в 75–80 баллов.

Также в оценочной шкале (Федорец и др., 2003) была проведена корректировка названий типов леса по Яковлеву, Вороновой (Яковлев, Воронова, 1959), которая использовалась при заполнении базы данных по почвам Карелии (Солодовников, 2012), созданной в лаборатории лесного почвоведения ИЛ КарНЦ РАН.

На первом этапе создания электронной карты продуктивности почв ее изображение было отсканировано по частям с архивного бумажного носителя. Таким образом, получили 6 отдельных растров, которые зарегистрировали в системе координат Пулково 1942 с заданной проекцией Гаусса-Крюгера GK зона 6 и наложили на векторную почвенную карту. Геопривязка осуществлялась по имеющейся на картах координатной сетке. Реперными (то есть опорными) точками для привязки служили пересечения линий широты и долготы, а также некоторые географические объекты: озера, населенные пункты, точки на границах республики. Фрагмент отсканированного изображения карты представлен на рисунке 1.

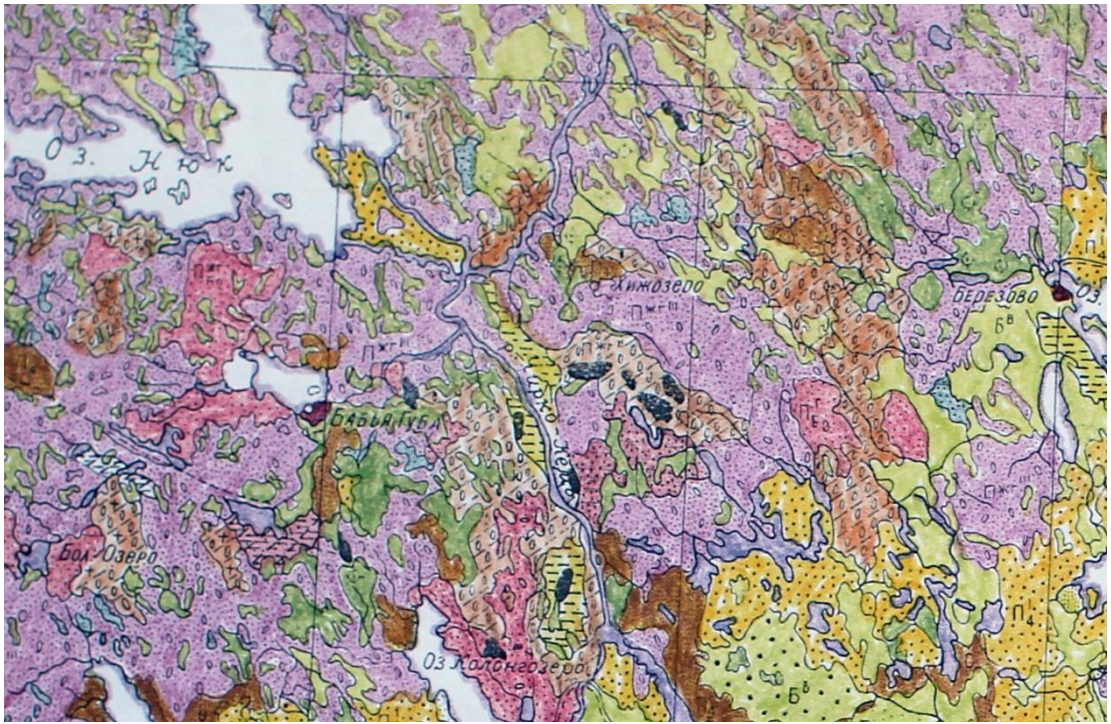

Рис. 1. Фрагмент архивной карты продуктивности почв Карелии (М 1 : 500 000).
Fig. 1. Fragment of soil productivity map of Karelia (Scale: 1 : 500 000).

Далее, поскольку почвенные контуры на обеих картах полностью совпадают, была перестроена структура основной таблицы атрибутивных данных почвенной карты: добавлены новые поля “код_плодородие”, “плодородие_балл”, “плодородие_название_почвы”. Поле “код_плодородие” содержит уникальные значения, которые соответствуют определенному баллу и сочетанию почв, оно введено для удобства построения различных запросов с целью анализа данных в программном пакете MapInfo Professional 8.5. Таким образом, после правки каждый полигон (почвенный контур) на векторной карте почв Карелии содержит следующую информацию:

- “ID” – порядковый номер полигона;
- “индекс_по” – индекс типа почв в соответствии с почвенной картой (1955 г.);
- “почва” – название почв в соответствии с почвенной картой (1955 г.);
- “код_почва” – уникальное значение, присвоенное каждому типу почв в соответствии с почвенной картой (1955 г.);
- “механическ” – механический состав почвы в соответствии с почвенной картой Карелии (1955 г.);
- “код_мех_сост.” – уникальное значение, присвоенное каждому типу механического состава в соответствии с почвенной картой (1955 г.);
- “комплексы” – название сопутствующих почв в соответствии с почвенной картой (1955 г.);
- “код_комплекс” – уникальное значение, присвоенное каждому типу сопутствующих почв в соответствии с почвенной картой (1955 г.);
- “код_плодородие” – уникальное значение, присвоенное каждому типу почв в соответствии с архивной картой плодородия почв;
- “плодородие_балл” – значение балла плодородия почв в соответствии с архивной картой плодородия почв;
- “плодородие_название_почв” – название почв в соответствии с архивной картой плодородия почв.

После того, как в атрибутивные данные каждого полигона на почвенной карте была добавлена информация о плодородии, следовал этап построения тематического слоя.

В программном пакете MapInfo Professional 8.5 возможно составлять тематические карты различного типа. В данном случае наиболее подходящим является тип “Отдельные значения – индивидуальные значения регионов, стандартные”, который выделяет записи в таблице в зависимости от индивидуальных значений в заданном поле, в нашем случае это поле “плодородие_название_почв”.

Завершающим этапом являлась настройка легенды создаваемой карты. Было решено придерживаться цветовой гаммы, представленной на исходной архивной карте плодородия почв Карелии Р.М. Морозовой, в соответствии с возможностями программного пакета MapInfo Professional 8.5 (рис. 2).

В процессе создания электронной карты продуктивности, на нее были добавлены новые контуры – “Болотные осушенные”, которые были выделены на почвенной карте в результате ее обновления (Ахметова, 2020). На легенде они находятся в разделе Освоенные почвы. А также, в связи с получением новых сведений, название сочетания почв “Подзолы иллювиально-железисто-гумусовые песчаные и пылевато-песчаные валунные в сочетании с болотными верховыми (сев. тайга)” в легенде было заменено на “Подзолы иллювиально-железисто-гумусовые и гумусово-железистые на валунных песках и супесях в сочетании с болотными торфяными (северная тайга)”.

В результате проделанной работы была построена электронная карта плодородия почв Карелии (рис. 3). Векторная карта состоит из 18 550 почвенных контуров, заполненных цветом в соответствии с легендой, на которой представлены два раздела – лесные и освоенные почвы. Первый включает в себя 22 наименования почв и их сочетаний, а также балл плодородия и цвет. Во втором блоке 5 типов освоенных почв и их цветовое обозначение без указания балла продуктивности.

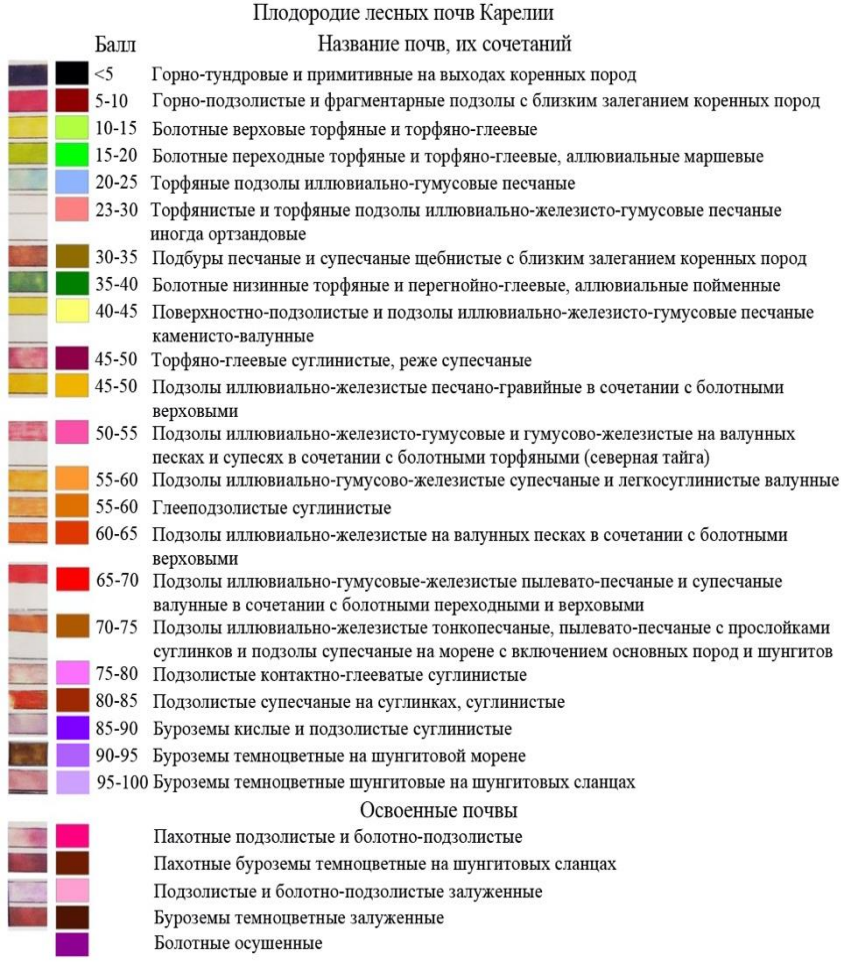

Рис. 2. Легенда карты плодородия почв Карелии.
Fig. 2. Legend of the soil fertility map of Karelia.

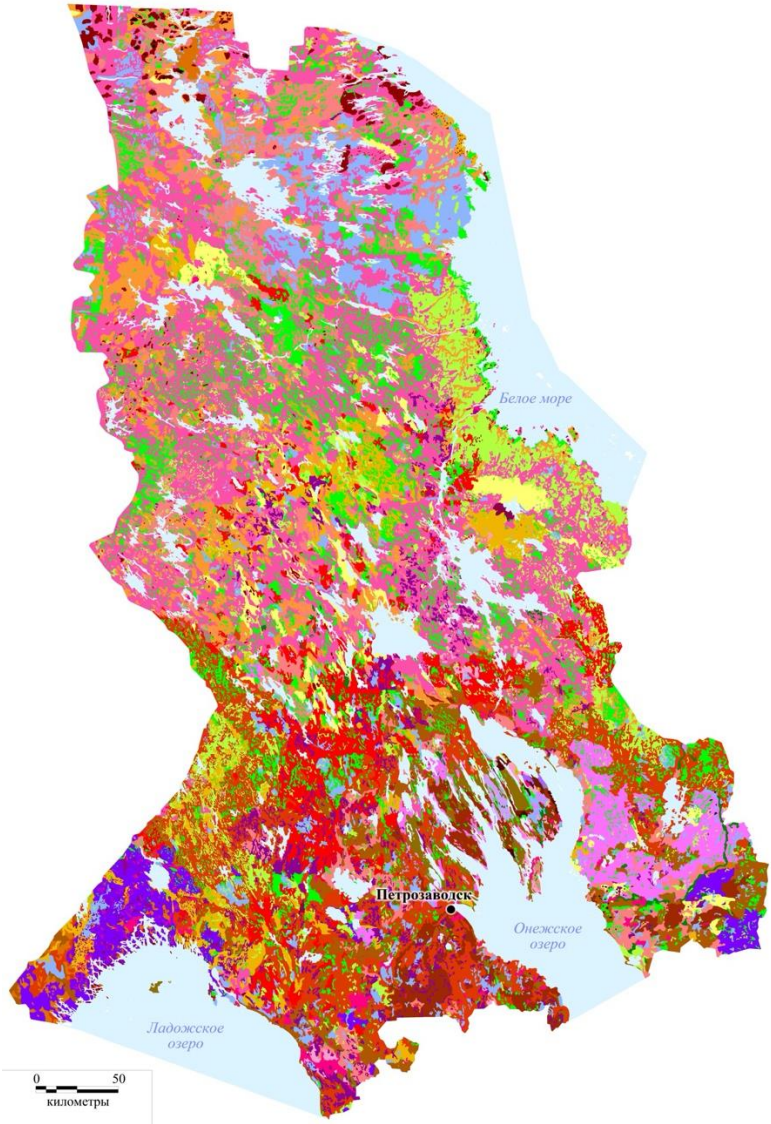

Рис. 3. Электронная карта плодородия почв Карелии.
Fig. 3. Digital map of Karelia soil fertility.
Примечание. Легенда к карте представлена на рисунке 2.
Note. Map legend is shown in Figure 2.

Анализ построенной карты в программном пакете MapInfo Professional 8.5 позволил определить процентное соотношение различных по степени продуктивности почв. Почвы Карелии по лесорастительным свойствам разделены на 5 групп (Федорец и др., 2000):

- Наилучшие плодородные почвы, оцененные в 80–100 баллов, занимают 4.6% от общей площади почвенного покрова Карелии, они встречаются в южной и юго-восточной части республики.
- Хорошие для произрастания древесных насаждений почвы (60–80 баллов) составляют 20.7%. Данные почвы приурочены к среднетаежной подзоне Карелии.
- На долю средних по качеству почв (40–60 баллов) приходится 34.9%, они распространены на территории северо-таежных лесов республики.
- Почвы ниже среднего качества (20–40 баллов) занимают 16.3% почвенного покрова, встречаются на севере Карелии.
- Почвы очень низкого качества (0–20 баллов) составляют 18.5%. К ним относятся все примитивные, неполноразвитые почвы, а также болотные переходные и верховые. Эти почвы распространены по всей территории республики и представлены небольшими по площади контурами. Наиболее крупные массивы болотных верховых почв выделены вдоль западного побережья Белого моря.

Таким образом, на долю лесных почв приходится 95% почвенного покрова Карелии, освоенные почвы занимают лишь 5%.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате выполнения работы подготовлена электронная карта плодородия лесных почв Карелии масштаба 1 : 500 000, которая имеет важное практическое значение и является составной частью ГИС по почвам Карелии (Ахметова и др., 2018). Дополнена имеющаяся оценочная (бонитировочная) шкала лесных почв. Рассчитано процентное соотношение различных по степени продуктивности почв Карелии. Установлено, что среди лесных почв наиболее распространены средние по качеству почву (40–60 бал-

лов), они составляют 34.9% от общей площади почвенного покрова. Освоенные почвы занимают лишь 5% исследуемой территории.

Электронная карта продуктивности почв Карелии наглядно отражает состояние и функционирование почвенного покрова республики. В дальнейшем она может дополняться и корректироваться, оставаясь важным информационным источником архивных и современных данных.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ахметова Г.В.* Использование ГИС-технологий для идентификации болотных почв при обновлении электронной почвенной карты Карелии // Интеркарто / ИнтерГИС. 2020. (принято в печать)
2. *Ахметова Г.В., Бахмет О.Н.* Цифровая версия почвенной карты Карелии масштаба 1 : 500 000 // Разнообразие лесных почв и биоразнообразие лесов. Сборник материалов V Всерос. науч. конф. по лесному почвоведению с междунар. участием. Пущино: ИФХиБПП РАН, 2013. С. 31–33.
3. *Ахметова Г.В., Бахмет О.Н., Новиков Г.С., Медведева М.В., Солодовников А.Н.* Разработка геоинформационной системы “Почвы Республики Карелия”: формирование концепции и структуры // ИнтерКарто / ИнтерГИС. Геоинформационное обеспечение устойчивого развития территорий: Материалы Междунар. конф. Т. 24. Ч. 2. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2018. С. 262–270. DOI: 10.24057/2414-9179-2018-2-24-262-270.
4. *Заносова В.И., Гребенкина Д.М.* Методика оцифровки для создания тематических карт орошаемого массива // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. 2016. № 6 (140). С. 42–48.
5. Карта плодородия почв Карелии, Масштаб: 1 : 500 000. Сост. Р.М. Морозова.
6. *Морозова Р.М.* Лесные почвы Карелии. Л.: Наука, 1991. 184 с.
7. Почвенная карта Карелии, Масштаб: 1 : 500 000 / сост. О.Н. Михайловская. 1955 г.
8. *Савин И.Ю.* Проблема масштаба в современной почвенной картографии // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2019. № 97. С. 5–20. DOI: 10.19047/0136-1694-2019-97-5-20.
9. *Савин И.Ю., Жоголев А.В., Прудникова Е.Ю.* Современные тренды и проблемы почвенной картографии // Почвоведение. 2019. № 5. С. 517–528. DOI: 10.1134/S0032180X19050101.

10. *Савин И.Ю., Овечкин С.В.* Об обновлении среднемасштабных почвенных карт // Почвоведение. 2014. № 10. С. 1184–1192. DOI: 10.7868/S0032180X14100128.
11. *Самофалова И.А.* Современные проблемы классификации почв. Пермь: Изд-во ФГБОУ ВПО Пермская ГСХА, 2012. 175 с.
12. *Солодовников А.Н.* База данных "Почвы Карелии" (св-во о гос. регистрации №2012620683) // Официальный бюллетень "Программы для ЭВМ. Базы данных. Топологии интегральных микросхем". 2012. № 8.
13. *Федорец Н.Г., Морозова Р.М., Синькевич С.М., Загуральская Л.М.* Оценка продуктивности лесных почв Карелии. П.: КарНЦ РАН, 2000. 195с.
14. *Федорец Н.Г., Морозова Р.М., Солодовников А.Н.* Лесные почвы Карелии и оценка их продуктивности // Труды Карельского научного центра РАН. 2003. Вып. 5. С. 108–120.
15. Цифровая почвенная картография: теоретические и экспериментальные исследования: Сб. ст. М.: Почвенный институт им. В.В. Докучаева, 2012. 357 с.
16. *Яковлев Ф.С., Воронова В.С.* Типы лесов Карелии и их природное районирование. Петрозаводск, 1959. 82 с.
17. *Andrews S.S., Karlen D.L., Cambardella C.A.* The soil management assessment framework: A quantitative soil quality evaluation method // Soil Science Society of America Journal. 2004. No. 68 (6). P. 1945–1962.
18. *Kwabena A.N.* Using soil fertility index to evaluate two different sampling schemes in soil fertility mapping: A case study of Hvanneyri, Iceland. United Nations University Land Restoration Training Programme (final project). 2011. 45 p. URL: https://www.grocentre.is/static/gro/publication/390/document/nketia_2011_final.pdf.
19. *Miller B.A., Schaetzl R.J., Krist Jr F.J.* The Soil Productivity Index: Taxonomically Based, Ordinal Estimates of Soil Productivity // Conference: Association of American Geographers Annual Meeting. New York. USA. 2012. DOI: 10.13140/2.1.3036.5127.
20. *Moran E.F., Brondizion E.S., Tucker J.M., Da Silva-Forsberg M.C., McCracken S., Falesi I.* Effects of soil fertility and land use on forest succession in Amazonia // Forest Ecology and Management. 2000. No. 139 (1–3). P. 93–108. DOI: 10.1016/S0378-1127(99)00337-0.
21. *Nussbaum M., Spiess K., Baltensweiler A., Grob U., Keller A., Greiner L., Schaepman M.E., Papritz A.* Evaluation of digital soil mapping approaches with large sets of environmental covariates // Soil. 2018. No. 4. P. 1–22. DOI: 10.5194/soil-4-1-2018.

22. *Özyazici M.A., Dengiz O., Sağlam M., Erkoçak A., Türkmen F.* Mapping and assessment-based modeling of soilfertility differences in the central and eastern parts of the BlackSea region using GIS and geostatistical approaches // Arabian Journal of Geosciences. 2017. No. 10 (45). P. 2–9. DOI: 10.1007/s12517-016-2819-6.
23. *Panwar P., Pal S., Reza S.K., Sharma B.* Soil Fertility Index, Soil Evaluation Factor, and Microbial Indices under Different Land Uses in Acidic Soil of Humid Subtropical India // Communications in Soil Science and Plant Analysis. 2011. No. 42 (22). P. 2724–2737. DOI: 10.1080/00103624.2011.622820.
24. *Schaetzl R.J., Krist F.J. Jr., Miller B.A.* In review. Introducing the Soil Fertility Index: a taxonomically based, ordinal estimate of soil fertility // Soil Science. 2012. No. 177. P. 288–299. DOI: 10.1097/SS.0b013e3182446c88.

REFERENCES

1. Akhmetova G.V., Ispol'zovanie GIS-tekhnologii dlya identifikatsii bolotnykh pochv pri obnovlenii elektronnoi pochvennoi karty Karelii (GIS-Technology application for identification of peat bog soils for updating the digital soil map of Karelia), *Intercarto / InterGIS*, 2020. (in print)
2. Akhmetova G.V., Bakhmet O.N., Tsifrovaya versiya pochvennoi karty Karelii masshtaba 1 : 500 000 (Digital version of soil map of Karelia. Scale 1 : 500 000), “Raznoobrazie lesnykh pochv i bioraznoobrazie lesov” Sbornik materialov V Vseros. nauch. konf. po lesnomu pochvovedeniyu s mezhdunar. Uchastiem (*Proc. the 5th All-Russian Conf. “Diversity of forest soil and biodiversity of forest”)*, Pushchino: IFKHiBPP RAS, 2013, pp. 31–33.
3. Akhmetova G.V., Bakhmet O.N., Novikov S.G., Medvedeva M.V., Solodovnikov A.N., Razrabotka geoinformatsionnoi sistemy “Pochvy Respubliki Kareliya”: formirovanie kontseptsii i struktury (Development of the Geographical Information System “Soils of the Republic of Karelia”: designing the concept and the structure), InterCarto, InterSIG, *Proc. Intern. Conf. GI support of sustainable development of territories*, Petrozavodsk: KarRC RAS, 2018, Vol. 24, part 2, pp. 262–270, DOI: 10.24057/2414-9179-2018-2-24-262-270.
4. Zanosova V.I., Grebenkina D.M., Digitization technique for creating thematic maps of the irrigated massif, *Bulletin of Altai State Agrarian University*, 2016, No. 6 (140), pp. 42–48.
5. Morozova R.M., *Karta plodorodiya pochv Karelii, Masshtab: 1 : 500 000* (Map of soil fertility of Karelia, Scale: 1 : 500 000).
6. Morozova R.M., *Lesnye pochvy Karelii* (Forest soils of Karelia), Leningrad: Nauka, 1991, 184 p.

7. Mikhailovskaya O.N., *Pochvennaya karta Karelii, Masshtab: 1 : 500 000* (The soil map of Karelia, Scale: 1 : 500 000), 1955.
8. Savin I.Yu., The scale problem in modern soil mapping, *Dokuchaev Soil Bulletin*, 2019, No 97, pp. 5–20, DOI: 10.19047/0136-1694-2019-97-5-20.
9. Savin I.Yu., Zhogolev A.V., Prudnikova E.Yu., Sovremennye trendy i problemy pochvennoi kartografii (Modern Trends and Problems of Soil Mapping), *Pochvovedenie*, 2019, No. 5, pp. 517–528, DOI: 10.1134/S0032180X19050101.
10. Savin I.Yu., Ovechkin S.V., Ob obnovlenii srednemasshtabnykh pochvennykh kart (On the updating of medium-scale soil maps), *Pochvovedenie*, 2014, No. 10, pp. 1184–1192, DOI: 10.7868/S0032180X14100128.
11. Samofalova I.A., *Sovremennye problemy klassifikatsii pochv* (Modern problems of soil classification), Perm': Izd-vo FGBOU VPO Permskaya GSKhA, 2012, 175 p.
12. Solodovnikov A.N., Baza dannykh "Pochvy Karelii" (sv-vo o gos. registratsii № 2012620683) (Database "Soils of Karelia" (certificate of state registration No. 2012620683)), *Official Bulletin of Computer Software. Database. Topologies of integrated circuits*, 2012, No. 8.
13. Fedorets N.G., Morozova R.M., Sin'kevich S.M., Zagural'skaya L.M., *Otsenka produktivnosti lesnykh pochv Karelii* (Assessment of forest soil productivity in Karelia), Petrozavodsk: KarRC RAS, 2000, 195 p.
14. Fedorets N.G., Morozova R.M., Solodovnikov A.N., Lesnye pochvy Karelii i otsenka ikh produktivnosti (Forest soils of Karelia and assessment of their productivity), Trudy Karel'skogo nauchnogo tsentra RAN (*Transactions of the Karelian Research Centre of the Russian Academy of Sciences*), Petrozavodsk, 2003, No. 5, pp. 108–120.
15. *Tsifrovaya pochvennaya kartografiya: teoreticheskie i eksperimental'nye issledovaniya* (Digital soil mapping: theoretical and experimential surveys), Collection of articles, Moscow: V.V. Dokuchaev Soil Science Institute, 2012, 357 p.
16. Yakovlev F.S., Voronova V.S., *Tipy lesov Karelii i ikh prirodnoe raionirovanie* (Types of forests of Karelia and their natural zoning), Petrozavodsk, 1959, 82 p.
17. Andrews S.S., Karlen D.L., Cambardella C.A. The soil management assessment framework: A quantitative soil quality evaluation method, *Soil Science Society of America Journal*, 2004, No. 68 (6), pp. 1945–1962.
18. Kwabena A.N., *Using soil fertility index to evaluate two different sampling schemes in soil fertility mapping: A case study of Hvanneyri, Iceland*, United Nations University Land Restoration Training Programme (final project), 2011, 45 p., URL:

https://www.grocentre.is/static/gro/publication/390/document/nketia_2011_final.pdf.
19. Miller B.A., Schaetzl R.J., Krist Jr F.J., The Soil Productivity Index: Taxonomically Based, Ordinal Estimates of Soil Productivity, *Conference: Association of American Geographers Annual Meeting*, New York, 2012, DOI: 10.13140/2.1.3036.5127.
20. Moran E.F., Brondizion E.S., Tucker J.M., Da Silva-Forsberg M.C., McCracken S., Falesi I., Effects of soil fertility and land use on forest succession in Amazonia, *Forest Ecology and Management*, 2000, No. 139 (1–3), pp. 93–108, DOI: 10.1016/S0378-1127(99)00337-0.
21. Nussbaum M., Spiess K., Baltensweiler A., Grob U., Keller A., Greiner L., Schaepman M.E., Papritz A., Evaluation of digital soil mapping approaches with large sets of environmental covariates, *Soil*, 2018, No. 4, pp. 1–22, DOI: 10.5194/soil-4-1-2018.
22. Özyazici M.A., Dengiz O., Sağlam M., Erkoçak A., Türkmen F., Mapping and assessment-based modeling of soilfertility differences in the central and eastern parts of the BlackSea region using GIS and geostatistical approaches, *Arabian Journal of Geosciences*, 2017, No. 10 (45)., pp. 2–9, DOI: 10.1007/s12517-016-2819-6.
23. Panwar P., Pal S., Reza S.K., Sharma B., Soil Fertility Index, Soil Evaluation Factor, and Microbial Indices under Different Land Uses in Acidic Soil of Humid Subtropical India, *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 2011, No. 42 (22), pp. 2724–2737, DOI: 10.1080/00103624.2011.622820.
24. Schaetzl R.J., Krist F.J. Jr., Miller B.A., In: Introducing the Soil Fertility Index: a taxonomically based, ordinal estimate of soil fertility, *Soil Science*, 2012, No. 177, pp. 288–299, DOI: 10.1097/SS.0b013e3182446c88.

УДК 631.4

DOI: 10.19047/0136-1694-2020-103-51-84

Ссылки для цитирования:
Московченко Д.В., Романенко Е.А. Особенности элементного состава почв Пур-Тазовского междуречья // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2020. Вып. 103. С. 51-84. DOI: 10.19047/0136-1694-2020-103-51-84

Cite this article as:
Moskovchenko D.V., Romanenko E.A., Elemental composition of soils of the Pur-Taz interfluve, Dokuchaev Soil Bulletin, 2020, V. 103, pp. 51-84, DOI: 10.19047/0136-1694-2020-103-51-84

Благодарность:
Исследование выполнено в рамках программы базовых исследований ТюмНЦ СО РАН (проект АААА-А17-1117050-4000146-5) и гранта РФФИ 18-45-890002\18.

Acknowledgments:
The studies were carried out in the framework of the basic research of Tyumen Scientific Centre (Northern Branch of the Russian Academy of Sciences) project No. AAAA-A17-1117050-4000146-5 and with the financial support of the Russian Foundation for Basic Research (RFBR) project No. 18-45-890002\18.

Особенности элементного состава почв Пур-Тазовского междуречья

© 2020 г. Д. В. Московченко*, Е. А. Романенко

ФИЦ Тюменский научный центр СО РАН, Россия,
625026, Тюмень , ул. Малыгина, 86,
**https://orcid.org/0000-0001-6338-7669*,
e-mail: moskovchenko1965@gmail.com.

Поступила в редакцию 16.03.2020, *после доработки* 27.07.2020,
принята к публикации 10.09.2020

Резюме: Проведена оценка элементного состава почв, сфагновых мхов и лишайников Пур-Тазовского междуречья (Западная Сибирь). Содержание химических элементов определено с применением метода рентген-флуоресцентной спектрометрии. Полученные результаты показывают, что почвы характеризуются относительно низкими концентрациями экологически опасных тяжелых металлов, среднее

содержание которых либо ниже кларка земной коры (Cu, Pb, Zn, Ni, Sr), либо равно ему (Hg, Co), что подтверждает выводы предшествующих исследований. Крайне низкое содержание отмечено для физиологически важных Zn и Cu. Повышенные относительно кларка концентрации отмечены для малоподвижных элементов (Mo, Sn и Zr). Выявлены существенные различия в составе минеральных и органогенных горизонтов почв постлитогенного ствола. Средние концентрации P, Zn и S в органогенных горизонтах соответственно в 7.1, 8.1 и 18 раз выше, чем в иллювиальных минеральных горизонтах. Таким образом, химический состав почв в значительной степени определяется биологическим накоплением халькофильных элементов. В верховом торфе олиготрофных болот выше содержание халькофильных элементов, подвижных в кислой среде и интенсивно поглощаемых растениями (Zn, Cu, Cd, Hg). В торфе ерниково-кустарничково-мохово-лишайниковых тундр и лиственничных редколесий повышено содержание литофильных Al, Si, Ti, Zr, поступающих с пылевыми выпадениями из атмосферы. Выявленные особенности элементного состава почв необходимо учитывать при проведении мониторинга загрязнения тяжелыми металлами.

Ключевые слова: Западная Сибирь, тундра, микроэлементы, почвы, лишайники, сфагновые мхи.

Elemental composition of soils of the Pur-Taz interfluve

D. V. Moskovchenko*, E. A. Romanenko

Tyumen Scientific Centre,
Northern Branch of the Russian Academy of Sciences,
86 Malygina Str., Tyumen 625026, Russian Federation,
**https://orcid.org/0000-0001-6338-7669*,
e-mail: moskovchenko1965@gmail.com.

*Receive*16.03.2020, *Revised* 27.07.2020, *Accepted* 10.09.2020

Abstract: In order to evaluate the chemical composition of natural background environments of Pur-Taz interfluve (Western Siberia), the mineral components of soils, peats, lichens, and sphagnum mosses have been analyzed. The samples were tested using X-ray fluorescence technology. The average contents of hazardous metals in the soils of the Pur-Taz interfluve are either lower (for Cu, Pb, Zn, Ni, Sr) or equal to (for Hg, Co) the average values of these elements in the Earth's crust. This finding corresponds to the commonly held view that the contents of elements in the soils located in the north of

Western Siberia are lower than the world averages. Additionally, in our samples low concentrations of copper and zinc have been observed. Since these microelements are important for soil physiology, this finding indicates unfavorable biochemical conditions in the research area. On the other hand, high concentrations are observed for inactive elements such as Mo, Sn and Zr. The significant differences have been identified in the composition of mineral and organic soil horizons. For instance, the average concentrations of P, Zn and S in organic horizons are 7.1, 8.1 and 18 times greater than in the illuvial mineral horizons, respectively. The intense accumulation of Zn, Cu, Cd, Hg has been recorded, all of them are chalcophiles in the ombrotrophic peat. This means that the chemical composition of soil is largely determined by biological accumulation of chalcophile elements. The content of lithophilic Al, Si, Ti and Zr, coming with dust precipitation from the atmosphere increases in the peat of dwarf shrub-moss-lichen tundras and larch woodlands. The revealed values of the elemental composition of soils can be recommended as background in the course of the environmental monitoring.

Keywords: Western Siberia, tundra, trace elements, soil, lichens, sphagnum mosses.

ВВЕДЕНИЕ

Одним из интенсивно осваиваемых районов на севере Западной Сибири в настоящее время является Пур-Тазовское междуречье. Геологоразведочные работы в Пур-Тазовской области выявили 60 месторождений углеводородов (Пятницкая и др., 2010), которые должны обеспечивать рост добычи и газа, и нефти в регионе, а следовательно, и устойчивое экономическое развитие РФ. Расположенное здесь Заполярное месторождение в настоящее время является самым мощным по добыче газа в России. Однако промышленное освоение порождает многочисленные экологические проблемы, в том числе вызванные поступлением загрязнителей, включающих тяжелые металлы (Моисеенко, Гашев, 2012; Московченко, 2013; Опекунова и др., 2018). Поэтому выявление основных закономерностей формирования химического состава почв в полярных районах Западной Сибири в последнее пятилетие привлекает внимание российских и зарубежных исследователей. На полуострове Ямал выявлено аэротехногенное поступление кадмия и свинца с последующей аккумуляцией в органогенных горизонтах, отмечено регулярное превышение экологических

нормативов содержания в почвах Cd, Ni, Hg и As (Ji et al., 2019a, 2019b; Алексеев и др., 2017). Исследовано загрязнение почв тяжелыми металлами и полициклическими ароматическими углеводородами на острове Белый (Abakumov et al., 2017; Moskovchenko et al., 2017). Определено экотоксикологическое состояние почв населенных пунктов Ямало-Ненецкого автономного округа (Alekseev et al., 2017). Выявлен состав почв и донных отложений на различных месторождениях углеводородов (Опекунова и др., 2019).

В случае дальнейшего потепления климата и таяния мерзлых грунтов процессы аккумуляции и транслокации химических элементов в почвах будут меняться, что усиливает интерес исследователей к оценке биогеохимических свойств тундровых и болотных почв (Antcibor et al., 2014; Halbach et al., 2017; Raudina et al., 2018). Отмечалось, что поступление в сфагновый торф микроэлементов увеличивает продуцирование парниковых газов (Basiliko, Yavit, 2001), и, следовательно, влияет на современные климатические изменения.

Цель данного исследования – выявить особенности фонового содержания и закономерностей внутрипрофильного распределения химических элементов в почвах северной части Пур-Тазовского междуречья, что необходимо, прежде всего, для корректного проведения мониторинга в районе деятельности объектов газодобывающего комплекса. Высокая чувствительность экосистем Арктики к геохимическому воздействию газодобывающего комплекса хорошо известна и описана в научной литературе (Башкин, 2017). При оценке геохимического “фона” важно знать особенности протекания процессов, которые определяют особенности состава почв. Основной процесс, на котором сфокусировано исследование, – биогенное накопление элементов в ходе детритогенеза (аккумуляции растительных остатков и торфа), имеющее первостепенное значение для формирования геохимической структуры ландшафтов севера Западной Сибири (Глазовская, 1988).

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Отбор проб выполнен в летний период 2017 г. на участке пос. Тазовский – пос. Новозаполярный (Заполярное месторожде-

ние) (рис. 1). Район работ находится на границе лесотундры и южной тундры и ограничен координатами 66°30′ с. ш. – 67°25′ с. ш. и 78°30′ в. д. – 79°35′ в. д. Литогенной основой ландшафта являются аллювиально-морские отложения четвертой морской террасы (am^4_{III}), менее распространены озерно-аллювиальные отложения третьей надпойменной террасы р. Таз (la^3_{III}) (Атлас…, 2014).

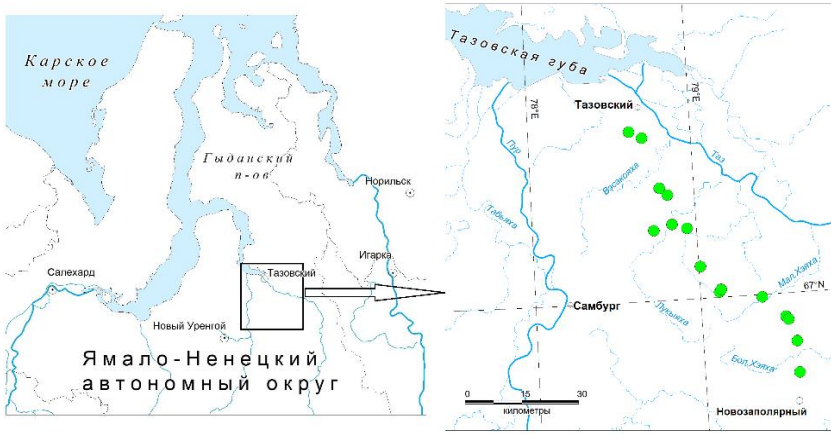

Рис. 1. Схема района исследований.
Fig. 1. Study area.

Почвенные прикопки в пределах сезонно талого слоя заложены на участках, различающихся по геоморфологическому положению, степени дренированности и характеру растительности: на выпуклых дренированных водоразделах с лиственничными кустарничково-лишайниковыми редколесьями, на относительно дренированных водоразделах с ерниковыми кустарничково-лишайниково-моховыми тундрами и на недренированных участках с олиготрофными кустарничково-сфагновыми плоскобугристыми болотами. В структуре почвенного покрова представлены: на породах тяжелого гранулометрического состава – криоземы (Folic Cryosols) (O–CR–C) и органо-криометаморфические глееватые почвы (Turbic Gleyic Cryosols) (O–CRMg–Cg); на песчано-супесчаных породах – подбуры (Entic Podzols) (O–BHF–BC–C),

подзолы (Albic Podzols) (O–E–BF–BC–C), торфяно-подзолы (Histic Podzols) (T–Eg–BHFg–CG), в пределах плоскобугристых торфяников – торфяные олиготрофные мерзлые почвы (Hemic Cryic Histosols) (O–TO–TT⊥) и сухоторфяные почвы (Histic Cryosols) (TJ-TT⊥). Названия почв даны по классификации почв России и WRB (Классификация, 2004; IUSS, 2014). Мощность сезонноталого слоя во время опробования варьировала от 40 см в торфяных почвах до 110 см в подбурах. По гранулометрическому составу почвы в большинстве случаев относятся к пылеватым и опесчаненным суглинкам.

При исследовании геохимических свойств полярных почв, в зависимости от поставленных задач, используют несколько способов опробования. Для оценки пространственного варьирования химического состава почв в каждом пункте опробования обычно отбирают один образец из поверхностного слоя разной мощности, от 3 до 25 см (Ji et al., 2019b; Moskovchenko et al., 2017; Gulinska et al., 2003; Hanaka et al., 2019; Wojtun et al., 2013; Вишневая, Попова, 2016). Для определения внутрипрофильного распределения элементов проводят отбор проб из каждого генетического горизонта (Ji et al., 2019a; Antcibor et al., 2014; Томашунас, Абакумов, 2014), либо ограничиваются отбором с фиксированной глубины без привязки к почвенным горизонтам (Abakumov et al., 2017; Halbach et al., 2017; Krajcharova et al., 2016). Нами был использован комбинированный подход. Для выявления особенностей геохимического фона территории были опробованы верхние 5 см почвы и слои с глубины 25–30 см, аналогично работам по изучению арктических почв Западно-Европейского сектора, в которых в качестве объектов опробования выступали top soil and deeper soil (Krajcharova et al., 2016; Halbach et al., 2017). В верхних 5 см почвы были опробованы горизонты O, T, TJ почв органогенного ствола и горизонты O, E, Eg постлитогенных почв. В срединных слоях с глубины 25–30 см опробованы горизонты BHF, BHF_g, BHF_e, CR, CG. Сходный подход с подразделением почвенных горизонтов на органогенные (O), торфяные (T) и срединные (BF, BHF, G) был применен при оценке фоновых концентраций элементов в почвах севера Западной Сибири (Опекунова и др., 2019).

Для уточнения особенностей радиальной дифференциации

элементного состава в трех широко распространенных типах почв (подбурах, торфяно-подзолах и олиготрофных торфяных почвах) было проведено исследование всех почвенных генетических горизонтов. Поскольку одна из задач исследования – выявление геохимических особенностей детритогенеза, то были отобраны пробы доминирующих в напочвенном покрове сфагновых мхов и лишайников (*Cladina stellaris*).

В лабораторных условиях пробы минеральных горизонтов почв были высушены до постоянной массы в сушильном шкафу, просеяны через сито с диаметром отверстий 1 мм для удаления корней растений и растерты в агатовой ступке до пудры. Пробы торфа и растений также были измельчены и растерты. Химический анализ проб проведен в центре коллективного пользования Института физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН (г. Пущино). Для определения валового содержания элементов использовался рентгенофлуоресцентный анализатор серии “СПЕКТРОСКАН МАКС-GV”. Благодаря возможности определения широкого круга микро- и макроэлементов, сравнительной простоте и низкой стоимости анализов метод нашел широкое применение в изучении состав почв и растений (Калинин и др., 2018; Avila-Perez et al., 2018; Rogan et al., 2019). Измерение осуществлялось по методикам 242/18-2010 для почв и 309/242-(01.00250-2008)-2012 для растительности. Репрезентативность обеспечивали калибровкой с помощью комплекта Государственных стандартных образцов состава почв, а также стандартных образцов пород и почв, полученных от Института Геологии университета Мехико (Мексика) (Lozano, Bernal, 2005). Анализ включал два параллельных определения в каждой пробе. Результаты, полученные в двух повторениях, проверялись на предмет расхождений с допусками (P = 0.95), рассчитанными для каждого измеряемого элемента отдельно. Если результаты испытания были удовлетворительными, то в качестве результата измерения принималось среднее арифметическое.

Содержание органического вещества определяли путем озоления в муфельной печи при t = 450 °C (т. е. была определена зольность в органогенных горизонтах и потеря при прокаливании в минеральных). Реакция почвенных растворов (pH) была опреде-

лена в водной вытяжке потенциометрическим методом на приборе "Анион-4100".

Для оценки биогеохимических особенностей обследованной территории были вычислены среднеарифметические значения концентраций элементов в почвах *(M*), среднеквадратическое отклонение (*SD*), медианы *(Me),* рассчитаны кларки концентрации КК – отношение содержания элементов в почвенных горизонтах к кларку верхней части континентальной земной коры по А.П. Виноградову (1962), коэффициенты биологического накопления Кб – отношение содержания элемента в золе растений к кларку и коэффициенты радиальной дифференциации R – отношение содержания элемента в генетических горизонтах почв к содержанию в породе или горизонте BC.

Для оценки процессов преобразования почвенных минералов подсчитан индекс химического изменения (chemical index of alteration) $CIA = 100 \cdot Al_2O_3 / (Al_2O_3 + CaO + Na_2O + K_2O)$, отражающий соотношение первичных и вторичных минералов и характеризующий процесс выщелачивания (Nesbitt, Young, 1982). Оценка зависимости содержания химических элементов от величины pH и количества органического вещества осуществлялась методом ранговой корреляции Спирмена из-за отсутствия нормального распределения для некоторых элементов. Особенности взаимосвязи химических элементов выявлялись с помощью факторного анализа (метод главных компонент). Также была проведена оценка различий между составом торфа болотных и тундровых почв с использованием непараметрического критерия Манна–Уитни. Подсчеты выполнены в пакете Statistica 6.0.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Обследованные почвы имеют преимущественно кислую реакцию (величина $pH_{водн.}$ изменяется от 4.1 до 6.1, среднее значение 4.5). Наиболее кислыми являются поверхностные органогенные горизонты, в нижней части профиля величина pH увеличивается. Для обследованных почв характерно широкое варьирование зольности, средние величины которой составили от 15.1% в подстилочно-торфяном горизонте до 95–97.4% в иллювиальных и криометаморфических горизонтах.

Результаты определения макроэлементного состава почв Пур-Тазовского междуречья представлены в таблице 1.

Таблица 1. Макроэлементный состав почв Пур-Тазовского междуречья
Table 1. Macroelemental composition of soils of the Pur-Taz interfluve

Показатель	Органогенные горизонты (n = 17)			Поверхностные горизонты, 0–5 см (n = 10)			Иллювиальные и глеевые горизонты средней части профиля, 25–30 см (n = 14)		
	M	***SD***	***Me***	***M***	***SD***	***Me***	***M***	***SD***	***Me***
Na_2O, %	0.57	0.14	0.54	0.89	0.20	0.93	0.94	0.18	0.95
MgO, %	0.16	0.30	0.02	0.98	0.60	1.06	1.19	0.51	1.19
Al_2O_3, %	3.66	3.75	2.06	11.0	2.1	11.8	11.7	1.74	11.8
SiO_2, %	19.6	23.2	6.91	63.1	9.7	67.5	69.6	5.87	69.9
K_2O, %	0.42	0.73	0.05	1.93	0.4	1.91	2.09	0.25	2.04
CaO, %	2.21	2.0	1.14	0.95	0.14	0.91	1.13	0.21	1.21
Fe, %	2.52	0.84	2.59	3.08	0.84	3.17	3.03	0.94	3.01

В макрокомпонентном составе минеральных горизонтов почв преобладают окислы кремния. Затем, в порядке убывания, следуют Al_2O_3, Fe_2O_3, K_2O. Доминирование кремнезема является свидетельством длительной криогенной трансформации и выветривания горных пород. Суммарное содержание преобладающих в составе SiO_2 и Al_2O_3 составляет 74.1–81.3%, что несколько ниже величин, свойственных арктическим почвам и достигающим 80–90% от вещества мелкозема (Добровольский, 1994). Этот факт говорит о более слабом проявлении криогенных процессов на исследованной территории по сравнению с арктическими тундрами. Величины индекса химического изменения CIA варьируют в небольших пределах – от 67.6 до 77.7 (среднее значение 73.9 ед.). Известно, что невыветрелые породы характеризуются значениями CIA около 50, в сильновыветрелых разновидностях CIA достигает 100 единиц (Сысо, 2007). Таким образом, обследованные почвы характеризуются средней степенью выветривания, значения CIA не достигают максимальных величин из-за замедленных процессов химического преобразования минералов в условиях низких

среднегодовых температур. Наименьший уровень выветривания отмечен на участке, почвообразующие породы которого представлены самыми молодыми (голоценовыми) отложениями террас р. Таз, что дает основание для вывода о зависимости степени выветрелости от возраста пород. Особый интерес представляет анализ микроэлементного состава почв, учитывая их экологическую опасность и значение для жизнедеятельности организмов. Обследованные нами почвы отличаются низким содержанием большинства металлов, содержание которых меньше величины кларка (табл. 2).

Значения КК < 1 свойственны коре выветривания и почвам арктических районов (Добровольский, 1994). В минеральных горизонтах выявлен недостаток таких элементов, как Mn, Cu, Rb (КК = 0.5), Ni, Sr (КК = 0.6), Fe, Zn, Pb, Ga (КК = 0.7). Околокларковые значения характерны для Ba, Co, Y, V, Hg. Интенсивное накопление (КК > 2) характерно для Cd, Sn, Zr, Mo.

В прошлом был проведен ряд исследований регионального геохимического фона в северных районах Западной Сибири, из которых наиболее полными являются работы коллективов ФГУНПП “Аэрогеология” (Сорокина и др., 2001) и СПбГУ (Опекунова и др., 2019). В обеих работах отмечен дефицит большинства микроэлементов в почвах. По данным Сорокиной с соавторами (2001), средние значения кларков концентрации (коэффициента Шоу) в различных ландшафтных провинциях севера Западной Сибири составляют 0.34–0.74, что говорит об этой территории как об области рассеяния. По оценке Опекуновой с соавторами (2019), концентрация тяжелых металлов в 3–9 раз ниже кларковых значений, причем химический состав почв отличается значительной контрастностью в зависимости от структуры микро- и мезокомплексов, формирующих тундровые и лесотундровые ландшафты.

Полученные нами результаты в целом подтверждают низкое содержание большинства микроэлементов в почвах, в том числе тяжелых металлов, являющихся индикаторами техногенного воздействия и наиболее часто определяемых в эколого-геохимических исследованиях.

Таблица 2. Микроэлементный состав почв Пур-Тазовского междуречья
Table 2. Microelemental composition of soils of the Pur-Taz interfluve

Элементы, мг/кг	Органогенные горизонты (n = 17)			Поверхностные горизонты, 0–5 см (n = 10)			Иллювиальные и глеевые горизонты средней части профиля, 25–30 см (n = 14)			Кларк по А.П. Виноградову	Региональный геохимический фон (Опекунова и др., 2019)
	M	***SD***	***Me***	***M***	***SD***	***Me***	***M***	***SD***	***Me***		
Ti	1858	1883	1380	5463	979	5751	5748	864	6006	4500	-
Mn	194	176	197	500	292	331	489	231	438	1000	375/339*
P	2624	2050	1681	697	615	410	369	205	328	930	-
S	3616	1814	3352	571	738	184	204	285	106	470	-
V	42.5	33.0	31.2	96.2	19.3	9.87	98.5	18.8	101.3	90	25/60*
Cr	39.4	29.1	26.7	97.0	19.3	9.49	103.0	21.2	105.4	83	20.6/42*
Co	31.0	12.1	30.0	16.9	4.7	1.61	19.2	5.25	18.8	18	5.8/8.4*
Ni	38.7	15.8	37.1	34.5	8.7	3.15	36.5	13.0	33.6	58	12/13*
Cu	41.0	21.9	47.7	17.4	12.1	1.99	24.1	12.4	22.4	47	8.68/8.7*
Zn	59.8	18.0	57.2	56.8	14.4	5.63	56.5	21.0	54.7	83	36.5/31*
As	18.7	20.5	13.2	н. о.	н. о.	н. о.	н. о.	н. о.	н. о.	1.7	-
Sr	286	81.3	288	174	19.1	18.0	190	22.6	195.6	340	-
Pb	10.3	6.7	10.2	13.3	6.0	1.30	10.7	4.11	11.8	16	13.4/9.9*
Rb	320	222	442	70.2	21.0	7.14	76.9	18.6	71.4	150	-
Ba	261	127	226	515	86.0	54.5	568	52.9	567	650	257/460*
Zr	70.9	127	10.4	288	78.1	32.3	342.0	78.8	354	170	-

Элементы, мг/кг	Органогенные горизонты (n = 17)			Поверхностные горизонты, 0–5 см (n = 10)			Иллювиальные и глеевые горизонты средней части профиля, 25–30 см (n = 14)			Кларк по А.П. Виноградову	Региональный геохимический фон (Опекунова и др., 2019)
	M	***SD***	***Me***	***M***	***SD***	***Me***	***M***	***SD***	***Me***		
Nb	74.0	49.5	99.5	16.5	4.3	1.74	19.6	3.33	20.3	20	-
Cs	4.1	1.3	4.1	4.63	1.2	0.47	4.58	1.36	4.6	3.7	-
Ga	33.5	18.4	40.4	13.6	2.7	1.39	13.9	2.67	13.8	19	-
Ce	41.5	17.9	43.0	52.2	16.3	5.56	63.5	8.56	65.7	70	-
La	10.6	12.7	2.12	26.6	6.2	2.75	31.4	6.89	31.2	29	-
Sc	5.59	4.3	3.21	11.0	2.3	1.23	10.6	2.20	10.7	10	-
Y	9.1	7.8	10.1	24.1	5.8	2.63	26.5	4.53	27.2	29	-
Yb	0.93	1.2	0.32	3.45	0.9	0.36	3.91	0.41	4.0	3.3	-
Mo	1.83	0.35	1.76	2.3	0.3	0.22	2.12	0.33	2.2	1.1	-
Sn	н. о.	н. о.	н. о.	н. о.	н. о.	н. о.	6.28	4.23	5.4	2.5	-
Cd	0.43	0.14	0.42	0.34	0.09	0.036	0.29	0.13	0.30	0.13	0.35/0.08*
Hg	0.33	0.21	0.44	0.074	0.02	0.007	0.082	0.016	0.07	0.083	0.10/0.02*

Примечание. *M* – среднее содержание элементов*; Me* – медиана, *SD* – стандартное отклонение; н. о. – содержание элемента было ниже порога обнаружения более чем в 50% проб; * – указано содержание в органогенных/срединных горизонтах.

Содержание Pb, Cu, Ni, Zn, Sr ниже кларка, Hg, Co – на его уровне. Малое содержание элементов вызвано несколькими причинами. Исследования состава почвообразующих пород севера Западной Сибири (Хренов, 1987; Московченко, 2013; Сысо, 2007; Опекунова и др., 2019) показали, что содержание в них микроэлементов находится на низком уровне, что наследуется почвами. Минералы пород подвержены интенсивному выщелачиванию в условиях кислой реакции среды и переувлажнения. Интенсивный вынос веществ из рыхлой толщи является закономерным следствием избыточного переувлажнения, характерного для холодно-влажных областей и является генетически обусловленным (Таргульян, 1971). Вместе с тем стойкие к разрушению минералы сохраняются в породах и почвах, и содержание входящих в их состав микроэлементов возрастает относительно содержания микроэлементов нестойких минералов. Подтверждением этого является повышенное содержание в обследованных почвах Zr – элемента, входящего в состав устойчивых к выветриванию минералов – кварца и циркона, и малоподвижного практически в любой кислотно-щелочной обстановке (Сысо, 2007). Повышенное содержание характерно также для малоподвижных в условиях кислых глеевых ландшафтов анионогенных элементов – Mo и Sn.

Обращает на себя внимание низкое содержание важных в физиологическом плане микроэлементов – Cu, для которой КК в постлитогенных почвах варьирует в пределах 0.3–0.6, и Zn (КК = 0.6–0.7). Недостаток Cu в почвах таежно-лесной биогеохимической зоны отмечался еще В.В. Ковальским (1970). Последующие исследования выявили резко выраженный дефицит этого элемента в почвах северных районов. Среднее фоновое содержание Cu в срединных (минеральных) горизонтах почв севера Западной Сибири составляет 8.7 мг/кг (Опекунова и др., 2019), что многократно меньше среднего значения для почв Земли, составляющего, согласно A. Kabata-Pendias (2011), 38.9 мг/кг. В почвах Тазовского полуострова содержание Cu во всех проанализированных пробах было ниже предела обнаружения (20 мг/кг) (Агбалян и др., 2015). Примечательно, что дефицит Cu отмечен также и в почвах других полярных районов Земли. В частности, в почвах Аляски содержание Cu меньше кларка земной коры и варьирует в преде-

лах 10–30 мг/кг, что вызвано криогенным преобразованием коренных пород, преобладанием кварца над силикатами в обломочных минералах (Добровольский, 1994). Вероятно, причиной дефицита является также высокая миграционной активность Cu в кислой среде, свойственной почвам полярных и бореальных районов.

Таким образом, результаты исследования состава почв в Пур-Тазовском междуречье в целом подтверждают дефицит физиологически важных микроэлементов и низкое содержание в фоновых условиях тяжелых металлов, относящихся к индикаторам техногенеза. Однако сравнение с фоновым содержанием тяжелых металлов в северных районах Западной Сибири (Опекунова и др., 2019) выявило, что почвы обследованной территории отличаются повышенным содержанием Mn, Zn, Cu, Co, Cr, V (табл. 2). Сопоставление с характеристиками регионального геохимического фона (Сорокина и др., 2001) также подтверждает повышенное, относительно среднерегиональных показателей, содержание Mn, Zn, Ni, Co, Cr, Cu, Ba, Mo.

Ранее отмечалось, что элементный состав почвообразующих пород на севере Западной Сибири существенно отличается в зависимости от их генезиса, причем наибольшее содержание микроэлементов свойственно морским породам тяжелого гранулометрического состава (Московченко, 2013). Было выявлено, что ландшафты севера Западной Сибири, в качестве литогенной основы которых выступают аллювиально-морские отложения третьей и четвертой террас, отличаются повышенным, по сравнению с сопредельными участками, содержанием как сидерофильных (V, Cr, Co, Ni), так и халькофильных (Zn, Cu, Pb) элементов (Опекунова и др., 2019). Таким образом, состав почвообразующих пород обследованного участка, среди которых преобладают аллювиально-морские отложения четвертой морской террасы, определяет относительно повышенное содержание элементов. Пур-Тазовское междуречье является районом относительной аккумуляции на фоне преобладающего рассеяния элементов, свойственного ландшафтам субполярных районов, сформировавшихся на озерно-аллювиальных и аллювиальных песчаных отложениях.

В предшествующих исследованиях неоднократно отмечались различия элементного состава генетических горизонтов почв

Западно-Сибирских тундр (Московченко, 2013; Томашунас, Абакумов, 2014; Опекунова и др., 2019). Однако элювиально-иллювиальная дифференциация почв тундр Западной Сибири в целом проявляется слабо (Васильевская и др., 1986), что связано с коротким периодом положительных температур, замедленной инфильтрацией вод при слабой дренированности территории и криогенными турбациями, приводящими к нарушению стратификации почвенных горизонтов, изменению закономерного распределения в почве гранулометрических фракций. В обследованных нами постлитогенных почвах (торфяно-подзолах, подбурах) различия элементного состава элювиальных и иллювиальных горизонтов невелики. Так, в подбурах максимальная величина коэффициента радиальной дифференциации отмечена для фосфора (R = 1.9) и серы (R = 2.8), т. е. элементов, согласно А.И. Перельману (1989), относящихся к группе энергичного биологического накопления. Биологическое накопление других элементов проявляется слабо, концентрация марганца, хрома, меди максимальна в нижней части профиля и минимальна в горизонте BHF_e, что связано с Al-Fe гумусовым процессом (рис. 2).

Более существенны различия элементного состава органогенных и минеральных горизонтов на участках с ослабленным дренажем, где наблюдается усиление торфонакопления. В торфяно-подзолах глеевых отношение содержания элементов в торфе к содержанию в минеральных горизонтах показывает активное биологическое накопление серы (R = 20.2), валового фосфора (R = 7.8). В то же время минеральные горизонты постлитогенных почв отличаются недостатком P и S (KK = 0.4). Содержание Cr, напротив, выше в минеральных горизонтах. Высокие концентрации P, S, Cu, Hg отмечены в торфяной олиготрофной почве (рис. 2).

Биологическая аккумуляция элементов в поверхностных органогенных горизонтах почв тундры и тайги зависит, прежде всего, от особенностей накопления их растениями. Отмечалось, что в растениях Уренгойских тундр (багульник, пушица) активно накапливаются халькофильные элементы, в то время как сидерофильные (Fe, Co), напротив, содержатся в концентрациях ниже среднемировых значений (Московченко и др., 2012).

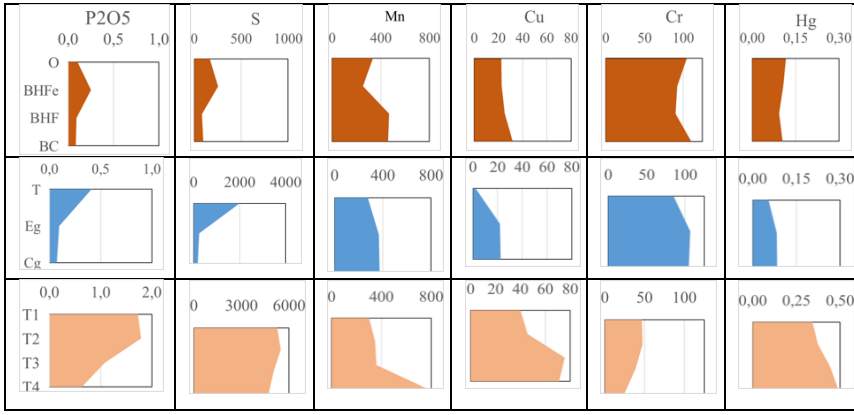

Рис. 2. Распределение элементов в профиле почв: верхний ряд – подбур оподзоленный, средний ряд – торфяно-подзол, нижний ряд – торфяная олиготрофная почва.
Fig. 2. The distribution of elements in the soil profile: upper row – Entic Podzols, middle row – Folic Histic Podzol; lower row – Hemic Cryic Histosol.

В обследованных почвах наиболее активно проявляется биогенная аккумуляция P и S, в торфе накапливаются Hg, Nb, Cu, Cd. Практически все эти элементы, за исключением Nb, относятся к халькофильным. При исследовании торфов лесотундры Европейского Северо-Востока России было отмечено, что накопление микроэлементов связано с атмосферными выпадениями и последующей биоаккумуляцией Hg, Cd, Pb, Cu (Василевич, 2018), т. е. халькофильных элементов. Отмечалось (Опекунова и др., 2019), что халькофилы Zn, Cu, Pb концентрируются в первую очередь в органогенном горизонте почв севера Западной Сибири.

Проведенный корреляционный анализ также подтверждает зависимость между содержанием органического вещества в почвах и концентрацией S и близких к ней Hg, Cu, Cd, для которых выявлена значимая положительная корреляция (табл. 3), причем для S зависимость близка к линейной ($r = 0.90$). Сильная связь также отмечена для Ga, для которого возможным источником обогащения торфяных почв являются природные пожары (Efremova et al., 1999), весьма частые в районе исследований. Отрицательная

зависимость характерна главным образом для литофильных элементов (Si, Ba, K, Ti, Al, Zr, La, Cr, Mg и др.).

Таблица 3. Корреляционная зависимость элементного состава почв с величиной pH и содержанием органического вещества ($p < 0.05$)
Table 3. Spearman's correlation coefficients between organic matter, pH values and element concentrations in soils ($p < 0.05$)

Показатель	Положительная корреляция	Отрицательная корреляция
Органическое вещество	S (0.90), Hg (0.83), Ga (0.79), Sr (0.79), P_2O_5 (0.66), Cu (0.59), As (0.59), Cd (0.53), CaO (0.52)	SiO_2 (-0.94), Yb (-0.94), Ba (-0.92), K_2O (-0.92), Y (-0.90), TiO_2 (-0.89), Al_2O_3 (-0.87), Zr (-0.85), Cr (-0. 83), La (-0.79), V (-0.78), MgO (-0.78), Na_2O (-0.74), Ce (-0.73), MnO (-0.56)
pH	Zr (0.70), SiO_2 (0.67), Yb (0.62), Ba (0.57), K_2O (0.57), TiO_2 (0.53), Y (0.51), La (0.50), Al_2O_3 (0.49), Ce (0.47), Cr (0.43), V (0.43)	Rb (-0.61), Ga (-0.61), S (-0.60), Hg (-0.60), Nb (-0.60), Cd (-0.53), Co (-0.52), Sr (-0.51), Cu (-0.49), P_2O_5 (-0.47).

Примечание. В скобках указаны значения коэффициентов корреляции Спирмена.

Зависимость между элементным составом и кислотно-щелочными условиями выражена не столь сильно, максимальные значения r отмечены для малоподвижных элементов (Zr, Si). Увеличение значений pH приводит к возрастанию содержания преимущественно литофильных элементов, а его снижение – халькофильных. Наблюдается сильная отрицательная связь между величиной pH и количеством органического вещества (r = -0.80). Учитывая, что кислотность почв зависит от количества органики и интенсивности ее разложения, отмеченные корреляционные зависимости содержания элементов от pH также в значительной сте-

пени определяются количеством органических веществ.

Для уточнения особенностей взаимосвязи элементов был проведен факторный анализ, который способен “сворачивать” многокомпонентный массив данных до ограниченного пользователем количества факторов, определяющих дисперсию выборки. При анализе нами было выделено два основных фактора, определяющих закономерности формирования элементного состава почв, которые в сумме определяют 74% варьирования. Их графическое отображение показывает четкое разделение элементов на несколько групп (рис. 3).

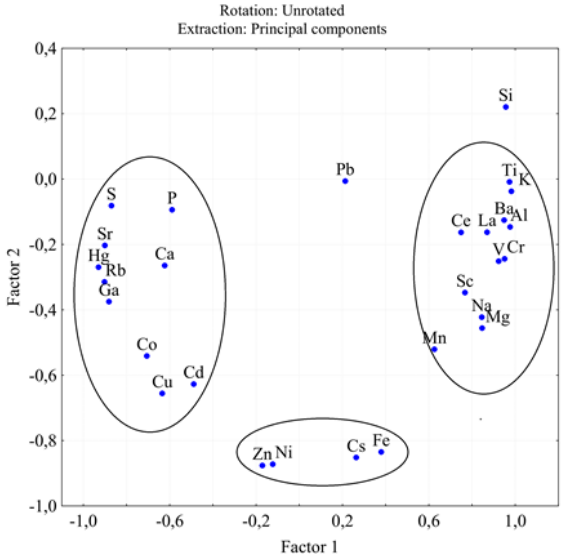

Рис. 3. Диаграмма факторных нагрузок содержания металлов в почвах.
Fig. 3. Diagram illustrating factor loading of metal concentration in soils.

В первую входят преимущественно халькофильные элементы (S, As, Cu, Cd, Hg, Ga), особенности транслокации которых связаны с биогеохимическими процессами. Во вторую группу входят преимущественно литофильные элементы (Si, Zr, Al, Ti, V, Cr, Mn Na, Mg, K), распределение которых связано с минералоги-

ческим составом пород. Третью группу, объединяющую Fe, Ni, Zn, Cs, можно интерпретировать как проявление миграции железоорганических комплексов и осаждения на окислительном барьере.

Таким образом, биологическое накопление играет важнейшую роль в формировании элементного состава почв. Для уточнения особенностей биологического накопления нами проведен анализ состава эдификаторов и доминантов растительного покрова: для верховых болот – мхов рода *Sphagnum*, для кустарничково-лишайниковых тундр и редколесий – лишайника *Cladina stellaris*. Выявлено, что лишайники характеризуется крайне низким содержанием элементов, существенно уступая в этом отношении сфагновым мхам (табл. 4).

Исключением являются Si, Al и Zn, которые содержатся примерно в равных концентрациях. В особенности заметны различия в накоплении активных водных мигрантов – Cl, Mg, Ca, Br, – содержание которых в сфагновых мхах больше на один математический порядок. Накопление в сфагнумах характерно также для Mn, Cr и Ba. Нужно отметить, что Mn и Cr в тундровых и таежных ландшафтах также отличаются повышенной водомиграционной активностью, что связано с высокой подвижностью в кислых глеевых почвах (Московченко, 2013).

Различия в составе лишайников и сфагновых мхов связаны с условиями поступления элементов и особенностями биологического накопления. Состав сфагновых мхов зависит от состава болотных вод со свойственной им кислой реакцией и повышенной концентрацией многих элементов, подвижных в кислой среде (прежде всего Fe и Mn). Играет роль также способность этих растений удерживать химические элементы, поступающие в болото из атмосферы, благодаря особым “воздушным клеткам” (Межибор, Большунова, 2014). Дренированные, возвышенные биотопы эпигейных лишайников *Cladina stellaris* находятся под воздействием атмосферных осадков с характерным для них крайне низким содержанием главных ионов и микроэлементов, а пылевые частицы, очевидно, слабо инкорпорируются на поверхности и межклеточном пространстве талломов.

Таблица 4. Элементный состав лишайников и сфагновых мхов
Table 4. The elemental composition of the lichen and sphagnum moss

Элементы	*Cladina stellaris*, n = 5		*Sphagnum*, n = 5	
	В абс. сухом веществе	В золе	В абс. сухом веществе	В золе
Ca, %	0.0742	3.0	0.2040	10.2
K, %	0.0858	3.4	0.1577	7.9
Al, %	0.0576	2.3	0.0501	2.5
S, %	0.0213	0.85	0.0365	1.8
Mg, %	< 0.001	0.04	0.0144	0.7
Si, %	0.301	12.0	0.3073	15.4
P, %	0.038	1.5	0.0286	1.4
Cl, мг/кг	2.3	92.4	171.3	8 563
Zn, мг/кг	16.6	664	17.6	881
Ni, мг/кг	1.2	46.4	1.5	73.5
Fe, мг/к г	315	12 615	423	21 142
Mn, мг/кг	57.6	2305	309	15 469
Cr, мг/кг	1.0	38.5	4.2	212.0
V, мг/кг	1.5	60.1	2.3	115.8
Sr, мг/кг	6.7	266.4	7.2	362.4
Br, мг/кг	1.5	58.4	4.5	227
Ba, мг/кг	8.4	337	23.4	1 170
Rb, мг/кг	18.0	720	15.4	770
Ti, мг/кг	80.0	3 200	62.7	3 133

Вычисление коэффициентов биологического накопления Кб (рис. 4) показало, что к элементам энергичного и сильного накопления (Кб = n – 100n) относятся Br, Cl, S, Mn, P, Zn, Rb, Ca, среднего (Кб = 0.1n – n) – Cr, Ni, V, Ba, Sr, Ti, Fe, слабого – Al, Si, что в целом соответствует рядам биологического поглощения по А.И. Перельману (1989), за исключением выявленной нами повышенной биоаккумуляции Mn, Cr, Rb в сфагновых мхах, связанной с ростом водомиграционной активности этих элементов в кислой глеевой обстановке и повышенным содержанием в болотных водах.

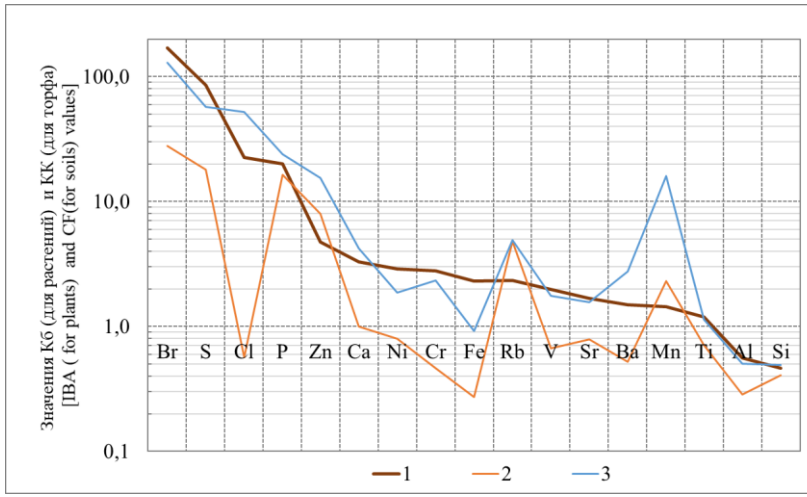

Рис. 4. Биогеохимические спектры сфагновых мхов лишайников *Cladina stellaris* и поверхностных горизонтов торфяных почв. 1 – олиготрофные торфяные почвы; 2 – Cladina; 3 – Sphagnum.
Fig. 4. Biogeochemical spectra of sphagnum moss and lichen *Cladina stellaris* and surface horizons of peat soils. 1 – Histic horizons of peat soils; 2 – Cladina; 3 – Sphagnum moss.

Сопоставление значений Кб и кларков концентрации олиготрофного торфа (рис. 4) показывает значительное сходство по большинству элементов, за исключением Fe, которое накапливается в торфе, Mn и Rb, содержание которых в растениях существенно выше. Ранее был отмечено, что в торфе содержание Mn меньше, чем в сфагновых мхах, поскольку в растениях этот элемент находится в легкорастворимой форме и быстро освобождается из разлагающихся растительных остатков; концентрация Fe, напротив, в торфе выше, что связано с закреплением в верхних горизонтах торфяных почв окисных форм железа. Верховым сфагновым малоразложившимся торфам со степенью разложения менее 5% обычно свойственна низкая подвижность Fe (Архипов и др., 1997).

Различия в составе растений дают основания для предположения о закономерных различиях в составе торфа, сформировав-

шегося в разных ландшафтных условиях: 1) на относительно повышенных участках, где развиты торфяно-подзолы и сухоторфяные почвы, и 2) на плоских недренированных водоразделах с плоскобугристыми болотами, где доминируют олиготрофные торфяные почвы. Проведенные подсчеты показали, что в торфе олиготрофных болот, сложенном преимущественно сфагновыми мхами, выше содержание S, As, Zn, Cu, Sr, Hg, Cd – халькофильных элементов, отличающихся интенсивным биологическим накоплением, а также Ca – главного металла живого вещества и близкого к нему по геохимическим свойствам Sr. В торфе почв, развитых под кустарничково-моховыми тундровыми сообществами и лиственничными редколесьями, существенно выше концентрации Al, Si, Ti, Zr – элементов, входящих в состав стойких к разрушению минералов, что свидетельствует о поступлении почвенного мелкозема в торфяные горизонты в результате процессов дефляции, широко распространенных в тундрах Ямала, Гыдана и Тазовского полуострова (Ермохина, 2008). Обогащенность торфов в тундровой зоне иловатыми и пылеватыми частицами была описана многими авторами (Игнатенко, Друзин, 1972; Васильевская, 1980). Зольность торфяного слоя в верхней части почвенного профиля в субарктической тундре может доходить до 28% (Дедков, 1995). Таким образом, поступление мелкозема в торф сильнее выражено на водоразделах с господством кустарничково-мохово-лишайниковых тундр, чем в олиготрофных болотных комплексах. В.В. Добровольским (2003) отмечалось, что максимальное содержание минеральной примеси в торфах характерно для равнинных дренированных участков, по которым происходит сток талых вод, что подтверждается нашими исследованиями.

Проведенный анализ достоверности различий средних значений с использованием критерия Манна – Уитни показал, что элемнтный состав олиготрофного болотного торфа достоверно отличается от торфа, сформировавшегося под тундровыми сообществами и редколесьями (табл. 5).

Таблица 5. Элементный состав торфа водораздельных кустарничково-мохово-лишайниковых тундр и олиготрофного сфагнового торфа верховых болот

Table 5. An elemental composition of peat of dwarf shrub-lichen-moss tundras and ombrotrophic bogs

Показатели	Сухоторфяные горизонты (n = 9)		Сфагновый торф олиготрофных болот (n = 8)		Значения критерия Манна–Уитни	Уровень значимости *p*
	M	***SD***	***M***	***SD***		
Na_2O, %	0.61	0.16	0.52	0.07	20	-
MgO, %	0.24	0.36	0.07	0.13	20	-
Al_2O_3, %	6.08	3.51	0.95	0.67	10	0.01
SiO_2, %	32.3	23.9	5.29	6.64	14	0.05
P_2O_5, %	0.80	0.59	0.45	0.20	22	-
S, %	0.34	0.22	0.39	0.11	25	-
K_2O, %	0.76	0.83	0.03	0.06	18	0.05
CaO, %	1.30	1.54	3.24	1.77	12.5	0.05
TiO_2, %	0.47	0.34	0.13	0.07	11	0.05
MnO, %	0.027	0.03	0.022	0.02	31	-
Fe_2O_3, %	3.94	1.33	3.16	0.73	13	0.05
V, мг/кг	66.2	26.1	15.8	7.9	8	0.01
Cr, мг/кг	58.0	27.1	18.5	6.3	9	0.01
Co, мг/кг	30.0	15.6	32.2	4.1	26	-
Ni, мг/кг	42.5	19.3	34.3	6.6	31	-
Cu, мг/кг	34.9	26.8	47.9	8.1	19	-
Zn, мг/кг	51.7	14.1	68.9	16.4	16	0.05
As, мг/кг	16.8	20.3	20.8	19.2	21	-
Sr, мг/кг	235.5	66.1	344.0	45.3	9	0.01
Pb, мг/кг	11.6	7.1	8.8	5.2	21	-
Rb, мг/кг	207.9	187.9	445.9	169.8	10	0.01
Ba, мг/кг	327.2	134.0	187.1	42.2	10	0.01
Zr, мг/кг	125.6	144.9	0.27	9.18	8	0.01
Nb, мг/кг	50.9	44.1	99.9	38.1	12	0.05
Cs, мг/кг	4.4	1.5	3.69	0.76	25	-
Ga, мг/кг	23.3	13.9	44.9	14.5	8	0.01
Ce, мг/кг	50.7	15.2	31.2	13.4	14	0.05
La, мг/кг	19.5	10.9	0.57	0.99	5	0.01
Sc, мг/кг	7.19	4.27	3.79	3.24	17	-
Y, мг/кг	14.5	6.3	3.13	2.87	8	0.01
Yb, мг/кг	1.52	1.40	0.26	0.07	8	0.01
Mo, мг/кг	2.02	0.32	1.62	0.21	10	0.05
Sn, мг/кг	1.25	3.53	0.00	0.00	-	-
Cd, мг/кг	0.39	0.11	0.47	0.15	23	-
Hg, мг/кг	0.22	0.17	0.46	0.16	8	0.01

На формирование состава торфа оказывают определяющее влияние процессы биологического накопления растениями-доминантами, особенности водомиграционной активности элементов в болотных водах, поступление почвенного мелкозема и аэрозолей воздушным путем.

Различия состава олиготрофного сфагнового торфа болот и торфа кустарничково-моховых тундр и редколесий необходимо учитывать при проведении мониторинга поступления тяжелых металлов.

ВЫВОДЫ

1. В почвах Пур-Тазовского междуречья среднее содержание экологически опасных тяжелых металлов меньше кларка земной коры (Cu, Pb, Zn, Ni, Sr), либо на уровне кларка (Hg, Co). Повышенные концентрации свойственны малоподвижным элементам (Zr, Mo, Sn). Полученные результаты в целом подтверждают низкое содержание микроэлементов в почвах севера Западной Сибири, однако по сравнению с сопредельными участками, в Пур-Тазовском междуречье почвы содержат больше Mn, Zn, Cu, Cr, Ni, Co, Cd, что связано с минералогическим и гранулометрическим составом почвообразующих пород (аллювиально-морских отложений), которые характеризуются более высокими концентрациями элементов по сравнению с озерно-аллювиальными отложениями.

2. В вертикальном профиле почв заметны различия элементного состава органогенных и минеральных горизонтов по содержанию халькофильных элементов (S, P, Hg, Zn, Cu). Выявлена корреляционная зависимость между содержанием органического вещества в почвах и концентрацией S, Hg, Ga, Sr, Cu, As, Cd. Накопление этих элементов на биогеохимическом барьере детритогенеза определяет вертикальную геохимическую структуру почв.

3. Слоевища напочвенных лишайников характеризуются крайне низким содержанием элементов, существенно уступая в этом отношении сфагновым мхам, состав которых зависит от болотных вод со свойственной им повышенной концентрацией многих элементов, подвижных в кислой среде.

4. Отмечены различия состава олиготрофного торфа болотных почв и поверхностных органогенных горизонтов почв, развитых под редколестями и тундровыми сообществми (торфяно-подзолов, сухоторфяных почв). В олиготрофном торфе болотных почв, сформированном сфагновыми мхами, выше содержание халькофильных элементов, активно мигрирующих в кислых водах (Zn, Cu, As, Cd, Hg). В органогенных горизонтах почв дренированных участков выше концентрации элементов-литофилов: Al, Si, Ti, Zr, – поступающих в результате дефляции и смыва частиц талыми водами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Агбалян Е.В., Шинкарук Е.В.* Уровень химического загрязнения почвы в долине реки Лукыяха Тазовского полуострова // Научный вестник Ямало-Ненецкого автономного округа. 2015. № 4 (89). С. 42–48.
2. *Алексеев И.И., Динкелакер Н.В., Орипова А.А., Семьина Г.А., Морозов А.А., Абакумов Е.В.* Оценка экотоксикологического состояния почв полярного Урала и южного Ямала // Гигиена и санитария. 2017. Т. 96. № 10. С. 941–945. DOI: 10.18821/0016-9900-2017-96-10-941-945.
3. *Архипов В.С., Бернатонис В.К., Резчиков В.И.* Железо в торфах центральной части Западной Сибири // Почвоведение. 1997. № 3. С. 345–351.
4. *Атлас Ямало-Ненецкого автономного округа*. ФГУП Омская картографическая фабрика, 2004. 303 с.
5. *Башкин В.Н.* Биогеохимические циклы в тундровых экосистемах импактных зон газовой индустрии // Геохимия. 2017. № 10. С. 954–966. DOI: 10.7868/S0016752517100028.
6. *Василевич Р.С.* Макро- и микроэлементный состав мерзлотных бугристых торфяников лесотундры европейского северо-востока России // Геохиимия. 2018. № 12. С. 1158–1172. DOI: 10.1134/S0016752518100126.
7. *Васильевская В.Д.* Почвообразование в тундрах Средней Сибири. М.: Наука, 1980. 236 с.
8. *Васильевская В.Д., Иванов В.В., Богатырев Л.Г.* Почвы севера Западной Сибири. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1986. 286 с.
9. *Виноградов А.П.* Среднее содержание химических элементов в главных типах изверженных горных пород Земной коры // Геохимия. 1962. № 7. С. 555–571.

10. *Вишневая Ю.С., Попова Л.Ф.* Оценка экологического состояния и степени загрязнения тяжелыми металлами почв Арктики // Вестник МГОУ. Серия: Естественные науки. 2016. № 2. С. 96–104.
11. *Глазовская М.А.* Геохимия природных и техногенных ландшафтов СССР. М.: Высшая школа, 1988. 328 с.
12. *Дедков В.С.* Почвенный покров водоразделов / Природа Ямала. Екатеринбург: УИФ Наука, 1995. С. 109–121.
13. *Добровольский В.В.* Основные черты геохимии арктического почвообразования // Почвоведение. 1994. № 6. С. 85–93.
14. *Добровольский В.В.* Основы биогеохимии. М.: Академия, 2003. 400 с.
15. *Ермохина К.А.* Фитоиндикация стадий развеивания песчаных отложений водоразделов в типичных тундрах Ямала // Проблемы региональной экологии. М.: Камертон, 2008. Вып. 6. С. 78–84.
16. *Игнатенко И.В., Друзин А.В.* Физико-химическая характеристика почв лесотундрового стационара. Почвы и растительность восточноевропейской лесотундры (ред. Б.Н. Норин). Л: Наука, 1972. С. 30–63.
17. *Калинин П.И., Кудреватых И.Ю., Вагапов И.М., Борисов А.В., Алексеев А.О.* Биогеохимические процессы в степных ландшафтах Ергенинской возвышенности в голоцене // Почвоведение. 2018. № 5. С. 526–537.
18. *Классификация и диагностика почв России*. Смоленск: Изд-во Ойкумена, 2004. 342 с.
19. *Межибор А.М., Большунова Т.С.* Биогеохимическая характеристика сфагновых мхов и эпифитных лишайников в районах нефтегазодобывающего комплекса Томской области // Известия Томского политехнического университета. 2014. Т. 325. № 1. С. 205–213.
20. *Моисеенко Т.И., Гашев С.Н.* Биогеохимическая индикация загрязнения металлами и радионуклидами в регионах нефтедобычи // Доклады Академии Наук, 2012. Т. 447. № 5. С. 557–560. DOI: 10.1134/S1028334X12120112.
21. *Московченко Д.В., Моисеева И.Н., Хозяинова Н.В.* Элементный состав растений Уренгойских тундр // Вестник экологии, лесоведения и ландшафтоведения. 2012. № 12. С. 130–136.
22. *Московченко Д.В.* Экогеохимия нефтедобывающих районов Западной Сибири. Новосибирск: Академ. изд-во “ГЕО”, 2013. 260 с.
23. *Опекунова М.Г., Опекунов А.Ю., Кукушкин С.Ю., Арестова И.Ю.* Оценка трансформации природной среды в районах разработки углеводородного сырья на севере Западной Сибири // Сибирский экологический журнал. 2018. Т. 25. № 1. С. 122–138. DOI: 10.15372/SEJ20180111.

24. *Опекунова М.Г., Опекунов А.Ю., Кукушкин С.Ю., Ганул А.Г.* Фоновое содержание химических элементов в почвах и донных осадках севера Западной Сибири // Почвоведение. 2019. № 4. С. 422–439. DOI: 10.1134/S0032180X19020114.
25. *Перельман А.И.* Геохимия. М.: Высшая школа, 1989. 528 с.
26. *Пятницкая Г.Р., Радчикова А.М., Скоробогатов В.А., Рыбальченко В.В.* Перспективы газонефтеносности восточных районов Пур-Тазовской области Западной Сибири // Научно-технический сборник "Вести газовой науки". 2010. № 2 (5). С. 12–21.
27. *Сорокина Е.П., Дмитриева Н.К., Карпов Л.К., Масленников В.В.* Анализ регионального геохимического фона как основа эколого-геохимического картирования равнинных территорий: на примере северной части Западно-Сибирского региона // Прикладная геохимия. Вып. 2. Экологическая геохимия. М.: Изд-во ИМГРЭ, 2001. С. 316–338.
28. *Сысо А.И.* Закономерности распределения химических элементов в почвообразующих породах и почвах Западной Сибири. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2007. 275 с.
29. *Таргульян В.О.* Почвообразование и выветривание в холодных гумидных областях. М.: Наука, 1971. 268 с.
30. *Томашунас В.М., Абакумов Е.В.* Содержание тяжелых металлов в почвах полуострова Ямал и острова Белый // Гигиена и санитария. 2014. № 6. С. 26–31.
31. *Хренов В.Я.* Содержание микроэлементов в почвообразующих породах Севера Тюменской области // Геогр. и прир. рес. 1987. № 3. С. 163–165.
32. *Abakumov E., Shamilishviliy G., Yurtaev A.* Soil polychemical contamination on Beliy Island as key background and reference plot for Yamal region // Polish Polar Research. 2017. Vol. 38(3). P. 313–332. DOI: 10.1515/popore-2017-0020.
33. *Alekseev I., Shamilishvili G., Abakumov E.* Ecotoxicological State of urban soils of the Arctic with different functional Load (Yamal autonomous region). In: Vasenev V., Dovletyarova E., Cheng Z., Prokof'eva T., Morel J., Ananyeva N. (eds). Urbanization: Challenge and Opportunity for Soil Functions and Ecosystem Services. SUITMA 2017. Springer Geography. 2019. P. 206–211. DOI: 10.1007/978-3-319-89602-1_25.
34. *Ávila-Pérez P., Longoria-Gándara L.C., García-Rosales G. et al.* Monitoring of elements in mosses by instrumental neutron activation analysis and total X-ray fluorescence spectrometry // J. Radioanal. Nucl. Chem. 2018. Vol. 317(1). P. 367–380. DOI: 10.1007/s10967-018-5896-z.
35. *Antcibor I., Eschenbach A., Zubrzycki S., Kutzbac L., Bolshiyanov D., Pfeiffer E.M.* Trace metal distribution in pristine permafrost-affected soils of

the Lena River delta and its hinterland, northern Siberia, Russia // Biogeosciences. 2014. No. 11. P. 1–15. DOI: 10.5194/bg-11-1-201.
36. *Basiliko N., Yavitt J.B.* Influence of Ni, Co, Fe, and Na additions on methane production in Sphagnum-dominated Northern American peatlands // Biogeochemistry. 2001. Vol. 52. P. 133–153. DOI: 10.1023/A:1006461803585.
37. *Efremova T.T., Efremov S.P., Koutzenogii K.P., Peresedov V.F.* Biogeochemical migration of calcophylic elements in the conditions of a deep-seated marsh in West Siberia // Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry. 1999. Vol. 241(2). P. 355–360. DOI: 10.1007/BF02347475.
38. *Gulińska J., Rachlewicz G., Szczuciński W., Barałkiewicz D., Kózka M., Bulska E., Burzyk M.* Soil contamination in High Arctic areas of human impact, central Spitsbergen, Svalbard // Polish Journal of Environmental Studies. 2003. Vol. 12(6). P. 701–707.
39. *Halbach K., Mikkelsen Ø., Berg T., Steinnes E.* The presence of mercury and other trace metals in surface soils in the Norwegian Arctic // Chemosphere. 2017. Vol. 188. P. 567–574. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2017.09.012.
40. *Hanaka A., Plak A., Zagórski P., Ozimek E., Rysiak A., Majewska M., Jaroszuk-Ściseł J.* Relationships between the properties of Spitsbergen soil, number and biodiversity of rhizosphere microorganisms, and heavy metal concentration in selected plant species // Plant and Soil. 2019. Vol. 436 (1–2). P. 49–69. DOI: 10.1007/s11104-018-3871-7.
41. *IUSS Working Group WRB*. 2014. World Reference Base for Soil Resources 2014. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. World Soil Resources Reports No. 106. FAO, Rome.
42. *Ji X., Abakumov E., Antcibor I., Tomashunas V., Knoblauch C., Zubzycki S., Pfeiffer E.M.* Influence of anthropogenic activities on metals in arctic permafrost: a characterization of benchmark soils on the Yamal and Gydan peninsulas in Russia // Archives of Environmental Contamination and Toxicology. 2019a. Vol. 76(4). P. 540–553. DOI: 10.1007/s00244-019-00607-y.
43. *Ji X., Abakumov E., Polyakov V.* Assessments of pollution status and human health risk of heavy metals in permafrost-affected soils and lichens: A case-study in Yamal Peninsula, Russia Arctic // Human and Ecological Risk Assessment. 2019b. Vol. 25(8). P. 2142–2159. DOI: 10.1080/10807039.2018.1490887.
44. *Krajcarova L., Novotny K., Chattova B., Elser J.* Elemental analysis of soils and Salix polaris in the town of Pyramiden and its surroundings

(Svalbard) // Environmental Science and Pollution Research. 2016. Vol. 23. P. 10124–10137. DOI: 10.1007/s11356-016-6213-4.
45. *Kabata-Pendias A.* Trace elements in soils and plants. 4th ed. CRC Press, 2011. 534 p.
46. *Lozano R., Bernal J.P.* Characterization of a new set of eight geochemical reference materials for XRF major and trace element analysis // Revista Mexicana de Ciencias Geológicas. 2005. Vol. 22(3). P. 329–344.
47. *Moskovchenko D.V., Kurchatova A.N., Fefilov N.N., Yurtaev A.A.* Concentrations of trace elements and iron in the Arctic soils of Belyi Island (the Kara Sea, Russia): patterns of variation across landscapes // Environmental Monitoring and Assessment. 2017. Vol. 189:210. DOI: 10.1007/s10661-017-5928-0.
48. *Nesbitt H.W., Young G.M.* Early Proterozoic climate and plate motions inferred from major element chemistry of lutites // Nature. 1982. Vol. 299. P. 715–717. DOI: 10.1038/299715a0.
49. *Raudina T.V., Loiko S.V., Lim A., Manasypov R.M., Shirokova L.S., Istigechev G.I., Kuzmina D.M., Kulizhsky S.P., Vorobyev S.N., Pokrovsky O.S.* Permafrost thaw and climate warming may decrease the CO_2, carbon, and metal concentration in peat soil waters of the Western Siberia Lowland // Science of the Total Environment. 2018. Vol. 634(1). P. 1004–1023. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2018.04.059.
50. *Rogan G., Tighe M., Grave P. et al.* Optimization of portable X-ray fluorescence spectrometry for the assessment of soil total copper concentrations: application at an ancient smelting site // J. Soils Sediments. 2019. Vol. 19 (2). P. 830–839. DOI: 10.1007/s11368-018-2091-3.
51. *Wojtuń B., Samecka-Cymerman A., Kolon K., Kempers A.J., Skrzypek G.* Metals in some dominant vascular plants, mosses, lichens, algae, and the biological soil crust in various types of terrestrial tundra, SW Spitsbergen, Norway // Polar Biology. 2013. Vol. 36 (12). P. 1799–1809. DOI: 10.1007/s00300-013-1399-0.

REFERENCES

1. Agbalyan E.V., Shinkaruk E.V., Uroven' khimicheskogo zagryazneniya pochvy v doline reki Lukyyakha Tazovskogo poluostrova (The level of chemical pollution of the soil in the valley of the river Lukiyakha of the Taz Peninsula), *Nauchnyj vestnik Jamalo-Neneckogo avtonomnogo okruga,* 2015, No. 4 (89), pp. 42–48.
2. Alekseev I.I., Dinkelaker N.V., Oripova A.A., Sem'ina G.A., Morozov A.A., Abakumov E.V., Otsenka ekotoksikologicheskogo sostoyaniya pochv polyarnogo Urala i yuzhnogo Yamala (Assessment of ecotoxicological state of

soils of the polar Urals and southern Yamal), *Gigiena i sanitarija*, 2017, Vol. 96, No. 10, pp. 941–945, DOI: 10.18821/0016-9900-2017-96-10-941-945.
3. Arkhipov V.S., Bernatonis V.K., Rezchikov V.I., Zhelezo v torfakh tsentral'noi chasti Zapadnoi Sibiri (Iron in peat in the central part of Western Siberia), *Pochvovedenie*, 1997, No. 3, pp. 345–351.
4. *Atlas Jamalo-Neneckogo avtonomnogo okruga* (Atlas of the Yamalo-Nenets Autonomous district), Omsk: FGUP Omskaja kartografiche-skaja fabrika, 2004, 303 p.
5. Bashkin V.N., Biogeokhimicheskie tsikly v tundrovykh ekosistemakh impaktnykh zon gazovoi industrii (Biogeochemical cycles in tundra ecosystems in areas impacted by gas industry facilities), *Geohimija*, 2017, No. 10, pp. 954–966, DOI: 10.7868/S0016752517100028.
6. Vasilevich R.S., Makro- i mikroelementnyi sostav merzlotnykh bugristykh torfyanikov lesotundry evropeiskogo severo-vostoka Rossii (Major and trace element compositions of hummocky frozen peatlands in the forest–tundra of northeastern European Russia), *Geohimija*, 2018, No. 12, pp. 1158–1172. DOI: 10.1134/S0016752518100126.
7. Vasil'evskaja V.D., *Pochvoobrazovanie v tundrah Srednej Sibiri* (Soil formation in the tundra of Central Siberia), Moscow: Nauka, 1980, 236 p.
8. Vasil'evskaja V.D., Ivanov V.V., Bogatyrev L.G., *Pochvy severa Zapadnoj Sibiri* (Soils of the north of Western Siberia), Moscow: Izd-vo MGU, 1986, 286 p.
9. Vinogradov A.P., Srednee soderzhanie khimicheskikh elementov v glavnykh tipakh izverzhennykh gornykh porod Zemnoi kory (The average content of chemical elements in the main types of igneous rocks of the Earth's crust), *Geohimija*, 1962, No. 7, pp. 555–571.
10. Vishnevaya Yu.S., Popova L.F., Otsenka ekologicheskogo sostoyaniya i stepeni zagryazneniya tyazhelymi metallami pochv Arktiki (Assessment of the ecological status and degree of contamination by heavy metals in the soils of the Arctic), *Vestnik MGOU*, Serija Estestvennye nauki, 2016, No. 2, pp. 96–104.
11. Glazovskaja M.A., *Geohimija prirodnyh i tehnogennyh landshaftov SSSR* (Geochemistry of natural and technogenic landscapes of the USSR), Moscow: Vysshaja shkola, 1988, 328 p.
12. Dedkov V.S., Pochvennyj pokrov vodorazdelov (Soil cover of watersheds). In: *Priroda Jamala*. (The nature of Yamal Prninsula), Ekaterinburg: Nauka, 1995, pp. 109–121.
13. Dobrovol'skij V.V., Osnovnye cherty geohimii arkticheskogo pochvoobrazovanija (The main features of the geochemistry of the Arctic soil formation), *Pochvovedenie*, 1994, No. 6, pp. 85–93.

14. Dobrovol'skij V.V., *Osnovy biogeohimii* (Fundamentals of biogeochemistry), Moscow: Akademija, 2003, 400 p.
15. Ermokhina K.A., Fitoindikatsiya stadii razveivaniya peschanykh otlozhenii vodorazdelov v tipichnykh tundrakh Yamala (Phytoindication of the stages of dispersal of sandy deposits of watersheds in typical tundra of the Yamal peninsula), *Problemy regional'noi ekologii*, 2008, No. 6, pp. 78–84.
16. Ignatenko I.V., Druzin A.V., Fiziko-himicheskaja harakteristika pochv lesotundrovogo stacionara (Physico-chemical characteristics of the soils of the forest-tundra hospital, In: *Pochvy i rastitel'nost' vostochnoevropejskoj lesotundry* (Soils and vegetation of the East European forest-tundra, Ed. B.N. Norin), Leningrad: Nauka, 1972, pp. 30–63.
17. Kalinin P.I., Kudrevatykh I.Yu., Vagapov I.M., Borisov A.V., Alekseev A.O., Biogeokhimicheskie protsessy v stepnykh landshaftakh Ergeninskoi vozvyshennosti v golotsene (Biogeochemical processes in steppe landscapes of the Ergeni upland in the Holocene), *Pochvovedenie*, 2018, No. 5, pp. 526–537.
18. *Klassifikatsiya i diagnostika pochv Rossii* (Classification and diagnosis of soils of Russia), Smolensk: Oykumena, 2004, 342 p.
19. Mezhibor A.M., Bolshunova T.S., Biogeochemistry of sphagnum moss and epiphytic lichens in oil and gas exploration areas of Tomsk region, *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2014, Vol. 325, No. 1, pp. 205–213.
20. Moiseenko T.I., Gashev S.N., Biogeokhimicheskaya indikatsiya zagryazneniya metallami i radionuklidami v regionakh neftedobychi (Biogeochemical indication of pollution with metals and radionuclides in oil-producing regions), *Doklady Akademii Nauk*, 2012, Vol. 447, No. 5, pp. 557–560, DOI: 10.1134/S1028334X12120112.
21. Moskovchenko D.V., Moiseeva I.N., Khozyainova N.V., Elementnyi sostav rastenii Urengoiskikh tundr (Elemental composition of plants of the Urengoy tundra), *Vestnik ekologii, lesovedeniya i landshaftovedeniya*, 2012, No. 12, pp. 130–136.
22. Moskovchenko D.V., Ekogeokhimiya neftedobyvayushchikh raionov Zapadnoi Sibiri (Ecogeochemistry of oil-producing regions of Western Siberia), Novosibirsk: “GEO”, 2013, 260 p.
23. Opekunova M.G., Opekunov A.Yu., Kukushkin S. Yu., Arestova I.Yu., Otsenka transformatsii prirodnoi sredy v raionakh razrabotki uglevodorodnogo syr'ya na severe Zapadnoi Sibiri (Evaluation of environmental transformation in areas of hydrocarbon deposits in the north of Western Siberia), *Sibirskii ekologicheskii zhurnal*, 2018, Vol. 25, No. 1, pp. 122–138, DOI: 10.15372/SEJ20180111.

24. Opekunova M.G., Opekunov A.Yu., Kukushkin S.Yu., Ganul A.G., Fonovoe soderzhanie khimicheskikh elementov v pochvakh i donnykh osadkakh severa Zapadnoi Sibiri (Background content of chemical elements in soils and bottom sediments of the North of Western Siberia), *Pochvovedenie*, 2019, No. 4, pp. 422–439, DOI: 10.1134/S0032180X19020114.
25. Perel'man A.I., *Geohimija* (Geochemistry), Moscow: Vysshaja shkola, 1989, 528 p.
26. Pyatnitskaya G.R., Radchikova A.M., Skorobogatov V.A., Rybal'chenko V.V., Perspektivy gazoneftenosnosti vostochnykh raionov Pur-Tazovskoi oblasti Zapadnoi Sibiri (Prospects for gas and oil potential of the eastern regions of Pur-Taz region of Western Siberia), *Vesti gazovoj nauki*, 2010, No. 2 (5), pp. 12–21.
27. Sorokina E.P., Dmitrieva N.K., Karpov L.K., Maslennikov V.V., *Analiz regional'nogo geokhimicheskogo fona kak osnova ekologo-geokhimicheskogo kartirovaniya ravninnykh territorii: na primere severnoi chasti Zapadno-Sibirskogo regiona* (Analysis of the regional geochemical background as the basis for ecological and geochemical mapping of lowland territories: on the example of the Northern part of the West Siberian region), *Prikladnaja geohimija. Ekologicheskaya geokhimiya*, 2001, No. 2, pp. 316–338.
28. Syso A.I., *Zakonomernosti raspredeleniya khimicheskikh elementov v pochvoobrazuyushchikh porodakh i pochvakh Zapadnoi Sibiri* (Patterns of distribution of chemical elements in soil-forming rocks and soils of Western Siberia)., Novosibirsk: Publishing House of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 2007, 275 p.
29. Targul'yan V.O., *Pochvoobrazovanie i vyvetrivanie v kholodnykh gumidnykh oblastyakh* (Soil formation and weathering in cold humid areas), Moscow: Nauka, 1971, 268 p.
30. Tomashunas V.M., Abakumov E.V., Soderzhanie tyazhelykh metallov v pochvakh poluostrova Yamal i ostrova Belyi (The content of heavy metals in soils of the Yamal Peninsula and the Bely Island), *Gigiena i sanitarija*, 2014, No. 6, pp. 26–31.
31. Khrenov V.Ya., Soderzhanie mikroelementov v pochvoobrazuyushchikh porodakh Severa Tyumenskoi oblasti (Content of trace elements in soil-forming rocks of the North of the Tyumen region), *Geogr. i prir. res*, 1987, No. 3, pp. 163–165.
32. Abakumov E., Shamilishviliy G., Yurtaev A., Soil polychemical contamination on Beliy Island as key background and reference plot for Yamal region, *Polish Polar Research*, 2017, Vol. 38(3), pp. 313–332, DOI: 10.1515/popore-2017-0020.
33. Alekseev I., Shamilishvili G., Abakumov E., Ecotoxicological State of urban soils of the Arctic with different functional Load (Yamal autonomous

region), In: Vasenev V., Dovletyarova E., Cheng Z., Prokof'eva T., Morel J., Ananyeva N. (Eds), *Urbanization: Challenge and Opportunity for Soil Functions and Ecosystem Services*, SUITMA 2017, Springer Geography, 2019, pp. 206–211, DOI: 10.1007/978-3-319-89602-1_25.
34. Ávila-Pérez P., Longoria-Gándara L.C., García-Rosales G. et al., Monitoring of elements in mosses by instrumental neutron activation analysis and total X-ray fluorescence spectrometry, *J. Radioanal. Nucl. Chem*, 2018, Vol. 317(1), pp. 367–380, DOI: 10.1007/s10967-018-5896-z.
35. Antcibor I., Eschenbach A., Zubrzycki S., Kutzbac L., Bolshiyanov D., Pfeiffer E.M., Trace metal distribution in pristine permafrost-affected soils of the Lena River delta and its hinterland, northern Siberia, Russia, *Biogeosciences*, 2014, No. 11, pp. 1–15, DOI: 10.5194/bg-11-1-201.
36. Basiliko N., Yavitt J.B., Influence of Ni, Co, Fe, and Na additions on methane production in Sphagnum-dominated Northern American peatlands, *Biogeochemistry*, 2001, Vol. 52, pp. 133–153, DOI: 10.1023/A:1006461803585.
37. Efremova T.T., Efremov S.P., Koutzenogii K.P., Peresedov V.F., Biogeochemical migration of calcophylic elements in the conditions of a deep-seated marsh in West Siberia, *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 1999, Vol. 241(2), pp. 355–360, DOI: 10.1007/BF02347475.
38. Gulińska J., Rachlewicz G., Szczuciński W., Barałkiewicz D., Kózka M., Bulska E., Burzyk M., Soil contamination in High Arctic areas of human impact, central Spitsbergen, Svalbard, *Polish Journal of Environmental Studies*, 2003, Vol. 12(6), pp. 701–707.
39. Halbach K., Mikkelsen Ø., Berg T., Steinnes E., The presence of mercury and other trace metals in surface soils in the Norwegian Arctic, *Chemosphere*, 2017, Vol. 188, pp. 567–574, DOI: 10.1016/j.chemosphere.2017.09.012.
40. Hanaka A., Plak A., Zagórski P., Ozimek E., Rysiak A., Majewska M., Jaroszuk-Ściseł J., Relationships between the properties of Spitsbergen soil, number and biodiversity of rhizosphere microorganisms, and heavy metal concentration in selected plant species, *Plant and Soil*, 2019, Vol. 436(1–2), pp. 49–6, DOI: 10.1007/s11104-018-3871-7.
41. *IUSS Working Group WRB*. 2014, World Reference Base for Soil Resources 2014, International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps, World Soil Resources Reports, No. 106, FAO, Rome.
42. Ji X., Abakumov E., Antcibor I., Tomashunas V., Knoblauch C., Zubzycki S., Pfeiffer E.M., Influence of anthropogenic activities on metals in arctic permafrost: a characterization of benchmark soils on the Yamal and Gydan peninsulas in Russia, *Archives of Environmental Contamination and*

Toxicology, 2019a, Vol. 76(4), pp. 540–553, DOI: 10.1007/s00244-019-00607-y.
43. Ji X., Abakumov E., Polyakov V., Assessments of pollution status and human health risk of heavy metals in permafrost-affected soils and lichens: A case-study in Yamal Peninsula, Russia Arctic, *Human and Ecological Risk Assessment*, 2019b, Vol. 25 (8), pp. 2142–2159, DOI: 10.1080/10807039.2018.1490887.
44. Krajcarova L., Novotny K., Chattova B., Elser J., Elemental analysis of soils and Salix polaris in the town of Pyramiden and its surroundings (Svalbard), *Environmental Science and Pollution Research*, 2016, Vol. 23, pp. 10124–10137, DOI: 10.1007/s11356-016-6213-4.
45. Kabata-Pendias A., *Trace elements in soils and plants*, CRC Press, 2011, 534 p.
46. Lozano R., Bernal J.P., Characterization of a new set of eight geochemical reference materials for XRF major and trace element analysis, *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 2005, Vol. 22 (3), pp. 329–344.
47. Moskovchenko D.V., Kurchatova A.N., Fefilov N.N., Yurtaev A.A., Concentrations of trace elements and iron in the Arctic soils of Belyi Island (the Kara Sea, Russia): patterns of variation across landscapes, *Environmental Monitoring and Assessment*, 2017, Vol. 189:210, DOI: 10.1007/s10661-017-5928-0.
48. Nesbitt H.W., Young G.M., Early Proterozoic climate and plate motions inferred from major element chemistry of lutites, *Nature*, 1982, Vol. 299, pp. 715–717, DOI: 10.1038/299715a0.
49. Raudina T.V., Loiko S.V., Lim A., Manasypov R.M., Shirokova L.S., Istigechev G.I., Kuzmina D.M., Kulizhsky S.P., Vorobyev S.N., Pokrovsky O.S., Permafrost thaw and climate warming may decrease the CO_2, carbon, and metal concentration in peat soil waters of the Western Siberia Lowland, *Science of the Total Environment*, 2018, Vol. 634 (1), pp. 1004–1023, DOI: 10.1016/j.scitotenv.2018.04.059.
50. Rogan, G., Tighe, M., Grave, P. et al., Optimization of portable X-ray fluorescence spectrometry for the assessment of soil total copper concentrations: application at an ancient smelting site, *J. Soils Sediments*, 2019, Vol. 19 (2), pp. 830–839, DOI: 10.1007/s11368-018-2091-3.
51. Wojtuń B. Samecka-Cymerman A., Kolon K., Kempers A. J., Skrzypek G., Metals in some dominant vascular plants, mosses, lichens, algae, and the biological soil crust in various types of terrestrial tundra, SW Spitsbergen, Norway, *Polar Biology*, 2013, Vol. 36 (12), pp. 1799–1809, DOI: 10.1007/s00300-013-1399-0.

УДК 631.4

DOI: 10.19047/0136-1694-2020-103-85-107

Ссылки для цитирования:
Фарходов Ю.Р., Ярославцева Н.В., Яшин М.А., Хохлов С.Ф., Ильин Б.С., Лазарев В.И., Холодов В.А. Выход денсиметрических фракций из типичных черноземов разного землепользования // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2020. Вып. 103. С. 85-107. DOI: 10.19047/0136-1694-2020-103-85-107

Cite this article as:
Farkhodov Yu.R., Yaroslavtseva N.V., Yashin M.A., Khokhlov S.F., Iliyn B.S., Lazarev V.I., Kholodov V.A., The yield values of densimetric fractions from typical chernozems of different land use types, Dokuchaev Soil Bulletin, 2020, V. 103, pp. 85-107, DOI: 10.19047/0136-1694-2020-103-85-107

Благодарность:
Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, проект № 18-316-00101 мол_а (анализ образцов), проект № 19-016-00078 (отбор образцов), а также с использованием оборудования Центра коллективного пользования научным оборудованием “Функции и свойства почв и почвенного покрова” Почвенного института им. В. В. Докучаева.

Acknowledgments:
The studies were carried out with the financial support of the Russian Foundation for Basic Research (RFBR), project No. 18-316-00101 mol_a (samples analysis), project No. 19-016-00078 (samples collection), and with the use of the instrumentation of the Centre for Collective Use of Scientific Equipment “Functions and Properties of Soils and Soil Cover” (V.V. Dokuchaev Soil Science Institute).

Выход денсиметрических фракций из типичных черноземов разного землепользования

© 2020 г. Ю. Р. Фарходов[1*] Н. В. Ярославцева[1], М. А. Яшин[1], С. Ф. Хохлов[1], Б. С. Ильин[2], В. И. Лазарев[2], В. А. Холодов[1]

[1]ФИЦ “Почвенный институт им. В.В. Докучаева”, Россия, 119017, Москва, Пыжевский пер, 7, стр. 2,
[*]e-mail: yulian.farkhodov@yandex.ru.

[2]Курский федеральный научный центр, Россия, 305526, Курская область, Курский район, п. Черемушки, 10.

Поступила в редакцию 14.05.2020, *после доработки* 03.08.2020,
принята к публикации 10.09.2020

Резюме: Одним из наиболее обоснованных и востребованных подходов к выделению пулов органического вещества (ОВ) почвы является фракционирование с использованием тяжелых жидкостей. Проблема такого подхода состоит в достаточно больших потерях на стадии отмывки минеральной фракций от тяжелой жидкости, для преодоления этого затруднения предложено использовать вместо дистиллированной воды слабый раствор соляной кислоты. Выявлено, что такой подход позволит снизить потери почвенных частиц с 15 до 5% и потери углерода с 7.5 до 2.5%. В работе приводится подробный протокол денсиметрического фракционирования с помощью растворов поливольфрамата натрия, адаптированный для выделения из типичных черноземов четырех денсиметрических фракций: свободного и окклюдированного ОВ с плотностью <1.6 г/см^3, окклюдированного ОВ – 1.6–2.0 г/см^3 и минеральной фракции – >2.0 г/см^3. Для проведения денсиметрического фракционирования использовали образцы типичных черноземов различного землепользования. Было показано, что процессы восстановления и деградации почв существенно сказываются на содержании легкого окклюдированного почвенного ОВ.

Ключевые слова: протокол выделения, многолетние опыты, почвенное органическое вещество, Haplic Chernozem, денсиметрическое фракционирование, поливольфрамат натрия.

The yield values of densimetric fractions from typical chernozems of different land use types

Yu. R. Farkhodov[1*], N. V. Yaroslavtseva[1], M. A. Yashin[1], S. F. Khokhlov[1], B. S. Iliyn[2], V. I. Lazarev[2], V. A. Kholodov[1]

[1]Federal Research Centre "V.V. Dokuchaev Soil Science Institute", 7 Bld. 2 Pyzhevskiy per., Moscow 119017, Russian Federation,
[*]e-mail: yulian.farkhodov@yandex.ru.

[2]Kursk Federal Agrarian Science Centre, 10 p. Cheremushki, Kursk region 305526, Russian Federation.

Received 14.05.2020, *Revised* 03.08.2020, *Accepted* 10.09.2020

Abstract: One of the most justified and applied approaches to isolating pools of soil organic matter is fractionation in heavy liquids. The main problem with this approach is rather large losses in the separation of fractions at the stage of

washing fractions from heavy liquids. The paper presents a densimetric fractionation protocol that can significantly reduce these losses. It is suggested to use 0.001 M HCl for washing. This approach, in comparison with distilled water, allows reducing losses of weight from 15 to 5% and of carbon from 7.5 to 2.5%. The paper provides a detailed protocol, used by the Laboratory of Soil Biochemistry of V.V. Dokuchaev Soil Science Institute, to isolate four densimetric fractions using sodium polytungstate solutions: free and occluded SOM with a density of <1.6 g/cm^3, occluded SOM – of 1.6–2.0 g/cm^3, and a mineral residue with a density >2.0 g/cm^3. In the work we used samples of typical chernozems of different land use types. It was shown that the processes of soil restoration and degradation significantly affect the content of light occluded soil organic matter.

Keywords: densimetric fractionation protocol, long-term experiments, soil organic matter, Haplic Chernozem, density separation, SPT, sodium polytungstate.

ВВЕДЕНИЕ

Почва – крупнейший наземный резервуар углерода на планете, она играет ключевую роль в процессе стабилизации углерода (Lal, 2004). Одним из главных механизмов этого процесса является включение углерода в состав почвенного органического вещества (ОВ) устойчивого к разложению. При этом устойчивость ОВ оценивают по среднему времени пребывания углерода в экосистеме, выделяя пулы по периоду оборота углерода – от десятков до тысяч лет (Helfrich et al., 2006; Krull et al., 2003). На данный момент одним из наиболее обоснованных подходов к выделению пулов ОВ разной степени устойчивости и трансформированности является денсиметрическое фракционирование (Six et al., 2002; von Lutzow et al., 2007).

В литературе известно большое количество схем и протоколов денсиметрического фракционирования, выделяющих множество групп различных фракций (Poeplau et al., 2018). Однако в целом денсиметрическое фракционирование ОВ позволяет выделить две фракции: легкое ОВ и ОВ, связанное с минеральной частью, при плотности разделения 1.6–1.8 г/см^3 (Cerli et al., 2012; Griepentrog, Schmidt, 2013; Травникова и др., 2010). Фракцию легкого ОВ делят на свободное и окклюдированное (внутриагрегатное). Свободное ОВ состоит из слабо связанных с минеральной

частью почвы остатков растительного опада и считается наименее устойчивым (Golchin et al., 1994b; Poeplau et al., 2018; Six et al., 1999a). Фракция окклюдированного ОВ состоит из мелкодисперсных остатков растительного опада, находящихся внутри почвенных агрегатов, которые защищают ОВ от деструкции. Характерной особенностью ОВ данной фракции является высокое отношение С к N, низкое содержание тяжелых изотопов углерода и азота, что свидетельсвует о слабой степени его разложения по сравнению с ОВ минеральных денсиметрических фракций (Wagai et al., 2009). Один из самых устойчивых пулов ОВ (со временем оборота более ста лет) – ОВ органоминеральных комплексов (von Luetzow et al., 2006). Денсиметрические фракции ОВ органоминеральных комплексов также можно разделить по степени трансформированности с граничной плотностью 2 г/см^3 (John et al., 2005; Sollins et al., 2006). Фракция окклюдированного органического вещества с плотностью 1.6(1.8)–2.0 г/см^3 представлена комплексами ОВ средней степени разложенности с тонкодисперсными алюмосиликатами, преимущественно группы смектита (Sollins et al., 2006). Фракция с плотностью >2.0 г/см^3, ее называют фракцией минерального остатка или минеральной фракцией, может быть представлена комплексами сильно трансформированного (гумифицированного) ОВ с первичными и вторичными минералами различной степени дисперсности (Sollins et al., 2006).

В качестве тяжелой жидкости (ТЖ) в денсиметрическом фракционировании применяют различные реагенты, такие как бромоформ-этанольная смесь, йодистый метилен, тетрабромэтилен, натрий йодистый, жидкость Клеричи и др. В настоящее время в почвоведении в качестве ТЖ наиболее широко применяется водный раствор поливольфрамата натрия. Этот реактив обладает рядом преимуществ: он не токсичен, имеет низкую вязкость, хорошо растворяется в воде, регенерируется (Six et al., 1999b). Главными недостатками применения раствора поливольфрамата натрия при денсиметрическом фракционировании ОВ являются возможность загрязнения анализируемого образца соединениями азота в случае недостаточно чистого реактива, а также существенные потери углерода, которые могут достигать 20% от углерода почвы, содержащегося в анализируемом образце в первоначаль-

ном непромытом состоянии (Kramer et al., 2009; Plaza et al., 2019). С первым недостатком справляются путем контроля чистоты раствора. Второй недостаток связан с пептизирующим воздействием натрия на почвенные коллоиды, которое особенно сильно проявляется при отмывке препарата денсиметрической фракции от тяжелой жидкости. Следует отметить, что некоторые исследователи в меньшей степени сталкивались с подобной проблемой, вероятно, из-за легкого гранулометрического состава исследуемых образцов почв (Gruenewald et al., 2006; John et al., 2005). Потери пытались снизить за счет осаждения коллоидов, используя высокоскоростное центрифугирование (Cerli et al., 2012), а также центрифугирование с предварительной коагуляцией в присутствии катионов кальция и натрия (Golchin et al., 1994a; Viret, Grand, 2019). Отметим, что центрифугирование без предварительной коагуляции для уменьшения потерь углерода при денсиметрическом фракционировании может значительно замедлить процесс фракционирования, а также требует применения высокоскоростных центрифуг больших объемов, доступ к которым часто бывает ограничен. Применение солей для коагуляции почвенных коллоидов требует дополнительной промывки. Более того, применение солей кальция может внести ошибку в результаты фракционирования из-за образования труднорастворимых соединений поливольфрамата кальция (Torresan, 1987).

Цель работы состояла в достижении минимальных потерь ОВ в ходе денсиметрического фракционирования и в оценке распределения денсиметрических фракций в типичных черноземах при различных видах землепользования. Для достижения цели в ходе отмывки препаратов фракции минерального остатка снижали pH до 3–4 соляной кислотой, что способствовало коагуляции тонких коллоидных частиц и уменьшению их потерь. В работе использовали черноземы многолетних полевых опытов. Черноземы были выбраны как тип почв, в котором денсиметрическое фракционирование максимально осложнено тяжелым гранулометрическим составом и высоким содержанием ОВ (Eckmeier et al., 2007).

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Образцы типичных черноземов – Haplic Chernozems (Loamic, Aric, Pachic) (WRB, 2015) были отобраны на полевом стационаре ФГБНУ "Курский ФАНЦ" (п. Черемушки, Курского района Курской области). Варианты опыта следующие: бессменный чистый пар с 1964 г. (далее обозначен как "пар"); залежь с 1998 г. после бессменного чистого пара с 1964 г. "залежь"); бессменная кукуруза с 1964 г. ("кукуруза"); пятипольный зернопаропропашной севооборот по схеме: чистый пар, озимая пшеница, сахарная свекла, кукуруза, ячмень с 1964 г. ("севооборот"); лесополоса ("лесополоса"), которая заложена на старопахотном участке около 70 лет назад. В качестве ненарушенного варианта типичного чернозема служил участок ежегодно косимой степи ("степь") Центрально-Черноземного биосферного заповедника им. В.В. Алехина. Подробное описание объектов исследования представлено в публикации В.А. Холодова (Холодов и др., 2019). Отбор образцов проводили на площадках опробования радиусом 5 м методом конверта, глубина отбора – 0–15 см. Образцы высушивали в течение двух недель на воздухе, затем хранили в темноте при комнатной температуре. Из образцов почв на ситах методом сухого просеивания Саввинова (Шеин и др., 2007) была выделена фракция сухих агрегатов размером 2–1 мм, и далее работали только с этой фракцией. Выбор этой фракции обусловлен тем, что она доминирует среди остальных фракций, в ней содержится основной запас углерода (Холодов и др., 2019; Когут и др., 2012).

Использованная схема densиметрического фракционирования почвы представлена на рисунке 1. На основе известных протоколов densиметрического фракционирования (Cerli et al., 2012; John et al., 2005) лабораторией биологии и биохимии почв Почвенного института им. В.В. Докучаева был разработан протокол, приведенный ниже. В ходе фракционирования последовательно выделяли 4 densиметрических фракции: свободное почвенное ОВ с плотностью <1.6 г/см^3 (fPOM <1.6 г/см^3), окклюдированное (внутриагрегатное) почвенное ОВ с плотностью <1.6 г/см^3 (oPOM <1.6 г/см^3), окклюдированное (внутриагрегатное) почвенное органическое вещество с плотностью 1.6–2.0 г/см^3 (oPOM 1.6–

2.0 г/см^3), фракция минерального остатка с плотностью >2.0 г/см^3 (Mineral >2.0 г/см^3).

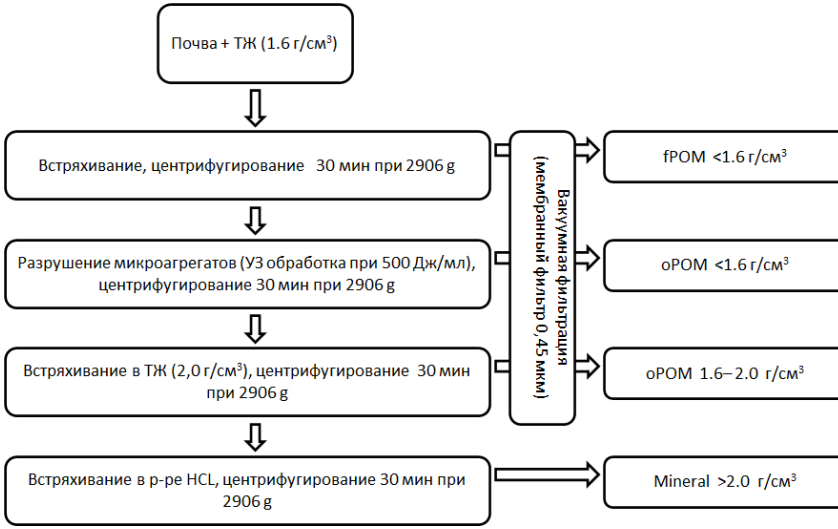

Рис. 1. Схема densиметрического фракционирования почвы.
Fig .1. Scheme of soil density fractionation.

В качестве ТЖ при densиметрическом фракционировании применяли раствор поливольфромата натрия ($Na_6O_{39}W_{12} \times H_2O$) производства компании Sigma Aldrich, Германия. Для отделения выделенных флотацией фракций использовали вакуумную фильтрацию через фильтр 0.45 мкм (материал – нитроцеллюлоза, производитель Merck Millipore, США). Полноту отмывки целевой фракции от ТЖ контролировали с помощью кондуктометра Milwaukee EC59. Для выделения окклюдированных фракций был использован ультразвуковой (УЗ) гомогенизатор марки УЗГ13-0.1/22 компании “Ультразвуковые технологии и оборудование” (Россия), энергия обработки суспензии 500 Дж/мл. Калибровку гомогенизатора проводили по воде с помощью температурных датчиков (Mentler et al., 2017). Данный метод и энергия диспергации позволяют разрушить почвенные микроагрегаты до уровня элементарных почвенных частиц (Gregorich et al., 1988; Харитоно-

ва и др., 2017). В результате высвобождается окклюдированное ОВ, которое находится внутри микроагрегатов. Относительное ускорение и время центрифугирования подбирали таким образом, чтобы осаждались частицы размером больше 0.45 мкм (Шаймухаметов и др., 1972). Для предотвращения потерь углерода во фракции минерального остатка, в процессе избавления от соли тяжелой жидкости, вместо дистиллированной воды использовали слабый раствор соляной кислоты, которым осаждали почвенные коллоиды при pH = 3. Чтобы сравнить потери при денсиметрическом фракционировании для различных вариантов черноземов: “степь”, “пар”, “кукуруза”, “севооборот”, – отдельно проводили фракционирование с использованием дистиллированной воды и раствора соляной кислоты.

При реализации схемы денсиметрического фракционирования возникли затруднения, связанные с нюансами выделения, не прописанными в приводимых методиках. Поэтому считаем весьма полезным подробно привести полный протокол денсиметрического фракционирования, принятый в нашей лаборатории.

Протокол денсиметрического фракционирования лаборатории биологии и биохимии почв Почвенного института им. В.В. Докучаева.

Приготовление растворов ТЖ с плотностью 1.6 г/см^3 и 2.0 г/см^3 (с точностью 0.01 г/см^3) проводят согласно Six et al. (Six et al., 1999b). Сначала готовят маточный раствор ТЖ с плотностью 2.0 г/см^3, далее часть ТЖ разбавляют до плотности 1.6 г/см^3. Для приготовления 1 литра ТЖ с плотностью 2.0 г/см^3 к 1 250 г соли полифольфрамата натрия приливают 750 мл дистиллированной воды, тщательно перемешивают. Плотность полученного раствора определяют ареометром или пикнометром и при необходимости добавляют соль или разбавляют дистиллированной водой для доведения плотности ТЖ до необходимого значения.

Объем воды, который потребуется для разбавления маточного раствора ТЖ, чтобы затем приготовить раствор ТЖ с плотностью 1.6 г/см^3 рассчитывают по формуле:

$$Vвода = \frac{(d_{SPT} - d_{треб}) * V_{SPT}}{d_{треб} - d_{вода}}$$

Где d_{SPT} – плотность маточного раствора ТЖ, V_{SPT} – объем маточного раствора ТЖ, $d_{треб}$ – требуемая плотность ТЖ, $d_{вода}$ – плотность воды при температуре окружающей среды. Для предотвращения взаимодействия полифольфрамата натрия с кальцием, который может присутствовать в составе стеклянной посуды, приготовленные растворы хранят в пластиковых емкостях.

Выделение fPOM <1.6 г/см^3. Перед фракционированием из образца почвы отбирают видимые глазом растительные остатки, далее образец почвы растирают пестиком с резиновым наконечником и пропускают через сито с размером ячейки 1 мм. Для выделения fPOM <1.6 г/см^3 в центрифужную полипропиленовую пробирку с закручивающейся крышкой объемом 50 мл вносят 5 г почвы, взятых на аналитических весах, добавляют 25 мл ТЖ с плотностью <1.6 г/см^3, закрывают крышкой, интенсивно встряхивают 5 раз и оставляют на 30 минут в покое. Далее надосадочный раствор переливают в отдельную центрифужную пробирку и центрифугируют 30 минут при 2 906 g. После центрифугирования при помощи пипетки Пастера всплывший материал порционно собирают и переносят в другую пробирку для сбора целевой фракции (fPOM <1.6 г/см^3), а осадок возвращают в центрифужную пробирку с основным осадком. Операцию повторяют несколько раз до того момента, когда перестает всплывать флотируемый материал. Пробирку с осадком оставляют для выделения oPOM <1.6 г/см^3. Суспензию с выделенной фракцией фильтруют. Осадок на фильтре промывают дистиллированной водой до полного избавления от остатков ТЖ. Полноту отмытия контролируют с помощью кондуктометра. Для этого в процессе отмывки препарата от ТЖ измеряют электропроводность фильтрата. Процесс отмывки продолжают до достижения значений электропроводности дистиллированной воды. Осадок высушивают на водяной бане при 60 С° и взвешивают на аналитических весах. Фильтрат собирают в емкость для восстановления ТЖ.

Выделение oPOM <1.6 г/см^3. В пробирку с осадком, остав-

шимся после выделения fPOM <1.6 г/см^3, приливают 25 мл ТЖ с плотностью 1.6 г/см^3, помещают в воду со льдом и озвучивают с помощью зондового УЗ генератора с передачей энергии суспензии 500 Дж/мл. Для достижения заданной энергии диспергации и предотвращения перегревания раствора УЗ обработку следует проводить в два подхода с равным временем озвучивания, не давая суспензии нагреться. После обработки пробирку с суспензией центрифугируют в течение 30 минут при 2 906 g. Затем всплывший материал переносят с помощью пипетки Пастера в пробирку для сбора фракции oPOM <1.6 г/см^3. Осадок на дне центрифужной пробирки ресуспендируют интенсивным встряхиванием или кратковременным озвучиванием (5–10 сек.) и вновь центрифугируют. Флотируемый материал собирают с помощью пипетки Пастера. Ресуспендирование и центрифугирование проводят до полного отсутствия выхода флотируемого материала. Суспензию с полученной фракцией oPOM <1.6 г/см^3 фильтруют. Осадок на фильтре промывают дистиллированной водой до полного избавления от соли ТЖ, полноту отмывания контролируют с помощью кондуктометра, как описано выше. Далее осадок высушивают при 60 С$^\circ$, взвешивают. Фильтрат собирают в емкость для восстановления ТЖ.

Выделение oPOM 1.6–2.0 г/см^3. В пробирку с осадком, оставшимся от выделения oPOM <1.6 г/см^3, приливают 25 мл ТЖ с плотностью 2.0 г/см^3. ТЖ перемешивают с осадком почвы интенсивным встряхиванием или кратковременной (5–10 сек.) обработкой ультразвуком, затем центрифугируют в течение 30 минут при 2 906 g. После центрифугирования всплывший материал переносят пипеткой Пастера в пробирку для сбора целевой фракции (oPOM 1.6–2.0 г/см^3). Осадок на дне центрифужной пробирки ресуспендируют интенсивным встряхиванием или кратковременным озвучиванием (5–10 сек.). Суспензию центрифугируют 30 мин. при 2 906 g. Флотируемый материал собирают с помощью пипетки Пастера. Цикл ресуспендирования-центрифугирования продолжают до прекращения выделения фракции. Даллее суспензию с целевой фракцией (oPOM 1.6–2.0 г/см^3) фильтруют. Осадок на фильтре промывают дистиллированной водой, высушивают и взвешивают. Фильтрат собирают в емкость для восстановления.

На дне основной пробирки остается осадок, представленный минеральной фракцией (Mineral >2.0 г/см^3).

Фракцию Mineral >2.0 г/см^3 промывают раствором соляной кислоты. Для этого к осадку добавляют небольшое количество дистиллированной воды, несколько капель 0.1 М HCl до pH = 3.0, озвучивают несколько секунд и центрифугируют 30 мин. при 2 906 g. По окончании центрифугирования проверяют надосадочную жидкость на наличие соли ТЖ с помощью кондуктометра. Отработанный раствор переносят в емкость для восстановления ТЖ. Процесс отмывки продолжают до прекращения изменения значений электропроводности. Фракцию высушивают при 60 С$^\circ$ и взвешивают.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Потери массы почвы и углерода при отмывке.

На рисунке 2 представлено сравнение потерь массы почвы и углерода при отмывке денсиметрической фракции минерального остатка (Mineral >2.0 г/см^3) дистиллированной водой и раствором соляной кислоты. Потери массы почвы и углерода в процессе денсиметрического фракционирования в случае применения раствора соляной кислоты, по сравнению с водой, значимо (t-тест при α = 0.05) снизились в три раза: с 15 до 5% в среднем от массы почвы или с 7.5 до 2.5% от содержания углерода в навеске почвы. Понижение pH суспензии при помощи раствора соляной кислоты в процессе отмывки фракции Mineral >2.0 г/см^3 от соли ТЖ хорошо вписывается в общие условия денсиметрического фракционирования, т. к. pH поливольфрамата натрия в зависимости от плотности варьирует от 2 до 3 (www.sometu.de). Снижение pH приводит к коагуляции почвенных коллоидов, которое связано с понижением отрицательного заряда на поверхности коллоидных частиц, а также со слабой степенью гидратации ионов водорода (Соколова, Трофимов, 2009). Следует отметить, что раствор соляной кислоты применяется уже долгие годы для извлечения илистых частиц из почвы (Айдинян, 1960).

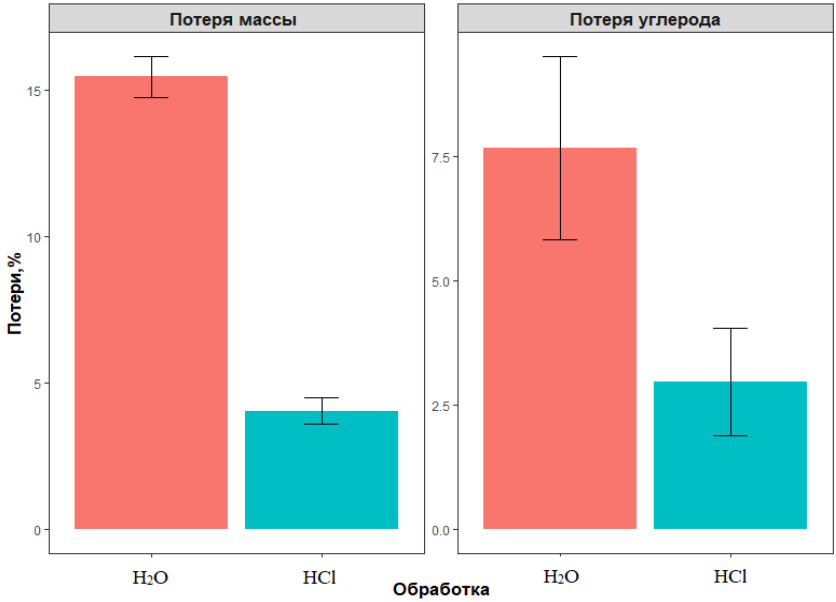

Рис. 2. Потери при денсиметрическом фракционировании (n = 4, среднее ± стандартная ошибка среднего) в агрегатах 2–1 мм типичных черноземов различного землепользования.
Fig. 2. Losses during density fractionation (n = 4, mean ± standard error) in aggregates of 2–1 mm size of typical chernozems under different land management conditions.

Выход денсиметрических фракций из типичных черноземов разного вида использования

Разработанный протокол денсиметрического фракционирования был использован для оценки содержания денсиметрических фракций в типичных черноземах многолетних полевых опытов разного землепользования. На рисунке 3 представлено массовое процентное содержание денсиметрических фракций в агрегатах 2–1 мм типичных черноземов разного землепользования.

Фракция fPOM <1.6 г/см^3 представлена растительными остатками низкой степени разложения (рис. 4).

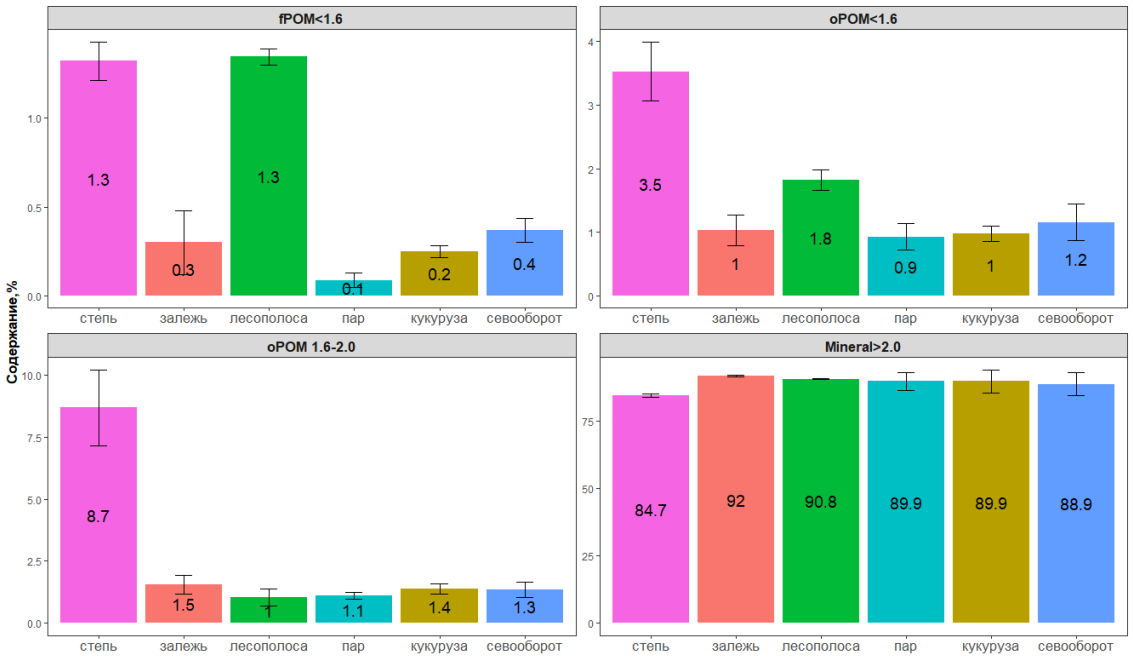

Рис. 3. Массовая доля денсиметрических фракций типичных черноземов (n = 3, среднее ± стандартная ошибка среднего).
Fig. 3. Mass fraction of densimetric fractions of typical chernozems (n = 3, mean ± standard error of the mean).

Содержание данной фракции максимально в вариантах “степь” и “лесополоса”, в остальных вариантах содержание фракций свободного легкого ОВ незначительно. В первую очередь это связано с тем, что в вариантах “степь” и “лесополоса” в почву обильно поступают растительные остатки. В варианте “пар”, где отсутствует поступление опада, содержание фракции свободного органического вещества минимально.

Высокое содержание фракции oPOM <1.6 г/см^3 также характерно для ненарушенных вариантов “степь” и “лесополоса”. Это связано с тем, что в этих вариантах отсутствует обработка почвы и, соответственно, процессы разрушения почвенных агрегатов и минерализации легкого окклюдированного вещества менее выражены по сравнению с остальными вариантами, где проводилась обработка почвы. Важно отметить, что в массу фракции fPOM <1.6 г/см^3, в отличие от oPOM <1.6 г/см^3, могут вносить свой вклад минеральные компоненты почвы, которые слабо сорбированы на ее поверхности, и при обработке ультразвуком сорбционные связи разрушаются, поэтому во фракции oPOM <1.6 г/см^3 содержание компонентов минеральной матрицы минимально (Wagai et al., 2009). Это хорошо видно на рисунке 4, во фракции fPOM <1.6 г/см^3 заметны белые минеральные зерна, которые отсутствуют в oPOM <1.6 г/см^3. Варианты “залежь”, “степь” и “лесополоса” характеризуются обильным поступлением растительных остатков. Однако по содержанию фракций свободного и окклюдированного ОВ “залежь” практически не отличается от “пара” и других вариантов с обработкой, что, вероятно, связано с особенностями восстановления запасов органического вещества и структуры почвы после длительной деградации в условиях чистого пара. Так ранее было показано, что для варианта “залежь” распределение сухих почвенных агрегатов ближе к пахотным вариантам, чем к варианту “степь” (Холодов и др., 2016), а содержание фракции лабильных гуминовых веществ и водоэкстрагируемого органического вещества не отличается от вариантов с обработкой (Холодов и др., 2020). Таким образом, накопление углерода в этом варианте, по-видимому, идет во фракциях oPOM 1.6–2.0 г/см^3 и Mineral >2.0 г/см^3.

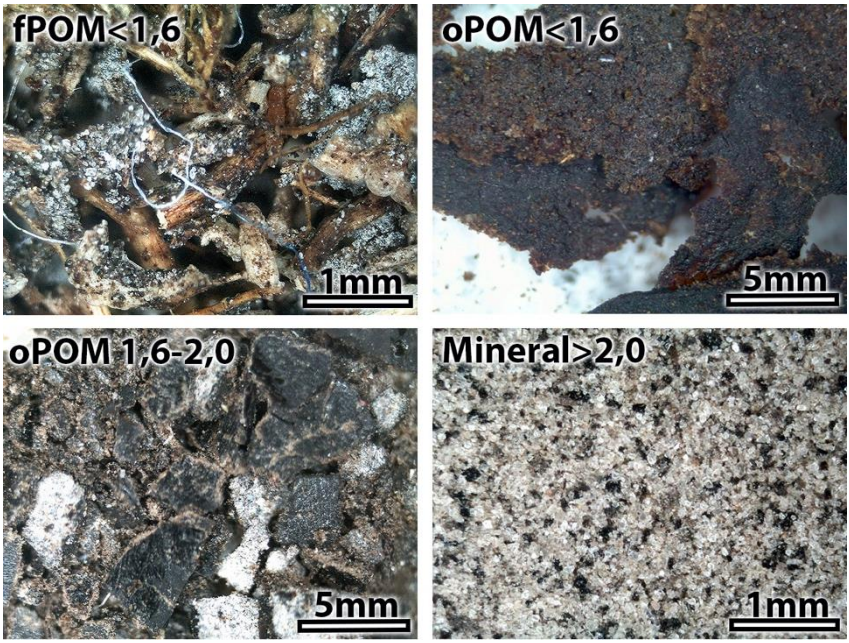

Рис. 4. Денсиметрические фракции под микроскопом (типичный чернозем варианта “степь”).
Fig. 4. Densimetric fractions under the microscope (Haplic Chernozem, “steppe”).

Фракция oPOM 1.6–2.0 г/см^3 и фракция минерального остатка содержат ОВ, которое тесно связанно с минеральной матрицей почвы. При этом фракция oPOM 1.6–2.0 г/см^3 преимущественно представлена тонкодисперсным материалом минеральной матрицы, а фракция Mineral >2.0 г/см^3 сложена как из крупного, так и из мелкого материала минеральной матрицы (рис. 4). Содержание минеральных фракций во всех вариантах было примерно одинаковым, кроме варианта “степь”, где происходит перераспределение почвенной массы в сторону частиц с плотностью 1.6–2.0 г/см^3. Это объясняется высоким содержанием органического вещества в варианте “степь” (Когут и др., 2011), которое, связываясь с компонентами минеральной матрицы, уменьшает результирующую плотность органоминеральных комплексов. По содержанию фрак-

ции оРОМ 1.6–2.0 г/см^3 и Mineral >2.0 г/см^3 вариант “степь” резко отличается от остальных вариантов, а для вариантов “залежь” и “лесополоса” содержание данных фракций не отличается от обрабатываемых черноземов. Видимо, это связано с тем, что в постагрогенных вариантах черноземов “залежь” и “лесополоса” восстановление запасов ОВ пока не проявилось в изменении содержания минеральных денсиметрических фракций.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, в результате исследования проведена адаптация методики денсиметрического фракционирования для типичных черноземов, также было показано, что применение слабого раствора соляной кислоты на стадии выделения фракции Mineral >2.0 г/см^3 позволяет снизить потери почвенных частиц и углерода в 3 раза. По результатам денсиметрического фракционирования установлено, что изменение содержания денсиметрической фракции легкого окклюдированного ОВ связано с процессами деградации и восстановления черноземов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Айдинян Р.Х.* Краткая инструкция. Извлечение ила из почвы. М.: Гипроводхоз, 1960. 10 с.

2. *Когут Б.М., Сысуев С.А., Холодов В.А.* Водопрочность и лабильные гумусовые вещества типичного чернозема при разном землепользовании // Почвоведение. 2012. № 5. С. 555–561.

3. *Когут Б.М., Фрид А.С., Масютенко Н.П., Куваева Ю.В., Романенков В.А., Лазарев В.И., Холодов В.А.* Динамика содержания органического углерода в типичном черноземе в условиях длительного полевого опыта // Агрохимия. 2011. № 12. С. 37–44.

4. *Соколова Т.А., Трофимов С.Я.* Сорбционные свойства почв. Адсорбция. Катионный обмен. Тула: Гриф и К, 2009. 174 с.

5. *Травникова Л.С., Артемьева З.С., Сорокина Н.П.* Распределение гранулоденсиметрических фракций в дерново-подзолистых почвах, подверженных плоскостной эрозии // Почвоведение. 2010. № 4. С. 495–504.

6. *Харитонова Г.В., Шеин Е.В., Шестеркин В.П., Юдина А.В., Дембовецкий А.В., Остроухов А.В., Бердников Н.В., Якубовская А.Я.* Гранулометрический состав донных отложений р. Буреи района Нижне-

Бурейской ГЭС // Вестник Московского университета. Серия 17. Почвоведение. 2017. № 1. С. 24–34.
7. *Холодов В.А., Ярославцева Н.В., Фарходов Ю.Р., Белобров В.П., Юдин С.А., Айдиев А.Я., Лазарев В.И., Фрид А.С.* Изменение соотношения фракций агрегатов в гумусовых горизонтах черноземов в различных условиях землепользования // Почвоведение. 2019. № 2. С. 184–193. – 10.1134/S0032180X19020060.
8. *Холодов В.А., Ярославцева Н.В., Фарходов Ю.Р., Яшин М.А., Лазарев В.И., Ильин Б.С., Филиппова О.И., Воликов А.Б., Иванов А.Л.* Оптические характеристики экстрагируемых фракций органического вещества типичных черноземов в многолетних полевых опытах // Почвоведение. 2020. № 6. С. 691–702. DOI: 10.31857/S0032180X20060052.
9. *Холодов В.А., Ярославцева Н.В., Лазарев В.И., Фрид А.С.* Интерпретация данных агрегатного состава типичных черноземов разного вида использования методами кластерного анализа и главных компонент // Почвоведение. 2016. №. 9. С. 1093–1100. DOI: 10.7868/S0032180X16090070.
10. *Шаймухаметов М.Ш., Воронина К.А.* Методика фракционирования органо-глинных комплексов с помощью лабораторных центрифуг // Почвоведение. 1972. Т. 8. С. 134–138.
11. *Шеин Е.В., Карпачевский Л.О.* Теории и методы физики почв. М.: Гриф и К, 2007. 616 с.
12. *Cerli C., Celi L., Kalbitz K., Guggenberger G., Kaiser K.* Separation of light and heavy organic matter fractions in soil – Testing for proper density cut-off and dispersion level. Geoderma. 2012. Vol. 170. P. 403–416. DOI: 10.1016/j.geoderma.2011.10.009.
13. *Eckmeier E., Gerlach R., Gehrt E., Schmidt M.W.I.* Pedogenesis of Chernozems in Central Europe – A review. Geoderma. 2007. Vol. 139. No. 3–4. P. 288–299. DOI: 10.1016/j.geoderma.2007.01.009.
14. *Helfrich M., Ludwig B., Buurman P., Flessa H.* Effect of land use on the composition of soil organic matter in density and aggregate fractions as revealed by solid-state C-13 NMR spectroscopy. Geoderma. 2006. Vol. 136. No. 1–2. P. 331–341. DOI: 10.1016/j.geoderma.2006.03.048.
15. 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.
16. *Golchin A., Oades J.M., Skjemstad J.O., Clarke P.* Study of free and occluded particulate organic matter in soils by solid state ^{13}C Cp/MAS NMR spectroscopy and scanning electron microscopy. Australian Journal of Soil Research. 1994. Vol. 32. No. 2. P. 285–309. DOI: 10.1071/SR9940285.

17. *Golchin A., Oades J.M., Skjemstad J.O., Clarke P.* Soil structure and carbon cycling. Australian Journal of Soil Research. 1994. Vol. 32. No. 5. P. 1043–1068. DOI: 10.1071/SR9941043.
18. *Gregorich E.G., Kachanoski R.G., Voroney R.P.* Ultrasonic dispersion of aggregates: distribution of organic matter in size fractions. Canadian Journal of Soil Science. 1988. Vol. 68. No. 2. P. 395–403. DOI: 10.4141/cjss88-036.
19. *Griepentrog M., Schmidt M.W.I.* Discrepancies in utilization of density fractionation along with ultrasonic dispersion to obtain distinct pools of soil organic matter. Journal of Plant Nutrition and Soil Science. 2013. Vol. 176. No. 4. P. 500–504. DOI: 10.1002/jpln.201200469.
20. *Gruenewald G., Kaiser K., Jahn R., Guggenberger G.* Organic matter stabilization in young calcareous soils as revealed by density fractionation and analysis of lignin-derived constituents. Organic Geochemistry. 2006. Vol. 37. No. 11. P. 1573–1589. DOI: 10.1016/j.orggeochem.2006.05.002.
21. *John B., Yamashita T., Ludwig B., Flessa H.* Storage of organic carbon in aggregate and density fractions of silty soils under different types of land use. Geoderma. 2005. Vol. 128. No. 1–2. P. 63–79. DOI: 10.1016/j.geoderma.2004.12.013.
22. *Kramer M. G., Lajtha K., Thomas G., Sollins P.* Contamination effects on soil density fractions from high N or C content sodium polytungstate. Biogeochemistry. 2009. Vol. 92. No. 1–2. P. 177–181. DOI: 10.1007/s10533-008-9268-6.
23. *Krull E.S., Baldock J.A., Skjemstad J.O.* Importance of mechanisms and processes of the stabilisation of soil organic matter for modelling carbon turnover. Functional Plant Biology. 2003. Vol. 30. No. 2. P. 207–222. DOI: 10.1071/FP02085.
24. *Lal R.* Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security. Science. 2004. Vol. 304. No. 5677. P. 1623–1627. DOI: 10.1126/science.1097396.
25. *Mentler A., Schomakers J., Kloss S., Zechmeister-Boltenstern S., Schuller R., Mayer H.* Calibration of ultrasonic power output in water, ethanol and sodium polytungstate. International Agrophysics. 2017. Vol. 31. No. 4. P. 583–588. DOI: 10.1515/intag-2016-0083.
26. *Plaza C., Giannetta B., Benavente I., Vischetti C., Zaccone C.* Density-based fractionation of soil organic matter: effects of heavy liquid and heavy fraction washing. Scientific Reports. 2019. Vol. 9. 10146. DOI: 10.1038/s41598-019-46577-y.
27. *Poeplau C., Don A., Six J., Kaiser M., Benbi D., Chenu C., Cotrufo M. F., Derrien D., Gioacchini P., Grand S., Gregorich E., Griepentrog M., Gunina A., Haddix M., Kuzyakov Y., Kuhnel A., Macdonald L. M., Soong J., Trigalet S., Vermeire M. L., Rovira P., van Wesemael B., Wiesmeier M., Yeasmin S.,*

Yevdokimov I., Nieder R. Isolating organic carbon fractions with varying turnover rates in temperate agricultural soils – A comprehensive method comparison. Soil Biology and Biochemistry. 2018. Vol. 125. P. 10–26. DOI: 10.1016/j.soilbio.2018.06.025.

28. *Six J., Conant R.T., Paul E.A., Paustian K.* Stabilization mechanisms of soil organic matter: Implications for C-saturation of soils. Plant and Soil. 2002. Vol. 241. No. 2. P. 155–176. DOI: 10.1023/A:1016125726789.

29. *Six J., Elliott E.T., Paustian K.* Aggregate and soil organic matter dynamics under conventional and no-tillage systems. Soil Science Society of America Journal. 1999. Vol. 63. No. 5. P. 1350–1358. DOI: 10.2136/sssaj1999.6351350x.

30. *Six J., Schultz P.A., Jastrow J.D., Merckx R.* Recycling of sodium polytungstate used in soil organic matter studies. Soil Biology and Biochemistry. 1999. Vol. 31. No. 8. P. 1193–1196.

31. *Sollins P., Swanston C., Kleber M., Filley T., Kramer M., Crow S., Caldwell B.A., Lajtha K., Bowden R.* Organic C and N stabilization in a forest soil: Evidence from sequential density fractionation. Soil Biology and Biochemistry. 2006. Vol. 38. No. 11. P. 3313–3324. DOI: 10.1016/j.soilbio.2006.04.014.

32. *Torresan M.E.* The use of sodium polytungstate in heavy mineral separations. Menlo Park, California, 1987. 18 p.

33. *Viret F., Grand S.* Combined Size and Density Fractionation of Soils for Investigations of Organo-Mineral Interactions. Jove-Journal of Visualized Experiments. 2019. No. 144. URL: https://www.jove.com/video/58927/combined-size-density-fractionation-soils-for-investigations-organo.

34. *von Lutzow M., Kogel-Knabner I., Ekschmittb K., Flessa H., Guggenberger G., Matzner E., Marschner B.* SOM fractionation methods: Relevance to functional pools and to stabilization mechanisms. Soil Biology and Biochemistry. 2007. Vol. 39. No. 9. P. 2183–2207. DOI: 10.1016/j.soilbio.2007.03.007.

35. *von Luetzow M., Koegel-Knabner I., Ekschmitt K., Matzner E., Guggenberger G., Marschner B., Flessa H.* Stabilization of organic matter in temperate soils: mechanisms and their relevance under different soil conditions – a review. European Journal of Soil Science. 2006. Vol. 57. No. 4. P. 426–445. DOI: 10.1111/j.1365-2389.2006.00809.x.

36. *Wagai R., Mayer L.M., Kitayama K.* Nature of the “occluded” low-density fraction in soil organic matter studies: A critical review. Soil Science and Plant Nutrition. 2009. Vol. 55. No. 1. P. 13–25. DOI: 10.1111/j.1747-0765.2008.00356.x.

37. The original non-toxic heavy liquid. Sodium Polytungstate. URL: www.sometu.de.

REFERENCES

1. Aydinyan R.Kh., *Kratkaya instruktsiya. Izvlecheniye ila iz pochvy* (Brief instructions. Removing silt from the soil), Moscow: Giprovodkhoz, 1960, 10 p.
2. Kogut B.M., Sysuev S.A., Kholodov V.A., Water stability and labile humic substances of typical chernozems under different land uses, *Eurasian Soil Science*, 2012, Vol. 45, No. 5, pp. 496–502. DOI: 10.1134/S1064229312050055.
3. Kogut B.M., Frid A.S., Masjutenko N.P., Kuvaeva J.V., Romanenkov V.A., Lazarev V.I., Kholodov V.A., Dynamics of Organic Carbon in Typical Chernozem under Condition of a Long-Term Experiment; Dinamika soderzhaniya organicheskogo ugleroda v tipichnom chernozeme, *Agrokhimiya*, 2011, No. 12, pp. 37–44.
4. Sokolova T.A., Trofimov S.Ya., *Sorbtsionnyye svoystva pochv. Adsorbtsiya. Kationnyy obmen* (Sorption properties of soils. Adsorption. Cation exchange), Tula: Grif i K, 2009, 174 p.
5. Travnikova L.S., Artem'eva Z.S., Sorokina N.P., Distribution of the particle-size fractions in soddy-podzolic soils subjected to sheet erosion, *Eurasian Soil Science*, 2010, Vol. 43, No. 4, pp. 459–467, DOI: 10.1134/S1064229310040137.
6. Kharitonova G.V., Shein E.V., Shesterkin V.P., Yudina A.V., Dembovetsky A.V., Ostrouhov A.V., Berdnikov N.V., Yakubovskaya A.Y. The texture of Bureya bottom sediments in the area of the Nizhne-Bureiskaya HPP, 2017, *Moscow Univ. Soil Sci. Bull.*, No. 72, pp. 21–30, DOI: 10.3103/S0147687417010033.
7. Kholodov V.A., Yaroslavtseva N.V., Farkhodov Y.R., Belobrov V.P., Yudin S.A., Aydiev A.Y., Lazarev V.I., Frid A.S., Changes in the Ratio of Aggregate Fractions in Humus Horizons of Chernozems in Response to the Type of Their Use, *Eurasian Soil Science*, 2019, Vol. 52, No. 2, pp. 162–170, DOI: 10.1134/S1064229319020066.
8. Kholodov V.A., Yaroslavceva N.V., Farkhodov Y.R., Yashin M.A., Lasarev V.I., Ilin B.S., Fillipova O.I., Volikov A.B., Ivanov A.L., Optical characteristics of extractable organic matter fractions typical chernozems of long-term field experiments, *Eurasian Soil Science*, 2020, No. 6, pp. 691–702, DOI: 10.1134/S1064229320060058.
9. Kholodov V.A., Yaroslavtseva N.V., Lazarev V.I., Frid A.S., Interpretation of data on the aggregate composition of typical chernozems

under different land use by cluster and principal component analyses, *Eurasian Soil Science*, 2016, Vol. 49, No. 9, pp. 1026–1032, DOI: 10.1134/S1064229316090076.
10. Shaimukhametov M.Sh., Voronina K.A., Method of fractionation of organo-clay complexes by means of laboratory centrifuges, *Pochvovedenie*, 1972, No. 8, pp. 134–138.
11. Shein E.V., Karpachevskii L.O., *Teorii i metody fiziki pochv* (Theories and methods of soil physics), Moscow: Grif and K, 2007, 616 p.
12. Cerli C., Celi L., Kalbitz K., Guggenberger G., Kaiser K., Separation of light and heavy organic matter fractions in soil – Testing for proper density cut-off and dispersion level, *Geoderma*, 2012, Vol. 170, pp. 403–416, DOI: 10.1016/j.geoderma.2011.10.009.
13. Eckmeier E., Gerlach R., Gehrt E., Schmidt M.W.I., Pedogenesis of Chernozems in Central Europe – A review, *Geoderma*, 2007, Vol. 139, No. 3–4, pp. 288–299, DOI: 10.1016/j.geoderma.2007.01.009.
14. Helfrich M., Ludwig B., Buurman P., Flessa H., Effect of land use on the composition of soil organic matter in density and aggregate fractions as revealed by solid-state C-13 NMR spectroscopy, *Geoderma*, 2006, Vol. 136, No. 1–2, pp. 331–341, DOI: 10.1016/j.geoderma.2006.03.048.
15. 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.
16. Golchin A., Oades J.M., Skjemstad J.O., Clarke P., Study of free and occluded particulate organic matter in soils by solid state ^{13}C Cp/MAS NMR spectroscopy and scanning electron microscopy, *Australian Journal of Soil Research*, 1994, Vol. 32, No. 2, pp. 285–309, DOI: 10.1071/SR9940285.
17. Golchin A., Oades J.M., Skjemstad J.O., Clarke P., Soil structure and carbon cycling, *Australian Journal of Soil Research*, 1994, Vol. 32, No. 5, pp. 1043–1068, DOI: 10.1071/SR9941043.
18. Gregorich E.G., Kachanoski R.G., Voroney R.P., Ultrasonic dispersion of aggregates: distribution of organic matter in size fractions, *Canadian Journal of Soil Science*, 1988, Vol. 68, No. 2, pp. 395–403, DOI: 10.4141/cjss88-036.
19. Griepentrog M., Schmidt M.W.I., Discrepancies in utilization of density fractionation along with ultrasonic dispersion to obtain distinct pools of soil organic matter, *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2013, Vol. 176, No. 4, pp. 500–504, DOI: 10.1002/jpln.201200469.
20. Gruenewald G., Kaiser K., Jahn R., Guggenberger G., Organic matter stabilization in young calcareous soils as revealed by density fractionation and analysis of lignin-derived constituents, *Organic Geochemistry*, 2006, Vol. 37, No. 11, pp. 1573–1589, DOI: 10.1016/j.orggeochem.2006.05.002.

21. John B., Yamashita T., Ludwig B., Flessa H., Storage of organic carbon in aggregate and density fractions of silty soils under different types of land use, *Geoderma*, 2005, Vol. 128, No. 1–2, pp. 63–79, DOI: 10.1016/j.geoderma.2004.12.013.
22. Kramer M. G., Lajtha K., Thomas G., Sollins P., Contamination effects on soil density fractions from high N or C content sodium polytungstate, *Biogeochemistry*, 2009, Vol. 92, No. 1–2, pp. 177–181, DOI: 10.1007/s10533-008-9268-6.
23. Krull E.S., Baldock J.A., Skjemstad J.O., Importance of mechanisms and processes of the stabilisation of soil organic matter for modelling carbon turnover, *Functional Plant Biology*, 2003, Vol. 30, No. 2, pp. 207–222, DOI: 10.1071/FP02085.
24. Lal R., Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security, *Science*, 2004, Vol. 304, No. 5677, pp. 1623–1627, DOI: 10.1126/science.1097396.
25. Mentler A., Schomakers J., Kloss S., Zechmeister-Boltenstern S., Schuller R., Mayer H., Calibration of ultrasonic power output in water, ethanol and sodium polytungstate, *International Agrophysics*, 2017, Vol. 31, No. 4, pp. 583–588, DOI: 10.1515/intag-2016-0083.
26. Plaza C., Giannetta B., Benavente I., Vischetti C., Zaccone C., Density-based fractionation of soil organic matter: effects of heavy liquid and heavy fraction washing, *Scientific Reports*, 2019, Vol. 9, 10146, DOI: 10.1038/s41598-019-46577-y.
27. Poeplau C., Don A., Six J., Kaiser M., Benbi D., Chenu C., Cotrufo M. F., Derrien D., Gioacchini P., Grand S., Gregorich E., Griepentrog M., Gunina A., Haddix M., Kuzyakov Y., Kuhnel A., Macdonald L. M., Soong J., Trigalet S., Vermeire M. L., Rovira P., van Wesemael B., Wiesmeier M., Yeasmin S., Yevdokimov I., Nieder R., Isolating organic carbon fractions with varying turnover rates in temperate agricultural soils – A comprehensive method comparison, *Soil Biology and Biochemistry*, 2018, Vol. 125, pp. 10–26, DOI: 10.1016/j.soilbio.2018.06.025.
28. Six J., Conant R.T., Paul E.A., Paustian K., Stabilization mechanisms of soil organic matter: Implications for C-saturation of soils, *Plant and Soil*, 2002, Vol. 241, No. 2, pp. 155–176, DOI: 10.1023/A:1016125726789.
29. Six J., Elliott E.T., Paustian K., Aggregate and soil organic matter dynamics under conventional and no-tillage systems, *Soil Science Society of America Journal*, 1999, Vol. 63, No. 5, pp. 1350–1358, DOI: 10.2136/sssaj1999.6351350x.
30. Six J., Schultz P.A., Jastrow J.D., Merckx R., Recycling of sodium polytungstate used in soil organic matter studies, *Soil Biology and Biochemistry*, 1999, Vol. 31, No. 8, pp. 1193–1196.

31. Sollins P., Swanston C., Kleber M., Filley T., Kramer M., Crow S., Caldwell B.A., Lajtha K., Bowden R., Organic C and N stabilization in a forest soil: Evidence from sequential density fractionation, *Soil Biology and Biochemistry*, 2006, Vol. 38, No. 11, pp. 3313–3324, DOI: 10.1016/j.soilbio.2006.04.014.
32. Torresan M.E., *The use of sodium polytungstate in heavy mineral separations*, Menlo Park, California, 1987, 18 p.
33. Viret F., Grand S., Combined Size and Density Fractionation of Soils for Investigation*s of Organo-Mineral Interactions*, Jove-Journal of Visualized Experiments, 2019, No. 144, URL: https://www.jove.com/video/58927/combined-size-density-fractionation-soils-for-investigations-organo.
34. von Lutzow M., Kogel-Knabner I., Ekschmittb K., Flessa H., Guggenberger G., Matzner E., Marschner B., SOM fractionation methods: Relevance to functional pools and to stabilization mechanisms, *Soil Biology and Biochemistry*, 2007, Vol. 39, No. 9, pp. 2183–2207, DOI: 10.1016/j.soilbio.2007.03.007.
35. von Luetzow M., Koegel-Knabner I., Ekschmitt K., Matzner E., Guggenberger G., Marschner B., Flessa H., Stabilization of organic matter in temperate soils: mechanisms and their relevance under different soil conditions – a review, *European Journal of Soil Science*, 2006, Vol. 57, No. 4, pp. 426–445, DOI: 10.1111/j.1365-2389.2006.00809.x.
36. Wagai R., Mayer L.M., Kitayama K., Nature of the “occluded” low-density fraction in soil organic matter studies: A critical review, *Soil Science and Plant Nutrition*, 2009, Vol. 55, No. 1, pp. 13–25, DOI: 10.1111/j.1747-0765.2008.00356.x.
37. The original non-toxic heavy liquid. Sodium Polytungstate. URL: www.sometu.de.

УДК 631.4

DOI: 10.19047/0136-1694-2020-103-108-148

Ссылки для цитирования:
Клюева В.В., Хайдапова Д.Д. Возможности использования реологических параметров почв в качестве физических показателей трансформации их структурного состояния // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2020. Вып. 103. С. 108-148. DOI: 10.19047/0136-1694-2020-103-108-148

Cite this article as:
Klyueva V.V., Khaydapova D.D., Possibilities of using rheological parameters as physical indicators of soil structural changes, Dokuchaev Soil Bulletin, 2020, V. 103, pp. 108-148, DOI: 10.19047/0136-1694-2020-103-108-148

Благодарность:
Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, грант № 16–04–01111 и с привлечением оборудования, приобретенного по Программе развития МГУ.

Acknowledgments:
The studies were carried out with the financial support of the Russian Foundation for Basic Research (project No. 16–04–01111) and with the use of equipment purchased under the Moscow State University Development Program.

Возможности использования реологических параметров почв в качестве физических показателей трансформации их структурного состояния

© 2020 г. В. В. Клюева[1*], Д. Д. Хайдапова[2]

[1]ФИЦ "Почвенный институт им. В.В. Докучаева", Россия, 119017, Москва, Пыжевский пер, 7, стр. 2,
[*]https://orcid.org/0000-0003-4823-444X, e-mail: vvklyueva@gmail.com.
[2]МГУ им. М.В. Ломоносова, Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, 1, стр.12.

Поступила в редакцию 23.04.2020, *после доработки* 25.04.2020, *принята к публикации* 10.09.2020

Резюме: Методом осцилляционной амплитудной развертки изучены реологические показатели естественных и пахотных дерново-подзолистых

почв и черноземов миграционно-мицеллярных. Установлено, что показатели сдвиговой устойчивости изученных почв (напряжения сдвига в конце диапазона линейной вязкоупругости LVE-range τ_L, τ_F в точке пересечения модулей накопления и потерь Crossover и максимальное значение τ_{max}) были более информативны при сравнении естественных и пахотных почв и демонстрировали выраженные отличия между генетическими горизонтами в отличие от показателей вязкоупругости (деформации γ_L, характеризующей область упругого поведения, и интегральной зоны Z). Сельскохозяйственное использование изученных почв привело к снижению содержания органического углерода и, как следствие, к уменьшению вязкоупругости и сдвиговой устойчивости почв, а повышенная плотность пахотных горизонтов и перераспределение физической глины проявились в слабой дифференциации значений реологических показателей по глубине при их максимуме в верхнем горизонте. Предложенные и изученные в данной работе реологические показатели при активном использовании в будущем могут позволить более подробно и детально изучить характер и прочность межчастичных связей, процессы, происходящие в почвах при воздействии сельскохозяйственной техники. Встраивание реологических показателей в систему физических показателей трансформации структурного состояния почв является дальнейшим направлением их изучения.

Ключевые слова: реология, вязкоупругие свойства, структура и устойчивость почвы, индикатор.

Possibilities of using rheological parameters as physical indicators of soil structural changes

V. V. Klyueva[1*], D. D. Khaydapova[2]

[1]Federal Research Centre "V.V. Dokuchaev Soil Science Institute",
7 Bld. 2 Pyzhevskiy per., Moscow 119017, Russian Federation,
[*]https://orcid.org/0000-0003-4823-444X, e-mail: vvklyueva@gmail.com.

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

Received 23.04.2020, *Revised* 25.04.2020, *Accepted* 10.09.2020

Abstract: The rheological parameters of structured soddy-podzolic soils (Albic Glossic Retisols (Lomic, Cutanic)) and chernozems (Haplic Chernozems (Loamic, Pachic)) in their natural state and involved in agricultural use were studied by the oscillation amplitude sweep test. Shear resistance parameters of

the studied soils (shear stress at the end of the linear viscoelasticity range – LVE-range τ_L, shear stress τ_F at the Crossover point and maximum shear stress τ_{max}) were more informative and indicated pronounced differences between soil genetic horizons in contrast to viscoelasticity parameters (deformation γ_L at the end of the LVE-range and the integral zone Z) when comparing natural and arable soils. The agricultural land use resulted in decreased organic carbon content and, as a consequence, reduced viscoelasticity and shear resistance of the soils. At the same time, the higher bulk density of arable horizons and the redistribution of fine soil particles (physical clay) could explain maximal values of the rheological parameters in the upper arable horizons and their slight differentiation with depth. Further development in the application of the proposed and studied rheological parameters can give insight into the nature and strength evaluation of interparticle bonds, the soil processes under the impact of agricultural machinery, and can also be integrated into the system of physical indicators of soil structural changes.

Keywords: rheology, viscoelastic properties, soil resistance, soil structural changes.

ВВЕДЕНИЕ

В современных условиях интенсивного сельского хозяйства почвенный покров испытывает серьезные нагрузки, благодаря чему многочисленные компоненты почвенных систем претерпевают значительные изменения (Bünemann et al., 2018; Food security and soil quality, 2010).

Среди таких компонентов можно выделить физические свойства почв. Физические свойства почв определяют их воздушный, водный и тепловой режимы, что проявляется в устойчивости почв к различным естественным и антропогенным воздействиям, урожайности выращиваемых сельскохозяйственных культур, жизнедеятельности населяющих ее организмов (Шеин, 2005; Lal, Shukla, 2004; Phogat et al., 2016). Многими авторами отмечается, что показатели физического состояния почв, их динамика при антропогенной нагрузке являются одними из важнейших факторов управления плодородием почв и их рациональным использованием (Бондарев и др., 2000; Сапожников, 1994; Dexter, 2004; Reynolds et al., 2009; Shukla et al., 2006). Среди таких показателей в ряде работ (Бондарев, 2003; Фрид и др., 2010; Кузнецова, Скворцова, 2013; Armenise et al., 2013; Bünemann et al., 2018;

Schoenholtz et al., 2000) исследователями выделяются следующие: гранулометрический состав, структурное состояние пахотного слоя (содержание агрегатов агрономически ценного размера 0.25–10 мм, глыбистой фракции, водопрочных агрегатов крупнее 0.25 мм, пористость агрегатов 5–7 мм), сложение почвы и соответствующие величина, ориентация и форма почвенных пор, плотность почвы (равновесная и оптимальная), а также пористость (общая, дифференциальная и аэрации), водопроницаемость, наименьшая влагоемкость, влаго- и теплообеспеченность. Многими коллективами отечественных и зарубежных авторов изучаются допустимые диапазоны изменения оптимальных параметров физических свойств почв, проводится оценка их допустимых и критических значений в зависимости от характера и степени антропогенного воздействия (Фрид и др., 2010; Horn et al., 2019; Reynolds et al., 2002; Reynolds et al., 2008; Бондарев, Кузнецова, 1999).

Большая часть оценки воздействия сельскохозяйственной техники, являющегося основным фактором изменения физических свойств почвы (помимо дегумификации) (Бондарев, Кузнецова, 1999) в российских научных работах, состоит из определения значений равновесной плотности, общей пористости, содержания водопрочных агрегатов, водопроницаемости и сопротивления пенетрации (Бондарев, 2003; Фрид и др., 2010).

Однако изменению физико-механических свойств (деформационных, прочностных и реологических), являющихся показателями устойчивости почвенной системы, зачастую уделяется не столь обширное внимание, и многие информативные показатели упускаются из виду. С долей уверенности можно сказать, что в настоящее время реологические показатели являются недооцененными параметрами при оценке естественной и антропогенной трансформации структурного состояния почв вследствие следующих причин:

1. Реологические параметры являются многофакторными переменными, поэтому влияние какого-либо отдельного фактора сложно анализировать. Реологическое поведение почв, как отражение их физико-механических свойств и структурных особенностей, зависит одновременно от большого количества физических, химических и биологических параметров, таких как мине-

ралогический и гранулометрический состав, качественное и количественное содержание катионов и анионов почвенного раствора, pH среды, содержание и состав органического вещества, экссудаты микроорганизмов и растений и т. д. (Хайдапова и др., 2016; Хитров, Хайдапова, 2019; Холопов и др., 2018; Barré, Hallett, 2009; Holthusen et al., 2017; Markgraf, Horn, 2006; Markgraf et al., 2012; Pértile et al., 2016; Pértile et al., 2018; Stoppe, Horn, 2018). Поэтому изменение того или иного параметра в результате естественных природных процессов или антропогенной нагрузки прямо или косвенно влечет за собой закономерное изменение реологического поведения почв в различных природных зонах и системах землепользования.

Решением этой проблемы, с одной стороны, могут быть модельные эксперименты по изучению влияния отдельного фактора на структуру и реологическое поведение, в которых осуществляется внешняя регуляция различных свойств почвенного образца, или, с другой стороны, комплексный математический и статистический анализ зависимостей между реологическими свойствами и изменяющимися параметрами.

2. Современные реологические методы, такие как реометрия, только начинают приобретать популярность в отечественных почвенных исследованиях. Однако по сравнению с традиционными вискозиметрами современные реометры различных моделей более универсальны и производительны, имеют широкий диапазон контролируемых и измеряемых параметров при относительно небольшом времени их определения.

Возможности практического применения полученных современными реологическими методами данных, их встраивание в общую систему показателей, в том числе индикаторов, с помощью которых производится оценка изменения структурного состояния почв, являются открытым вопросом, требующим тщательного анализа и детального изучения.

Исходя из вышесказанного, целью работы было изучение некоторых реологических показателей в почвах ненарушенного сложения с помощью метода амплитудной развертки и анализ возможности их использования в качестве физических показателей изменения структурного состояния почв в результате антропо-

генного воздействия.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Объектом нашего исследования стали образцы ненарушенного сложения генетических горизонтов нескольких типов почв:

– дерново-подзолистой тяжелосуглинистой почвы под ельником с примесью березы и агродерново-подзолистой тяжелосуглинистой почвы (Albic Glossic Retisols (Lomic, Cutanic), Пушкинский район Московской области, Зеленоградский стационар Почвенного института им. В.В. Докучаева, д. Ельдигино);

– черноземов миграционно-мицеллярных и агрочерноземов миграционно-мицеллярных тяжелосуглинистых (Haplic Chernozems (Loamic, Pachic), Курский район Курской области, Центрально-Черноземный природный биосферный заповедник им. В.А. Алехина, урочище Дубрашина и пос. Черемушки, территория Курского НИИ АПП).

Были определены следующие характеристики почв (кафедра физики и мелиорации почв факультета Почвоведения МГУ имени М.В. Ломоносова): гранулометрический состав почвы – методом лазерной дифракции (Analysette 22 (Fritsch, Германия)) с предварительной пятиминутной ультразвуковой диспергацией почвенной суспензии; влажность почвы – термогравиметрическим методом, анализатор влажности МХ-50 (Япония); содержание общего, органического и карбонатного углерода – методом сухого сжигания в потоке кислорода, экспресс-анализатор АН-7529 (“Измеритель”, Беларусь) (Шеин и др., 2017). Другие химические показатели были определены в исследовательском лабораторным центре Почвенного института им. В.В. Докучаева: определение pH водных вытяжек по ГОСТ 26423-85; содержание обменных катионов кальция и магния – по Шолленбергеру (Хитров, Понизовский, 1990); содержание железа – по методам Тамма (оксалатрастворимое) и Мера–Джексона (несиликатное) (Теория и практика химического анализа почв, 2006).

При изучении показателей структурного состояния почв был применен реометрический подход, а именно метод осцилляционной амплитудной развертки на модульном компактном реометре MCR-302 (Anton Paar, Austria) с измерительной системой

плато-плато PP-25 (кафедра физики и мелиорации почв факультета Почвоведения МГУ имени М.В. Ломоносова). В предыдущих исследованиях было показано (Клюева, 2019; Клюева, Хайдапова, 2017), что при проведении реометрических исследований почвенные пасты, подготавливаемые из насыпных образцов путем свободного капиллярного насыщения в течение суток, имеют слишком высокое содержание влаги, приводящее к нечеткой выраженности различий в значениях реологических показателей генетических горизонтов. Поэтому в настоящей работе представлены данные и проанализированы результаты, полученные для почв ненарушенного сложения.

Испытания проводили при следующих технических параметрах программного обеспечения Start Rheoplus 32 V3.60 реометра MCR-302: режим контролируемой сдвиговой деформации γ с увеличивающейся амплитудой колебаний, 30 точек измерения продолжительностью 15 сек., угловая частота измерения 0.5 Гц, постоянная температура 20 °C, которая обеспечивалась элементами Пельтье. Более подробное описание метода можно найти в предыдущих исследовательских работах (Markgraf, Horn 2006; Mezger, 2014). В качестве вводного параметра был использован контроль нормальной силы верхнего плато < 15 Н, благодаря чему был обеспечен максимально плотный контакт измерительных плато реометра с почвенными образцами при их минимальной деформации (при этом толщина образцов отличалась от 4 до 7 мм).

Большой ненарушенный почвенный образец вырезался в полевой экспедиции вручную, плотно упаковывался пленкой во избежание деформаций при транспортировке и хранился в холодильной камере лаборатории до начала испытаний. После этого образец ставили на капиллярное насыщение дистиллированной водой в течение трех суток. После этого с помощью скальпеля и одноразового лезвия с ровной поверхности большого ненарушенного образца, соприкасавшейся с фильтровальной бумагой, вырезался малый ненарушенный образец в полый цилиндр диаметром 25 мм, после чего он выдавливался поршнем на нижнее плато реометра. Измерения реологических показателей проведены в 4–7-кратной повторности. После окончания реометрического теста определяли влажность образца.

При испытаниях в режиме контролируемой деформации программное обеспечение реометра устанавливает параметры угла отклонения φ (deflection angle) и деформации сдвига γ (shear deformation, shear strain), равной отношению отклонения s к сдвиговому зазору h. Независимыми показателями первичной оценки являются крутящий момент M (torque) и угол сдвига δ (phase shift angle), расчетными показателями – напряжение сдвига τ (shear stress) (рис. 1) и комплексный модуль сдвига G* (complex shear modulus). Комплексный модуль сдвига G* представляет собой векторную сумму модуля накопления G` (упругой составляющей, storage modulus) и модуля потерь G`` (вязкой составляющей, loss modulus), фактор потерь tanδ – отношение величин модуля потерь к модулю накопления (рис. 2) (Mezger, 2014).

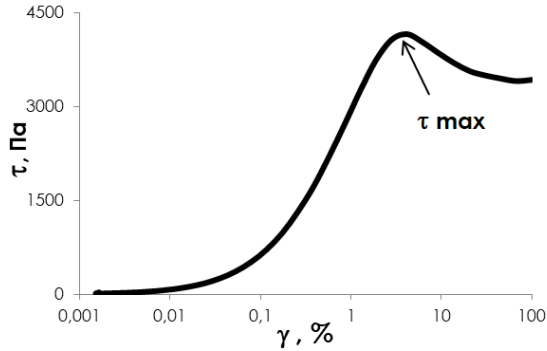

Рис. 1. Кривая напряжения сдвига, характерная для исследованных дерново-подзолистых почв и черноземов миграционно-мицеллярных ненарушенного сложения.
Fig. 1. Shear stress curve of the investigated structured soddy-podzolic soils and chernozems.

Вязкоупругие твердые тела, к которым относится почва, проявляют несколько фаз поведения своей микроструктуры (рис. 2) в осцилляционном тесте. Фаза 1 или зона накопленной упругости представляет собой диапазон параллельного хода кривых модулей накопления G` и потерь G`` без значительного изменения их

величин до точки yield point, но на разных уровнях. В данной области упругих обратимых деформаций структура образца не нарушается при увеличении нагрузки. Эта фаза также называется диапазоном линейной вязкоупругости или linear viscoelastic range (LVE-range), ее можно характеризовать следующими показателями: значением деформации γ_L, модуля накопления $G`_L$ и напряжения сдвига $\tau_L$. Переходная фаза 2 или фаза пластичных необратимых деформаций представляет собой область от начала снижения кривых модулей накопления G` и потерь G`` до достижения их пересечения в точке Crossover (flow point). Наблюдающиеся в этой зоне деформации являются необратимыми, но полного разрушения микроструктуры еще не происходит.

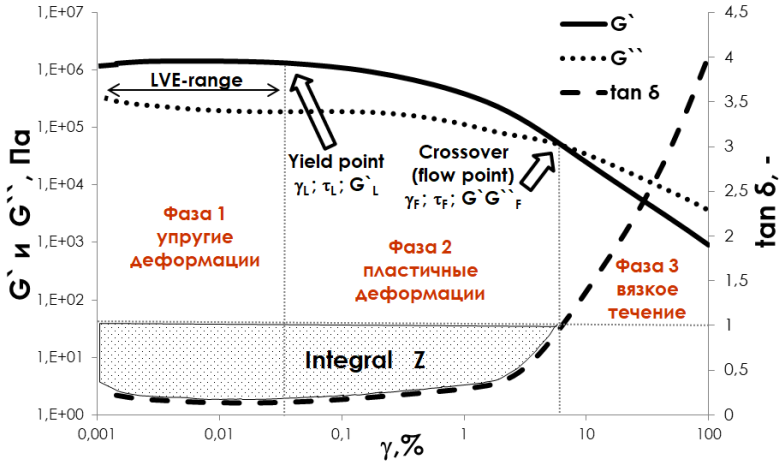

Рис. 2. Кривые модулей накопления G` и потерь G``, фактора потерь tanδ в осцилляционном амплитудном тесте: диапазон линейной вязкоупругости, фазы пластичных деформаций и вязкого течения, интегральная зона Z.

Fig. 2. Curves of storage G` and loss G`` moduli, damping factor tanδ in the oscillatory amplitude sweep test (the linear viscoelastic range, phases of plastic deformation and viscous flow, Integral Z).

Фаза 3 представляет собой область “вязкого течения” после перехода через точку Crossover, область разрушения структуры. Протяженность фаз 2 и 3 можно охарактеризовать показателями в точке Crossover: значением деформации γ_F, модулей накопления и потерь ($G`$, $G``_F$) и напряжения сдвига τ_F. Интегральная зона (Integral Z) представляет собой комплексный показатель, описывающий фазы упругих и пластичных деформаций.

Для статистического анализа полученных реологических показателей использовались программы Microsoft Excel и Statistica. Ввиду большого количества выборок значений реологических показателей в генетических горизонтах изучаемых почв и небольшого количества повторностей измерения были применены методы непараметрической статистики: расчет медианных значений и тест Краскела – Уоллиса для проверки гипотезы о равенстве медиан нескольких независимых выборок. Также проведен кластерный анализ (расчет Евклидовых расстояний по правилу объединения с минимизацией дисперсий по методу Уорда) взаимосвязей значений реологических показателей и физических и химических свойств почв.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

1. Физические и химические свойства почв

На рисунках 3 и 4 представлены физические и химические свойства изучаемых типов почв. Дерново-подзолистая и агродерново-подзолистая почва (рис. 3а, 3б) являются тяжелосуглинистыми крупнопылеватыми (текстурный класс USDA – silt) и характеризуется элювиально-иллювиальным распределением фракций физической глины (<0.01 мм) и ила (<0.001 мм), менее выраженным в агродерново-подзолистой почве, и полуторных оксидов по профилям; невысоким содержанием обменных катионов и общего углерода в гумусовом и пахотном горизонте с резким снижением его значений по глубине; кислой реакцией по профилю, при этом близкие к нейтральным значения кислотности в верхних горизонтах пахотной почвы являются следствием остаточного содержания кальция и магния, связанного с известкованием почвы в прошлом.

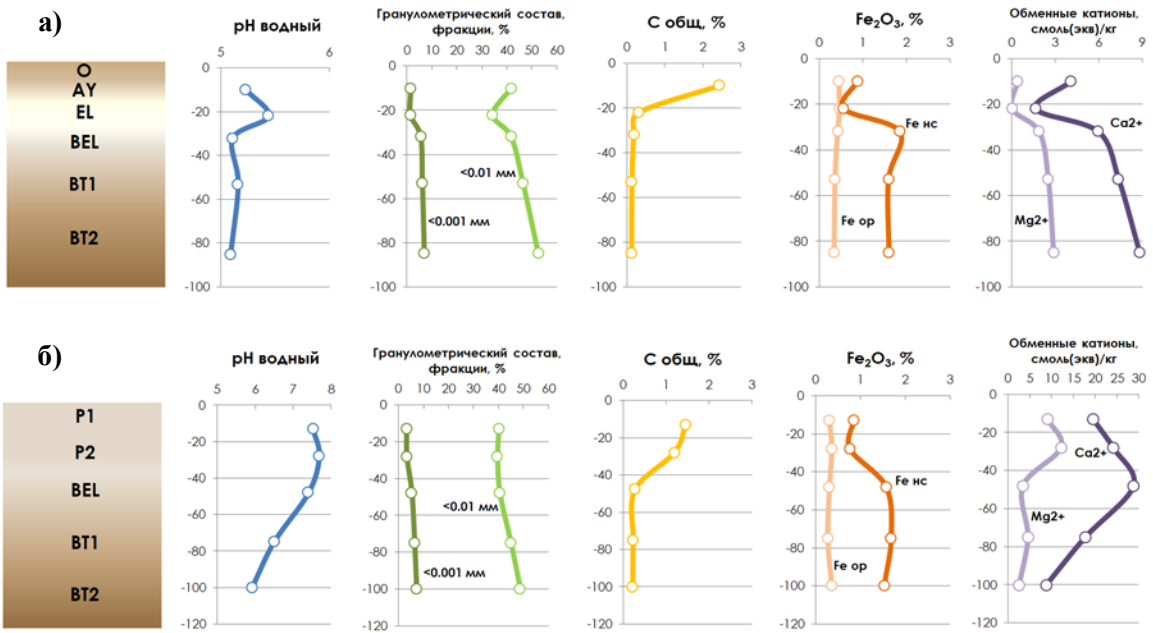

Рис. 3. Некоторые свойства **а**) дерново-подзолистой и **б**) агродерново-подзолистой почвы (Fe ор – железо оксалатрастворимое, Fe нс – несиликатное).
Fig. 3. Some properties of the **а**) soddy-podzolic and **б**) agrosoddy–podzolic soils (Fe op: Fe content according to Tamm, Fe нс: Fe content according to Mehra and Jackson).

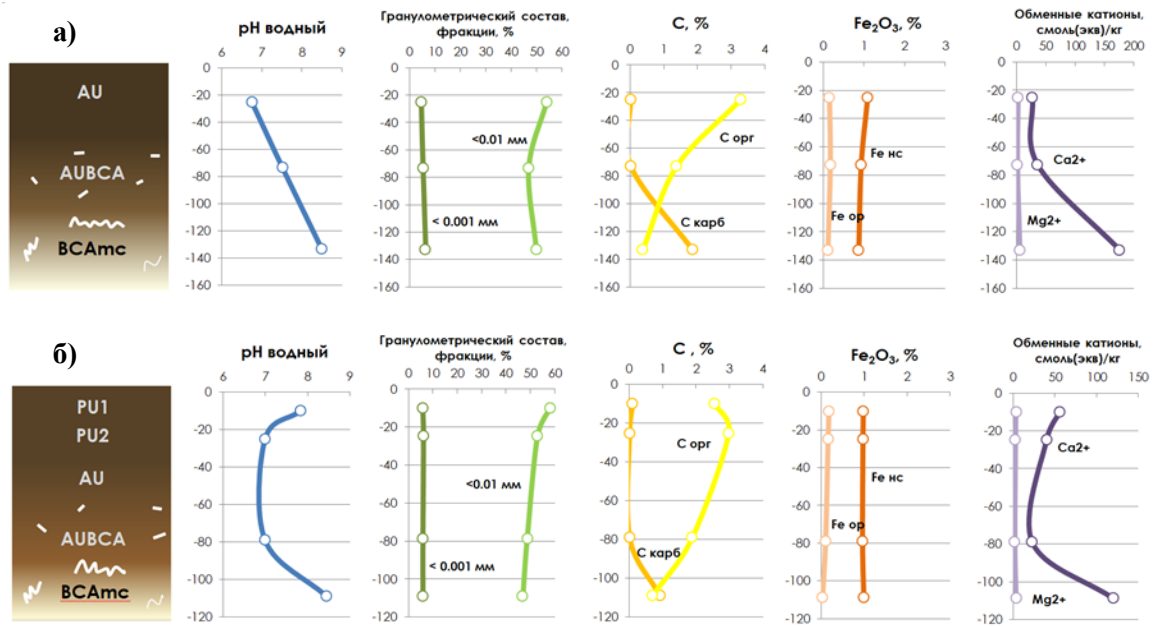

Рис. 4. Некоторые свойства **а)** чернозема миграционно-мицеллярного и **б)** агрочернозема миграционно-мицеллярного (Fe ор – железо оксалатрастворимое, Fe нс – несиликатное).
Fig. 4. Some properties of **а)** chernozem and **б)** agrochernozem (Fe op: Fe content according to Tamm, Fe нс: Fe content according to Mehra and Jackson).

Чернозем миграционно-мицеллярный и агрочернозем миграционно-мицеллярный относятся к тяжелым суглинкам крупнопылеватым (текстурный класс USDA – silt loam) и характеризуются слабой дифференциацией содержания фракций физической глины и отсутствием дифференциации фракции ила и полуторных оксидов (рис. 4а, 4б). Реакция среды нейтральная, в карбонатных горизонтах – слабощелочная, обменного кальция содержится значительно больше магния. Содержание органического углерода равномерно снижается с глубиной, отмечается неглубокое вымывание карбонатов.

В таблице 1 представлены результаты определения плотности и влажности изучаемых почв во время реологического испытания. Для дерново-подзолистых почв наблюдается увеличение значений плотности с глубиной горизонтов отбора, при этом плотность пахотного горизонта P1 больше плотности серогумусового горизонта AY почвы под ельником. Для чернозема миграционно-мицеллярного также характерно увеличение значений плотности с глубиной, в агрочерноземе миграционно-мицеллярном максимальные значения плотности отмечались в пахотных горизонтах PU1 и PU2.

Значения влажности в образцах дерново-подзолистых почв максимальны в серогумусовом горизонте AY и пахотном горизонте P1, при этом для нижележащих горизонтов пахотной почвы дифференциация значений не столь очевидна. Для чернозема миграционно-мицеллярного и агрочернозема миграционно-мицеллярного не было отмечено четкого распределения влажности по глубине.

2. Реологические показатели почв

Реологические показатели можно разделить на показатели упругости и сдвиговой устойчивости. К показателям вязкоупругости почв относятся диапазон линейной вязкоупругости (LVE-range), определяемый значением деформации γ_L и модулем накопления $G`_L$, диапазон пластичных деформаций, заканчивающийся точкой Crossover (flow point), определяемый деформацией $\gamma_F$ и значением модулей накопления и потерь ($G`$ и $G``_F$), интегральная зона – Integral Z.

Таблица 1. Плотность и влажность изучаемых образцов дерново-подзолистых почв и черноземов типичных во время реологического испытания
Table 1. Bulk density and water content of the studied samples of soddy-podzolic soils and typical chernozems during the rheological test

Почва, горизонт	Глубина, см	Влажность, %	Плотность, г/см^3
Дерново-подзолистая почва			
AY	4–15	51.6	0.55
EL	15–28	26.4	1.36
BEL	28–35	24	1.44
BT1	35–70	22.7	1.49
BT2	70–100	22.7	1.53
Агродерново-подзолистая почва			
P1	0–26	31.3	1.33
P2	26–30	27.4	нет данных
BEL	30–65	23.5	1.57
BT1	65–85	33.4	1.57
BT2	85–115	24.0	нет данных
Чернозем миграционно-мицеллярный			
AU	0–50	40.5	1.09
AUBCA	50–95	43.6	1.23
BCAmc	95–170	34	1.41
Агрочернозем миграционно-мицеллярный			
PU1	0–20	35.8	1.32
PU2	20–30	30.4	1.34
AUBCA	60–97	41.8	1.06
BCAmc	97–120	43.1	нет данных

Напряжения сдвига τ_L и τ_F (для диапазона LVE-range и в точке Crossover соответственно) и τ_{max} относятся к показателям сдвиговой устойчивости почв (Holthusen et al., 2019).

Ввиду большого количества получаемых в осцилляционном тесте данных и корреляций реологических показателей между собой (Pértile et al., 2016) в данной статье рассматривались следующие показатели: напряжения сдвига τ_L, τ_F, τ_{max} и деформация γ_L, интегральная зона – integral Z.

2.1 Диапазон линейной вязкоупругости LVE-range

Первым этапом в нашем анализе реологического поведения почв было изучение диапазона линейной вязкоупругости LVE-range (рис. 5)[2]. Показатель γ_L физически представляет собой расстояние полностью обратимого бокового смещения слоев частиц во время колебания верхнего плато реометра. Считается, что при деформациях внутри диапазона LVE-range электростатических сил, действующих между частицами, достаточно для перемещения их в исходное положение, поэтому данная область представляет собой меру упругого поведения почвы (Holthusen et al., 2019; Mezger, 2014).

Оценка значимости различий показала значимую разницу при $p < 0.05$ для пар значений ДП AY – ДП EL, ДП AY – ДП BEL, ДП AY – АДП BEL, ДП AY – Ч BCAmc, ДП EL – Ч AU, ДП EL – Ч AUBCA, ДП EL –АЧ PU1, ДП EL – АЧ PU2, ДП BEL – АЧ PU1, ДП BEL – АЧ PU2. В дерново-подзолистой почве наблюдается элювиально-иллювиальная дифференциация значений γ_L по глубине с наибольшими медианными значениями показателя в серогумусовом горизонте AY (0.007%) и наименьшими (0.002%) – в элювиальном горизонте EL (рис. 5а). Ожидалось, что в агродерново-подзолистой почве отличия будут менее выраженными, по сравнению с дерново-подзолистой почвой под ельником, тест Краскела – Уоллиса также не показал значимых отличий. Однако отметим, что медианные значения показателя в пахотном горизонте P1 несколько выше, чем в нижележащих. Для черноземов миграционно-мицеллярных не было выявлено значимых отличий между горизонтами двух профилей, но замечено, что в целом медианные значения деформации γ_L темногумусового AU и пахотных горизонтов PU1 и PU2 несколько выше, чем нижележащих карбонатных горизонтов BCAmc. Гумусовые и пахотные горизонты дерново-подзолистых почв и черноземов миграционно-мицеллярных не показали четко выраженных отличий.

[2] Результаты определения деформации γ_L, характеризующей диапазон линейной вязкоупругости почв, взяты из работы Клюевой, Хайдаповой, 2017.

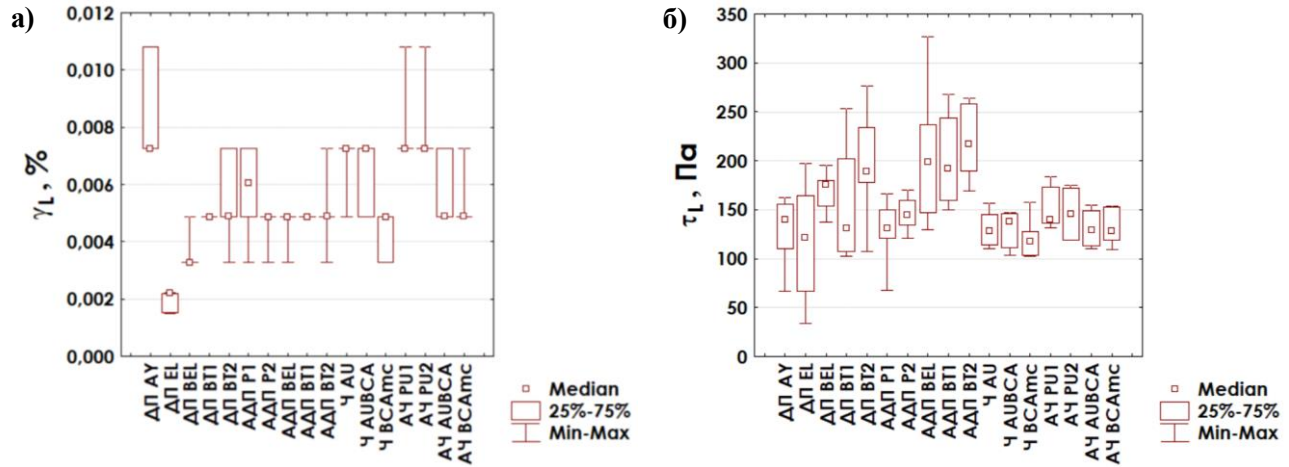

Рис. 5. Диапазон линейной вязкоупругости LVE-range: **а)** – деформация γ_L, **б)** – напряжение сдвига τ_L в конце диапазона LVE-range дерново-подзолистых почв и черноземов миграционно-мицеллярных (ДП и АДП – дерново-подзолистая и агродерново-подзолистые почвы, Ч и АЧ – чернозем и агрочернозем миграционно-мицеллярные, n = 4–7, min-max – размах значений величин, 25%–75% – нижний и верхний квартили).

Fig. 5. The linear viscoelastic range (LVE-range): **a)** – deformation γ_L, **б)** – shear stress τ_L at the end of the LVE-range of the investigated soils (ДП and АДП – soddy-podzolic and agrosoddy-podzolic soils, Ч and АЧ – chernozem and agrochernozem, n = 4–7, min-max – the value ranges, 25%–75% – the lower and upper quartiles).

Напряжение сдвига τ (shear stress, shear resistance) представляет собой устойчивость почвы к некоторой внешней сдвиговой нагрузке. Анализ значимости различий напряжения сдвига τ_L в конце диапазона упругих деформаций LVE-range тестом Краскела – Уоллиса выявил лишь одну пару значений: АДП BT2 – Ч BCAmc (рис. 5б). Данный факт, возможно, связан с большим разбросом данных в дерново-подзолистых почвах и фактической слабой дифференциацией показателя для изучаемых черноземов из-за мощного гумусового профиля и нечетких отличий в гранулометрическом составе. Однако необходимо сказать, что в дерново-подзолистых почвах наблюдается тенденция к увеличению медианных значений данного показателя с глубиной. В целом размах значений в дерново-подзолистых почвах гораздо больше, чем в черноземах миграционно-мицеллярных.

Данные кластерного анализа показали, что распределения величины γ_L в изучаемых почвах объясняются в основной степени содержанием органического вещества и физической глины, а также в случае дерново-подзолистых почв – влаги, черноземов миграционно-мицеллярных – железа (рис. 6а, 6б). Так, максимальные значения (статистически подтвержденные или имеющие тенденцию к увеличению показателя) деформации γ_L в изучаемых почвах отмечаются в гумусовых и пахотных горизонтах.

В случае напряжения сдвига τ_L (рис. 7а, 7б) основными определяющими факторами оказались содержания железа, физической глины и кальция для дерново-подзолистых почв, что проявилось в тенденции к увеличению показателя в их иллювиальных горизонтах BT1 и BT2, а для черноземов миграционно-мицеллярных – органического углерода, физической глины и железа.

Органическое вещество, катионы кальция, железа, тонкие фракции гранулометрического состава усиливают взаимодействие между почвенными частицами благодаря увеличению контактов между ними, приводя к увеличению доли упругой деформации.

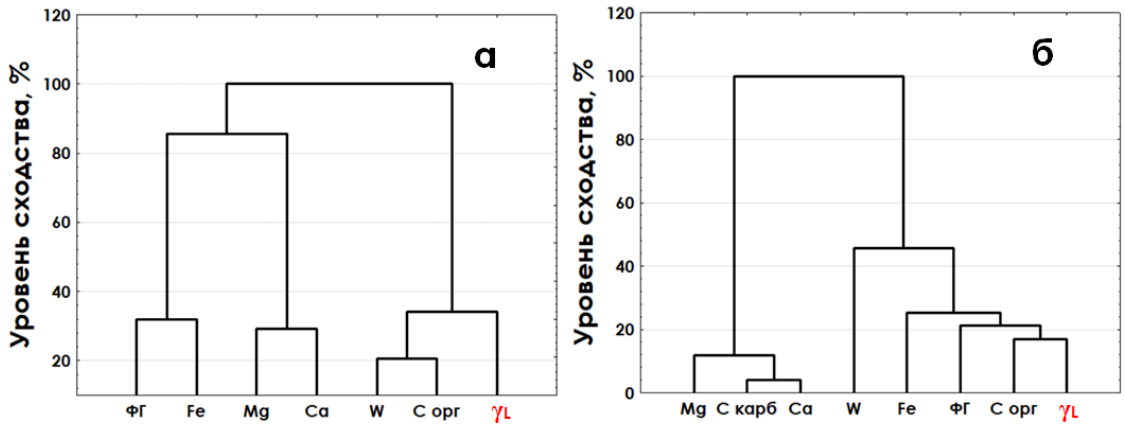

Рис. 6. Дендрограммы физических и химических свойств и деформации γ_L диапазона линейной вязкоупругости: **а)** – дерново-подзолистых почв, **б)** – черноземов миграционно-мицеллярных (Mg, Ca, W, Fe, ФГ, С карб, С орг – содержания обменных магния и кальция, влаги, несиликатного железа, фракции физической глины, неорганического и органического углерода).

Fig. 6. Tree diagrams for physical and chemical properties and deformation γ_L of the LVE-range: **a)** – soddy-podzolic soils, **б)** – chernozems (Mg, Ca, W, Fe, ФГ, С карб, С орг – contents of exchangeable Mg, Ca, water, Fe (acc. Mehra–Jackson), physical clay (<0.01 mm), inorganic and organic carbon).

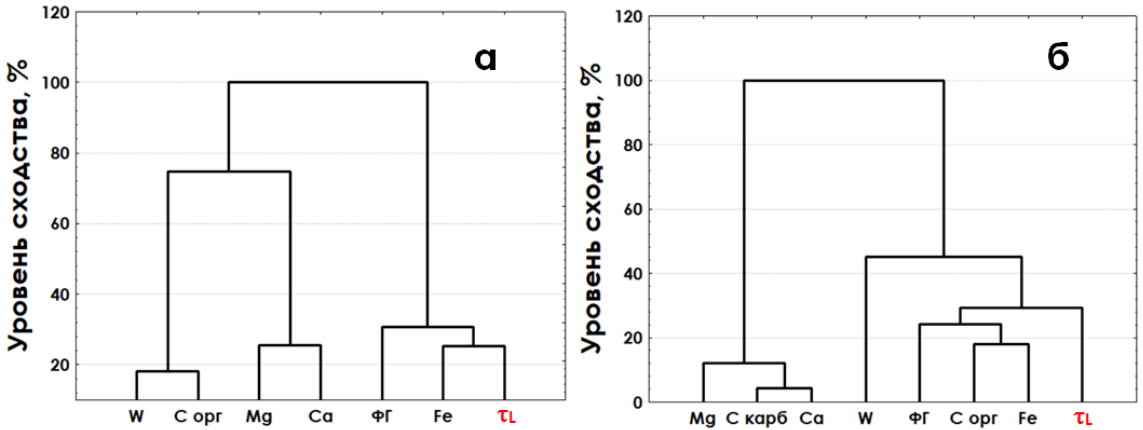

Рис. 7. Дендрограммы физических и химических свойств и напряжения сдвига τ_L в конце диапазона линейной вязкоупругости: **а)** – дерново-подзолистых почв, **б)** – черноземов миграционно-мицеллярных (Mg, Ca, W, Fe, ФГ, С карб, С орг – содержания обменных магния и кальция, влаги, несиликатного железа, фракции физической глины, неорганического и органического углерода).

Fig. 7. Tree diagrams for physical and chemical properties and shear stress τ_L at the end of the LVE–range: **a)** – soddy-podzolic soils, **б)** – chernozems (Mg, Ca, W, Fe, ФГ, С карб, С орг – contents of exchangeable Mg, Ca, water, Fe (acc. Mehra – Jackson), physical clay (<0.01 mm), inorganic and organic carbon).

Органическое вещество повышает устойчивость почвы путем усиления когезии и увеличения числа менисков в ненасыщенных условиях (Buchmann et al., 2015; Markgraf et al., 2012; Markgraf, Horn, 2007; Zhang, Hartge, 1990); частицы тонких фракций почвы выступают в качестве связующего агента между более крупными частицами (Mitchell, Soga, 2005). Кальций и магний усиливают микроагрегацию благодаря адсорбции на частицах с образованием мостиков, связывающих их между собой или с органическими коллоидами (Bronick, Lal, 2005; Lal, Shukla, 2004; Encyclopedia of agrophysics, 2011). Железо может уменьшать отталкивающие силы между отрицательно заряженными частицами (Six et al., 2004) и действовать как катионный мостик с образованием металлорганических соединений и гелей (Bronick, Lal, 2005).

2.2. Максимальное значение напряжения сдвига τ_{max}

При деформациях, превышающих диапазон линейной вязкоупругости LVE-range, продолжающееся движение почвенных частиц приводит к их зацеплению друг за друга, проникновению в соседние слои частиц. Благодаря этому повышается число контактов, что приводит к увеличению значений напряжения сдвига вплоть до некоторого плато или максимального пикового значения τ_{max} (Holthusen et al., 2019).

Изученные ненарушенные дерново-подзолистые, агродерново-подзолистые, черноземы миграционно-мицеллярные и агрочерноземы миграционно-мицеллярные проявляют подобный характер вязкоупругого поведения при нагрузке (при данном уровне увлажнения): все образцы проявляют отчетливый пик на кривой напряжения сдвига $\tau(\gamma)$ (рис. 1), что соответствует типу хрупкого разрушения структуры (Holthusen et al., 2017; Horn et al., 2019). Данный пик, или τ_{max}, при этом характеризует максимальную устойчивость или прочность микроструктуры, проявляемую почвой в осцилляционном тесте амплитудной развертки. Оценка значимости различий методом Краскела – Уолиса показала достоверную разницу при $p < 0.05$ для пар значений: ДП AY – Ч AUBCA, ДП AY – АЧ BCAmc, ДП BT2 – Ч AUBCA, ДП BT2 – АЧ BCAmc, АДП BEL – Ч AUBCA, АДП BEL – АЧ BCAmc, АДП BT1– Ч AU, АДП BT1– Ч AUBCA, АДП BT1– АЧ BCAmc, АДП

BT2 – Ч AUBCA.

Отметим, что наблюдается тенденция (рис. 8) к элювиально-иллювиальной дифференциации максимального напряжения сдвига τ_{max} в дерново-подзолистой почве и к увеличению медианных значений τ_{max} с глубиной в агродерново-подзолистой почве.

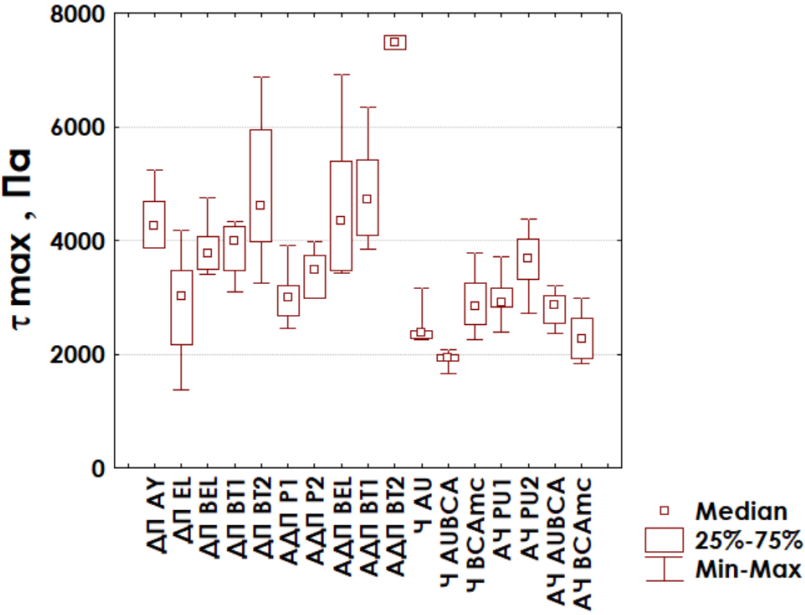

Рис. 8. Максимальное значение напряжения сдвига τ_{max} дерново-подзолистых почв и черноземов миграционно-мицеллярных (ДП и АДП – дерново-подзолистая и агродерново-подзолистые почвы, Ч и АЧ – чернозем и агрочернозем миграционно-мицеллярные, n = 4–7, min-max – размах значений величин, 25%–75% – нижний и верхний квартили).

Fig. 8. Maximal shear stress τ_{max} of the investigated soils (ДП and АДП – soddy-podzolic and agrosoddy-podzolic soils, Ч and АЧ – chernozem and agrochernozem, n = 4–7, min-max – the value ranges, 25%–75% – the lower and upper quartiles).

В темногумусовом горизонте AU чернозема под дубрашиной максимальное напряжение сдвига значимо больше, чем в нижележащем AUBCA, в агрочерноземе миграционно-мицеллярном можно отметить тенденцию к уменьшению значения показателя с глубиной (статистически не подтверждена). Нижние горизонты профилей дерново-подзолистых почв характеризуются большими значениями максимального напряжения сдвига по сравнению с нижними горизонтами черноземов миграционно-мицеллярных, гумусовые и пахотные горизонты изучаемых почв не показали четко выраженных отличий. Так же, как и в случае с напряжением сдвига τ_L в конце диапазона упругих деформаций LVE-range, размах значений τ_{max} в дерново-подзолистых почвах гораздо больше, чем в черноземах миграционно-мицеллярных.

Кластерный анализ данных (рис. 9а, 9б) показал, что факторами, оказывающими наибольшее воздействие на максимальное напряжение сдвига в дерново-подзолистых почвах, являются содержания физической глины, железа и кальция, а в черноземах миграционно-мицеллярных – содержания физической глины, органического вещества и магния, что и определило распределение значений показателя в профилях почв. Механизмы действия этих структурирующих агентов кратко были описаны выше. При рассмотрении максимального значения напряжения сдвига τ_{max} можно наблюдать другой фактор, воздействующий на увеличение числа контактов между почвенными частицами: начальную плотность образца (Terzaghi et al., 1996; Ye et al., 2016). В данном случае влияние плотности образца (табл. 1) проявилось более четко, чем в случае с диапазоном LVE-range: максимальные значения (статистически подтвержденные или тенденции к увеличению) отмечались в иллювиальных горизонтах BT1 и BT2 дерново-подзолистых почв и PU2 агрочернозема миграционно-мицеллярного, для которых были характерны наибольшие значения плотности.

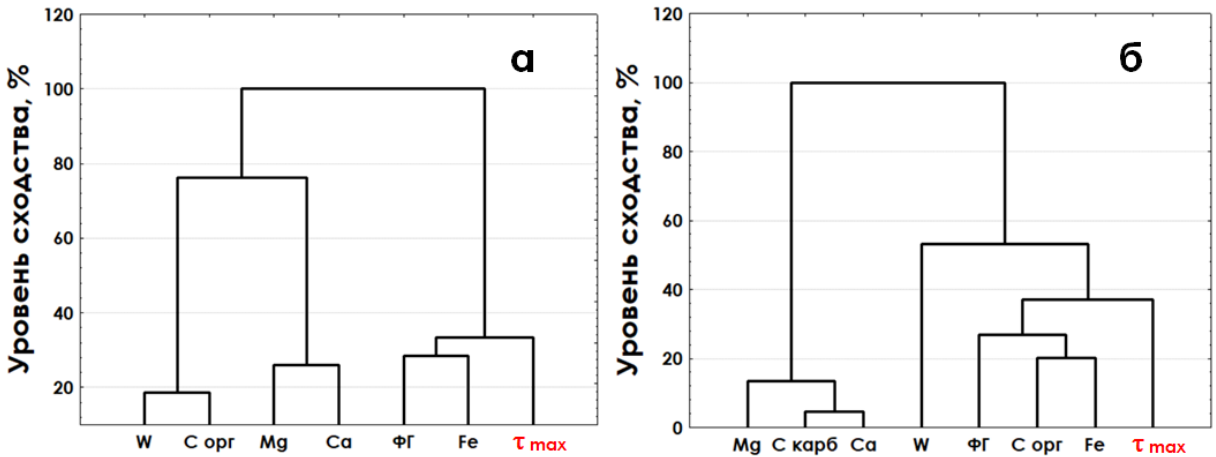

Рис. 9. Дендрограммы физических и химических свойств и максимального напряжения сдвига τ_{max}: **а)** – дерново-подзолистых почв, **б)** – черноземов миграционно–мицеллярных (Mg, Ca, W, Fe, ФГ, С карб, С орг – содержания обменных магния и кальция, влаги, несиликатного железа, фракции физической глины, неорганического и органического углерода).

Fig. 9. Tree diagrams for physical and chemical properties and maximal shear stress τ_{max}: **а)** – soddy-podzolic soils, **б)** – chernozems (Mg, Ca, W, Fe, ФГ, С карб, С орг – contents of exchangeable Mg, Ca, water, Fe (acc. Mehra – Jackson), physical clay (<0.01 mm), inorganic and organic carbon).

2.3 Точка Crossover (flow point) – переход из области пластичного в область вязкого поведения и Интегральная зона Integral Z

После достижения максимального значения напряжения сдвига τ_{max}, при котором частицы различной формы становятся параллельно выровненными относительно друг друга, трение между частицами уменьшается вследствие разрушения микроструктуры или последующей перегруппировки частиц (Holthusen et al., 2019).

Значение напряжения сдвига τ_F в точке Crossover соответствует той величине напряжения сдвига, при которой модули накопления G` и потерь G``имеют одинаковые величины, то есть накопленная упругая энергия становится количественно равной рассеянной энергии. После достижения данной точки в осцилляционном тесте микроструктура почвы невозвратно разрушается (microstructural collapse).

Оценка значимости различий показала значимую разницу при $p < 0.05$ для пар значений: ДП AY – ДП EL, ДП AY – Ч AUBCA, ДП AY – АЧ BCAmc, ДП EL – АДП BT1, ДП EL – АДП BT2, ДП BT2 – Ч AUBCA, АДП BEL – Ч AUBCA, АДП BT1 – Ч AUBCA, АДП BT1 – АЧ BCAmc, АДП BT2 – Ч AU, АДП BT2 – Ч AUBCA, АДП BT2 – Ч BCAmc, АДП BT2 – АЧ AUBCA, АДП BT2 – АЧ BCAmc.

Распределения величины напряжения сдвига τ_F похожи с распределением пикового значением τ_{max} (рис. 10а). В дерново-подзолистой почве наблюдается элювиально-иллювиальная дифференциация значений напряжения сдвига τ_F по глубине с наибольшими медианными значениями показателя в серогумусовом горизонте AY (4 090 Па) и иллювиальном BT2 и наименьшими (2 050 Па) – в элювиальном горизонте EL. Тест Краскела – Уоллиса не показал значимых отличий для агродерново-подзолистой почвы, однако отметим, что для нее проявляется отчетливая тенденция к увеличению медианных значений показателя с глубиной.

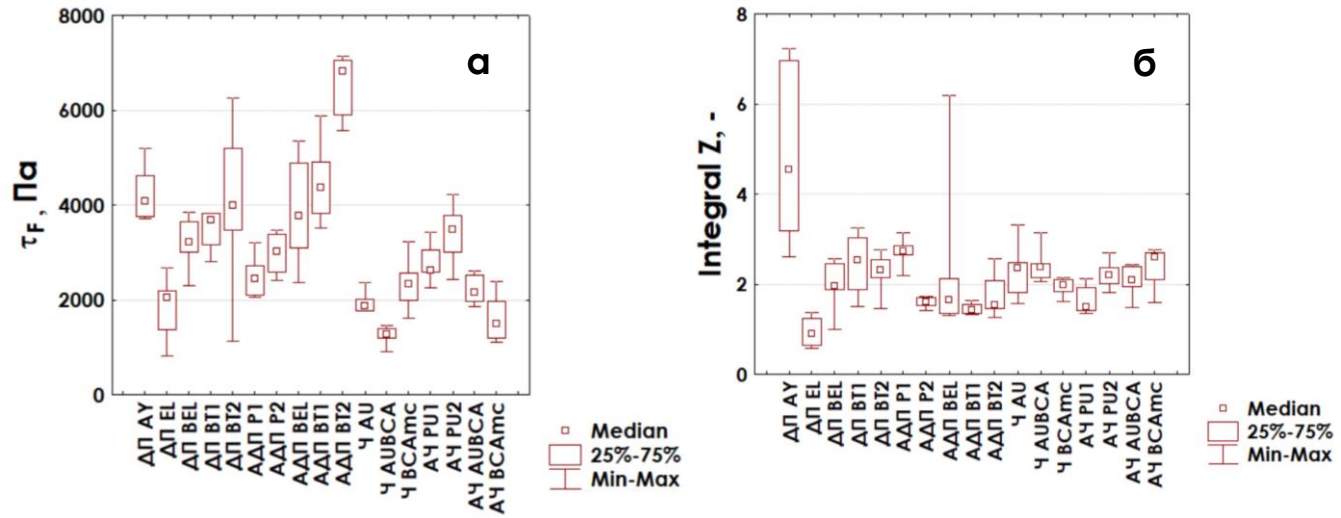

Рис. 10. а) – напряжение сдвига τ_F в точке Crossover, **б)** – интегральная зона Integral Z дерново-подзолистых почв и черноземов миграционно-мицеллярных (ДП и АДП – дерново-подзолистая и агродерново-подзолистые почвы, Ч и АЧ – чернозем и агрочернозем миграционно-мицеллярные, n = 4–7, min-max – размах значений величин, 25%–75% – нижний и верхний квартили).

Fig. 10. а) – shear stress τ_F in Crossover point, **б)** – Integral Z of the investigated soils (ДП and АДП – soddy-podzolic and agrosoddy-podzolic soils, Ч and АЧ – chernozem and agrochernozem, n = 4–7, min-max – the value ranges, 25%–75% – the lower and upper quartiles).

Для черноземов миграционно-мицеллярных не было выявлено значимых отличий между горизонтами двух профилей, но можно отметить, что в целом медианные значения напряжения сдвига τ_F пахотных горизонтов PU1 и PU2 несколько выше, чем в нижележащем горизонте BCAmc.

Нижние горизонты профиля агродерново-подзолистой почвы BT2 характеризуются большими значениями максимального напряжения сдвига по сравнению с нижними горизонтами AUBCA и BCAmc черноземов миграционно-мицеллярных (при значимых отличиях).

Гумусовые и пахотные горизонты изучаемых почв не показали четко выраженных отличий.

Как и в случаях с напряжением сдвига τ_L в конце диапазона упругих деформаций LVE-range τ_F размах значений в дерново-подзолистых почвах гораздо больше, чем в черноземах миграционно-мицеллярных.

Кластерный анализ данных показал, что факторами, оказывающими наибольшее воздействие на изменение напряжения сдвига τ_F, стали содержания физической глины, железа и влаги в случае дерново-подзолистых почв; и физической глины, органического вещества и магния в случае черноземов миграционно-мицеллярных (рис. 11а, 11б). Это проявилось в максимальных значениях показателя в иллювиальных горизонтах BT2 дерново-подзолистых почв и пахотных горизонтах PU1 и PU2 черноземов миграционно-мицеллярных. Отметим, что содержание физической глины, т. е. количество почвенных частиц тонких фракций, и сопутствующий фактор плотности почвы имеют первостепенное значение для напряжения сдвига τ_F в точке Crossover и пикового значения τ_{max} во всех изучаемых почвах (механизмы влияния были описаны в разделе 2.2. и 2.3). В данной статье не рассмотрено влияние формы частиц на протекание сдвиговых процессов, однако данный вопрос важен и требует более глубокого и детального изучения в будущем (Abbireddy, Clayton, 2015; Kock, Huhn, 2007).

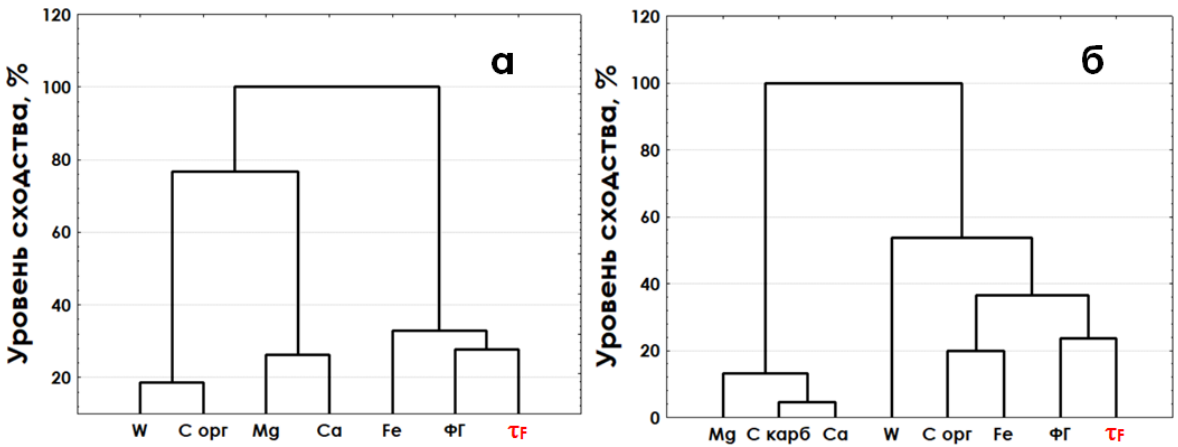

Рис. 11. Дендрограммы физических и химических свойств и напряжения сдвига τ_F в точке Crossover: **а)** – дерново-подзолистых почв, **б)** – черноземов миграционно-мицеллярных (Mg, Ca, W, Fe, ФГ, С карб, С орг – содержания обменных магния и кальция, влаги, несиликатного железа, фракции физической глины, неорганического и органического углерода).

Fig. 11. Tree diagrams for physical and chemical properties and shear stress τ_F in Crossover point: **a)** –soddy-podzolic soils, **б)** – chernozems (Mg, Ca, W, Fe, ФГ, С карб., С орг – contents of exchangeable Mg, Ca, water, Fe (acc. Mehra – Jackson), physical clay (<0.01 mm), inorganic and organic carbon).

Дополнительным расчетным показателем, описывающим характер перехода поведения почвы из диапазона упругих деформаций в состояние вязкого течения или полного разрушения структуры, является индекс перехода (flow transition index), равный отношению напряжений сдвига в точке Crossover и в конце диапазона LVE-range – τ_F/τ_L (рис. 12). Чем ближе данное соотношение к единице, тем больше проявляется тенденция поведения почвенного образца к хрупкому разрушению (Mezger, 2014).

Напряжение сдвига τ_F в точке Crossover превышает напряжение сдвига τ_L в точке yield point, определяющей диапазон линейной вязкоупругости LVE-range, в 9–31 раз в изученных почвах. Меньшую тенденцию к хрупкому разрушению проявляют либо гумусовые (в т. ч. пахотные) горизонты, либо горизонт BT2 в случае агродерново-подзолистой почвы, что подтверждает представленные выше результаты распределения значений напряжения сдвига τ_L и τ_F в профилях почв.

Интегральная зона Z (integral Z) рассчитывается как площадь фигуры, ограниченной кривой tanδ и прямой y = G``/G` = 1 (рис. 2). Данный показатель представляет собой сумму площадей диапазонов упругих и пластичных деформаций, то есть характеризует общую устойчивость микроструктуры к нагрузкам (structural stiffness).

Оценка значимости различий показала значимую разницу при $p < 0.05$ для пар значений: ДП AY – ДП EL, ДП AY – АДП P2, ДП AY – АДП BEL, ДП AY – АДП BT1, ДП AY – АЧ PU1, ДП EL – АДП P1, ДП EL – Ч AUBCA , ДП EL – АЧ BCAmc, АДП P1 – АДП BT1.

Максимальная интегральная зона Z (4.5) отмечалась для серо-гумусового горизонта AY дерново-подзолистой почвы, минимальная (0.9) – для элювиального горизонта (рис. 10б). В агродерново-подзолистой почве значения показателя в пахотном горизонте P1 значимо больше нижележащего текстурного горизонта BT2, для горизонта BEL характерен наибольший разброс значений.

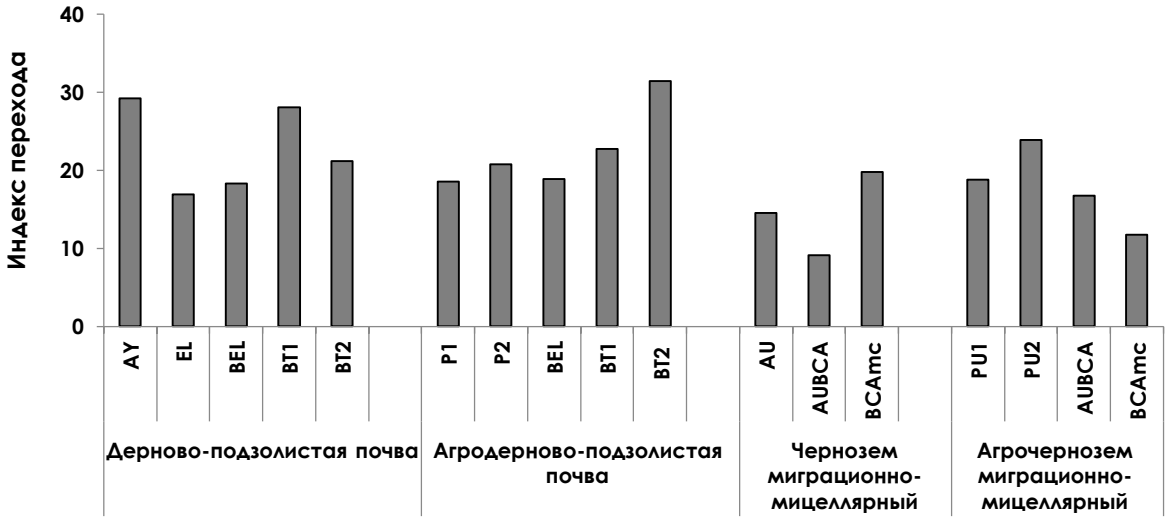

Рис. 12. Индекс перехода (flow transition index) для изученных дерново-подзолистых почв и черноземов миграционно-мицеллярных.
Fig. 12. The flow transition index of the investigated soils.

Для черноземов миграционно-мицеллярных не было выявлено значимых отличий между горизонтами двух профилей, что, возможно, связано с меньшей дифференциацией физических и химических свойств в профилях, а также комплексным характером расчета показателя. Размах значений показателя в дерново-подзолистых почвах несколько больше, чем в черноземах миграционно-мицеллярных.

Интегральная зона серогумусового горизонта AY значимо больше пахотного горизонта P2 агродерново-подзолистой почвы и PU1 агрочернозема миграционно-мицеллярного. В целом при данном объеме выборки остальные горизонты изученных почв не показывают значимых отличий по величине интегральной зоны Z.

Кластерный анализ показал, что факторами, оказывающими наибольшее воздействие на изменение показателя в дерново-подзолистых почвах, являются органическое вещество, содержание влаги и физическая глина (рис. 13а), что аналогично зависимостям, полученным для деформации γ_L диапазона линейной вязкоупругости. Для черноземов миграционно-мицеллярных содержание влаги, железа и кальция оказались главными влияющими факторами (рис. 13б). Предполагалось, что зависимости, полученные для интегральной зоны Z черноземов, будут, как и в дерново-подзолистых почвах, схожи с зависимостями, выявленными для деформации γ_L его диапазона линейной вязкоупругости, однако кластерный анализ это не подтвердил. Данный факт, вероятно, сможет подтвердиться или опровергнуться при увеличении количества повторностей измерения в последующих исследованиях.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Примененный в исследовании метод осцилляционной амплитудной развертки открывает обширные возможности в быстром и информативном изучении и получении новых данных о реологическом поведении почв естественного сложения, что особенно важно для точного прогноза их устойчивости к воздействию сельскохозяйственной техники и деградационных рисков.

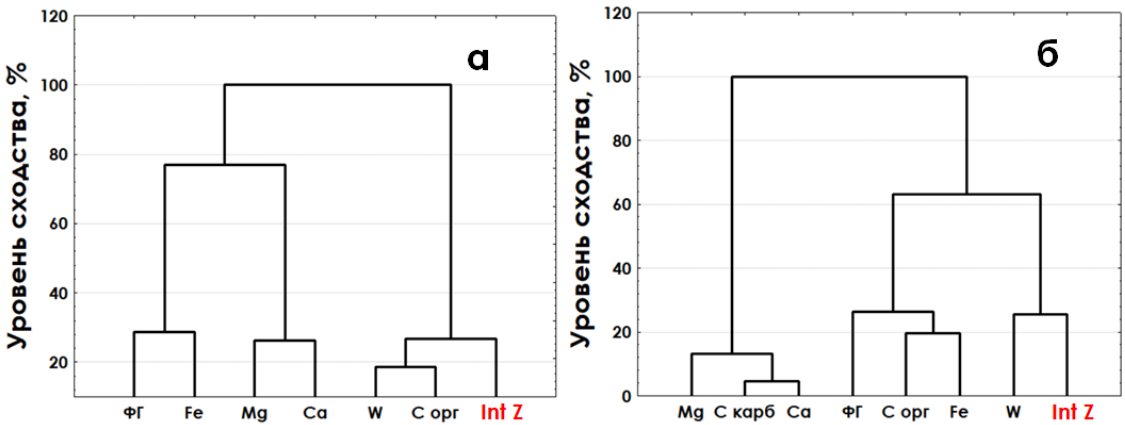

Рис. 13. Дендрограммы физических и химических свойств и интегральной зоны: **а)** – дерново-подзолистых почв, **б)** – черноземов миграционно-мицеллярных (Mg, Ca, W, Fe, ФГ, С карб, С орг – содержания обменных магния и кальция, влаги, несиликатного железа, фракции физической глины, неорганического и органического углерода).
Fig. 13. Tree diagrams for physical and chemical properties and Integral Z: **а)** – soddy-podzolic soils, **б)** – chernozems (Mg, Ca, W, Fe, ФГ, С карб, С орг – contents of exchangeable Mg, Ca, water, Fe (acc. Mehra – Jackson), physical clay (<0.01 mm), inorganic and organic carbon).

Все изученные почвы показали хрупкий тип разрушения микроструктуры с отчетливым пиком значений напряжения сдвига на реологической кривой, определяющим их максимальную устойчивость.

Резкая дифференциация значений физических и химических показателей в дерново-подзолистых почвах и их плавное изменение в черноземах миграционно-мицеллярных при небольшом количестве повторностей измерения нашли отражение в большем размахе значений реологических показателей для первых при использующихся статистических методах.

Содержание органического углерода и физической глины являются одними из основных факторов, определяющих реологические показатели вязкоупругости изученных дерново-подзолистых почв и черноземов миграционно-мицеллярных: они положительно связаны с диапазоном линейной вязкоупругости LVE-range и интегральной зоной Z как суммы областей упругого и пластичного поведения. Показатели напряжения сдвига изученных почв (τ_L, τ_F, τ_{max}) в наибольшей степени связаны с изменением содержания физической глины, а также железа для дерново-подзолистых почв и органического углерода в случае черноземов миграционно-мицеллярных: с их увеличением повышается сдвиговая устойчивость.

Процессы, произошедшие в исследованных почвах в результате их сельскохозяйственного использования (распашки), привели к закономерному изменению изучаемых реологических показателей. Снижение содержания органического углерода приводит к уменьшению вязкоупругости и сдвиговой устойчивости почв, помимо этого повышенная плотность пахотных горизонтов и перераспределение физической глины проявляются в слабой дифференциации значений реологических показателей по глубине при наблюдающемся максимуме в верхнем горизонте.

В нашем исследовании параметры сдвиговой устойчивости изученных почв: напряжения сдвига в конце диапазона линейной вязкоупругости LVE-range τ_L и τ_F в точке пересечения модулей накопления и потерь Crossover, а также максимальное значение τ_{max} оказались более информативны и показали выраженные отли-

чия между генетическими горизонтами изученных почв по сравнению с показателями вязкоупругости: деформацией γ_L, характеризующей область упругого поведения, и интегральной зоной Z. Однако для полного изучения реологического поведения почв и его изменения в результате воздействия природных и антропогенных факторов в других исследовательских работах необходим подробный анализ всех вышеперечисленных реологических параметров.

В настоящее время предложенные реологические показатели являются лишь небольшой долей от возможных индикаторов физического состояния почв, пригодных для научного изучения и практического применения. Представленный метод определения реологических параметров почвы с помощью реометрической техники пока занимает малую научную нишу в агрофизических исследованиях. Однако в будущем показатели сдвиговой устойчивости и вязкоупругости могут дать много новой и дополнительной информации о межчастичных связях, почвенной прочности, взаимосвязях между процессами на мезо- и макроуровнях, а полученные данные послужат существенным дополнением к уже имеющемуся блоку индикаторов для их использования в практических приложениях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Бондарев А.Г.* Физика и механика почв в решении современных проблем почвенного плодородия // Почвоведение: аспекты, проблемы, решения. М.: Почв. ин-т им. В.В. Докучаева Россельхозакадемии, 2003. С. 553–563.

2. *Бондарев А.Г., Кузнецова И.В.* Проблема деградации физических свойств почв Россиии и пути её решения // Почвоведение. 1999. №. 9. С. 1126–1131.

3. *Бондарев А.Г., Кузнецова И.В., Тихонравов П.И., Уткаева В.Ф.* Научные основы оптимизации физических условий плодородия почв и повышение их устойчивости к деградации // Современные проблемы почвоведения: Научные труды Почвенного института имени В.В. Докучаева. М.: Почв. ин–т им. В.В. Докучаева Россельхозакадемии, 2000. С. 408–422.

4. *Клюева В.В.* Реологические свойства почв и их связь с физическими и химическими свойствами на примере дерново-подзолистой почвы и

чернозема типичного: Дис. … канд. биол. наук. М.: МГУ, 2019. 142 с.
5. *Клюева В.В., Хайдапова Д.Д.* Реологические свойства образцов естественного и нарушенного сложения дерново-подзолистой и агродерново-подзолистой почвы // Бюллетень Почвенного института им. В.В. Докучаева. 2017. № 89. С. 21–35. DOI: 10.19047/0136-1694-2017-89-21-35.
6. *Кузнецова И.В., Скворцова Е.Б.* Теоретические и методические основы предотвращения физической деградации почв // Научные основы предотвращения деградации почв (земель) сельскохозяйственных угодий России и формирования систем воспроизводства их плодородия в адаптивно-ландшафтном земледелии: Т. 1. Теоретические и методические основы предотвращения деградации почв (земель) сельскохозяйственных угодий. Коллективная монография. М.: Почв. ин-т им. В.В. Докучаева Россельхозакадемии, 2013. С. 50–133.
7. *Сапожников П.М.* Деградация физических свойств почв при антропогенных воздействиях // Почвоведение. 1994. №. 11. С. 60–66.
8. Теория и практика химического анализа почв. ред. Воробьева Л.А. М.: ГЕОС, 2006. 400 с.
9. *Фрид А.С., Кузнецова И.В., Королева И.Е., Бондарев А.Г., Когут Б.М., Уткаева В.Ф., Азовцева Н.А.* Зонально-провинциальные нормативы изменений агрохимических, физико-химических и физических показателей основных пахотных почв европейской территории России при антропогенных воздействиях. М.: Почв. инт им. В.В. Докучаева, 2010. 176 с.
10. *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.
11. *Хитров Н.Б., Понизовский А.А.* Руководство по лабораторным методам исследования ионно-солевого состава нейтральных и щелочных минеральных почв. М.: ВАСХНИЛ, Почв. ин-т им. В.В. Докучаева, 1990. 236 с.
12. *Хитров Н.Б., Хайдапова Д.Д.* Вязкоупругое поведение вертикового солонца Каменной Степи // Почвоведение. 2019. № 7. С. 843–858.
13. *Холопов Ю.В., Хайдапова Д.Д., Лаптева Е.М.* Реологические свойства северо-таежных автоморфных и полугидроморфных криометаморфических почв Европейского северо-востока России (Республика Коми) // Почвоведение. 2018. № 4. С. 439–450.
14. *Шеин Е.В.* Курс физики почв: Учебник. М.: Изд-во Моск. ун-та, 2005. 432 с.
15. *Шеин Е.В., Милановский Е.Ю., Хайдапова Д.Д., Поздняков А.И., Тюгай З., Початкова Т.Н., Дембовецкий А.В.* Практикум по физике

твердой фазы почв: Учебное пособие. М.: Буки Веди, 2017. 119 с.
16. *Abbireddy C.O.R., Clayton C.R.I.* The impact of particle form on the packing and shear behaviour of some granular materials: an experimental study // Granular Matter. 2015. Vol. 17. No. 4. P. 427–438.
17. *Armenise E., Redmile-Gordon M., Stellacci A.M., Ciccarese A., Rubino P.* Developing a soil quality index to compare soil fitness for agricultural use under different managements in the Mediterranean environment // Soil Tillage Research. 2013. Vol. 130. P. 91–98.
18. *Barré P., Hallett P.D.* Rheological stabilization of wet soils by model root and fungal exudates depends on clay mineralogy // European Journal of Soil Science. 2009. Vol. 60. P. 525–538.
19. *Bronick C.J., Lal R.* Soil structure and management: A review // Geoderma. 2005. Vol. 124. P. 3–22.
20. *Buchmann C., Bentz J., Schaumann G.E.* Intrinsic and model polymer hydrogel-induced soil structural stability of a silty sand soil as affected by soil moisture dynamics // Soil Tillage Research. 2015. Vol. 154. P. 22–33.
21. *Bünemann E.K., Bongiorno G., Bai Z., Creamer R.E., Deyn G.D., Goedy R.D., Fleskens L., Geissen V., Kuyper T.W., Mäder P., Pulleman M., Sukkel W., Willem J., Groenigen V., Brussaard L.* Soil quality – A critical review // Soil Biology and Biochemistry. 2018. Vol. 120. P. 105–125.
22. *Dexter A.R.* Soil physical quality. Part I. Theory, effects of soil texture, density, and organic matter, and effects on root growth // Geoderma. 2004. Vol. 120. P. 201–214.
23. *Encyclopedia of agrophysics*. J. Gliński, J. Horabik, J. Lipiec (Eds). Dordrecht: Springer, 2011. 1028 p.
24. *Food security and soil quality*. R. Lal, B.A. Stewart (Eds). Boca Raton, USA: Taylor and Francis Group, 2010. 407 p.
25. *Holthusen D., Pértile P., Reichert J.M., Horn R.* Controlled vertical stress in a modified amplitude sweep test (rheometry) for the determination of soil microstructure stability under transient stresses // Geoderma. 2017. Vol. 295. P. 129–141.
26. *Holthusen D., Pértile P., Reichert J. M., Horn R.* Viscoelasticity and shear resistance at the microscale of naturally structured and homogenized subtropical soils under undefined and defined normal stress conditions // Soil Tillage Research. 2019. Vol. 191. P. 282–293.
27. *Horn R., Holthusen D., Dörner J., Mordhorst A., Fleige H.* Scale-dependent soil strengthening processes – What do we need to know and where to head for a sustainable environment? // Soil Tillage Research. 2019. Vol. 195.
28. *Kock I., Huhn K.* Influence of particle shape on the frictional strength of sediments – A numerical case study // Sedimentary Geology. 2007. Vol. 196.

No. 1–4. P. 217–233.
29. *Lal R., Shukla M.K.* Principles of soil physics. New York, Basel: Marcel Dekker, 2004. 682 p.
30. *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.
31. *Markgraf W., Horn R.* Rheological–stiffness analysis of K^+-treated and $CaCO_3$-rich soils // Journal of Plant Nutrition and Soil Science. 2006. Vol. 169. P. 411–419.
32. *Markgraf W., Horn R.* Scanning Electron Microscopy – Energy Dispersive Scan Analyses and Rheological Investigations of South-Brazilian Soils // Soil Science Society of America Journal. 2007. Vol. 71. No 3. P. 851–859.
33. *Markgraf W., Moreno F., Horn R.* Quantification of Microstructural Changes in Salorthidic Fluvaquents Using Rheological and Particle Charge Techniques // Vadose Zone Journal. 2012. Vol. 11. P. 1–11.
34. *Mezger T.G.* The Rheology Handbook. For users of rotational and oscillatory rheometers.Hanover: Vincentz Network. 2014. 4th edition. 434 p.
35. *Mitchell J.K., Soga K.* Fundamentals of soil behavior. Hoboken: John Wiley & Sons, 2005. 3rd edition. 577 p.
36. *Pértile P., Reichert J.M., Gubiani P.I., Holthusen D., da Costa A.* Rheological parameters as affected by water tension in subtropical soils // Revista Brasileira de Ciencia do Solo. 2016. Vol. 40. P. 2–14.
37. *Pértile P., Holthusen D., Gubiani P.I., Reichert J.M.* Microstructural strength of four subtropical soils evaluated by rheometry: properties, difficulties and opportunities // Scientia Agricola. 2018. Vol. 75. No 2. P. 154–162.
38. *Phogat V.K., Tomar V.S., Dahiya R.* Soil Physical Properties // Soil Science: An Introduction. Indian Society of Soil Science, 2016. First edition. P. 135–171.
39. *Reynolds D., Bowman B.T., Drury C.F., Tan C.S., Lu X.* Indicators of good soil physical quality : density and storage parameters // Geoderma. 2002. Vol. 110. P. 131–146.
40. *Reynolds W.D., Drury C.F., Yang X.M., Tan C.S.* Optimal soil physical quality inferred through structural regression and parameter interactions // Geoderma. 2008. Vol. 146. P. 466–474.
41. *Reynolds W.D., Drury C.F., Tan C.S., Fox C.A., Yang, X.M.* Use of indicators and pore volume–function characteristics to quantify soil physical quality // Geoderma. 2009. Vol. 152. P. 252–263.
42. *Schoenholtz S.H., Miegroet H., van Burger J.A.* A review of chemical and physical properties as indicators of forest soil quality : challenges and opportunities // Forest and Ecology Management. 2000. Vol. 138. P. 335–356.

43. *Shukla M.K., Lal R., Ebinger M.* Determining soil quality indicators by factor analysis // Soil Tillage Research. 2006. Vol. 87. P. 194–204.
44. *Six J., Bossuyt H., Degryze S., Denef K.A.* history of research on the link between (micro) aggregates, soil biota, and soil organic matter dynamics // Soil Tillage Research. 2004. Vol. 79. P. 7–31.
45. *Stoppe N., Horn R.* Microstructural strength of tidal soils – A rheometric approach to develop pedotransfer functions // Journal of Hydrology and Hydromechanics. 2018. Vol. 66. No. 1. P. 87–96.
46. *Terzaghi K., Peck R.B., Nesri G.* Soil Mechanics in Engineering Practice. New York – Chichester – Brisbane – Toronto – Singapore: John Wiley & Sons, 1996. 3rd edition. 417 p.
47. *Ye C., Guo Z., Cai C.,Wang J.,* Deng J. Effect of water content , bulk density , and aggregate size on mechanical characteristics of Aquults soil blocks and aggregates from subtropical China // Journal of Soils and Sediments. 2016. Vol. 17. No. 1. P. 210–219.
48. *Zhang H.Q., Hartge K.H.* Cohesion in unsaturated sandy soils and the influence of organic matter // Soil Technology. 1990. No. 3. P. 311–326.

REFERENCES

1. Bondarev A.G., Fizika i mekhanika pochv v reshenii sovremennykh problem pochvennogo plodorodiya (Soil physics and mechanics for solution modern problems of soil fertility), In: *Pochvovedenie: aspekty, problemy, resheniya* (Soil science: aspects, problems, solutions), Moscow: V.V. Dokuchaev Soil Science Institute Rossel'khozakademii, 2003, pp. 553–563.
2. Bondarev A.G., Kuznetsova I.V., Problema degradatsii fizicheskikh svoistv pochv Rossiii i puti ee resheniya (The problem of degradation of physical properties of soils in Russia and solutions), *Pochvovedenie*, 1999, No. 9. pp. 1126–1131.
3. Bondarev A.G. Kuznetsova I.V., Tikhonravov P.I., Utkaeva V.F., Nauchnye osnovy optimizatsii fizicheskikh uslovii plodorodiya pochv i povyshenie ikh ustoichivosti k degradatsii (Scientific basis for optimizing of physical conditions of soil fertility and increasing their resistance to degradation), In: *Sovremennye problemy pochvovedeniya: Nauchnye trudy Pochvennogo instituta imeni V.V. Dokuchaeva* (Modern problems of soil science: Scientific works of the V.V. Dokuchaev Soil Science Institute), Moscow: V.V. Dokuchaev Soil Science Institute Rossel'khozakademii, 2000, pp. 408–422.
4. Klyueva V.V., *Reologicheskie svoistva pochv i ikh svyaz' s fizicheskimi i khimicheskimi svoistvami na primere dernovo-podzolistoi pochvy i*

chernozema tipichnogo: Dis. ... kand. biol. nauk (Rheological properties of soddy-podzolic soils and typical chernozems and their relationships with physical and chemical properties. Cand. biol. sci.t hesis), Moscow: MGU, 2019, 142 p.

5. Klyueva V.V., Khaydapova D.D., Rheological properties of natural and disturbed structure samples of soddy-podzolic and agro soddy-podzolic soil, *Dokuchaev Soil Bulletin*, 2017, No. 89, pp. 21–35, DOI: 10.19047/0136-1694-2017-89-21-35.

6. Kuznetsova I.V., Skvortsova E.B., Teoreticheskie i metodicheskie osnovy predotvrashcheniya fizicheskoi degradatsii pochv (Theoretical and methodological basis of preventing of physical soil degradation), In: *Nauchnye osnovy predotvrashcheniya degradatsii pochv (zemel') sel'skokhozyaistvennykh ugodii Rossii i formirovaniya sistem vosproizvodstva ikh plodorodiya v adaptivno-landshaftnom zemledelii: Vol. 1. Teoreticheskie i metodicheskie osnovy predotvrashcheniya degradatsii pochv (zemel') sel'skokhozyaistvennykh ugodii. Kollektivnaya monografiya* (Scientific basis of preventing of soil (land) degradation of agricultural lands in Russia and formation of systems for the reproduction of their fertility in adaptive landscape agriculture: Vol. 1. Theoretical and methodological basis of preventing soils (lands) degradation of agricultural land. Collective monograph), Moscow: V.V. Dokuchaev Soil Science Institute Rossel'khozakademii, 2013. pp. 50–133.

7. Sapozhnikov P.M., Degradatsiya fizicheskikh svoistv pochv pri antropogennykh vozdeistviyakh (Degradation of physical properties of soils under anthropogenic influence), *Pochvovedenie*, 1994, No. 11, pp. 60–66.

8. Vorob'ev L.A. (Ed.), *Teoriya i praktika khimicheskogo analiza pochv* (Theory and practice of chemical analysis of soils), Moscow: GEOS, 2006, 400 p.

9. Frid A.S., Kuznetsova I.V., Koroleva I.E., Bondarev A.G., Kogut B.M., Utkaeva V.F., Azovtseva N.A., *Zonal'no-provintsial'nye normativy izmenenii agrokhimicheskikh, fiziko-khimicheskikh i fizicheskikh pokazatelei osnovnykh pakhotnykh pochv evropeiskoi territorii Rossii pri antropogennykh vozdeistviyakh* (Zone standards of changes of agrochemical, physico-chemical and physical indicators of the main arable soils of the European territory of Russia under anthropogenic influences), Moscow: V.V. Dokuchaev Soil Science Institute, 2010, 176 p.

10. 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 oblast) under different land uses), *Pochvovedenie*, 2016, No. 8, pp. 955–963.

11. Khitrov N.B., Ponizovskii A.A., *Rukovodstvo po laboratornym metodam issledovaniya ionno-solevogo sostava neitral'nykh i shchelochnykh mineral'nykh pochv* (A guide to laboratory methods for studying of ion-salt composition of neutral and alkaline mineral soils), Moscow: VASKhNIL, V.V. Dokuchaev Soil Science Institute, 1990, 236 p.
12. Khitrov N.B., Khaidapova D.D., Vyazkouprugoe povedenie vertikovogo solontsa Kamennoi Stepi (Viscoelastic Behavior of Vertic Solonetz in the Kamennaya Steppe), *Pochvovedenie*, 2019, No. 7., pp. 843–858.
13. Kholopov Yu.V., Khaidapova D.D., Lapteva E.M., Reologicheskie svoistva severo-taezhnykh avtomorfnykh i polugidromorfnykh kriometamorficheskikh pochv Evropeiskogo severo-vostoka Rossii (Respublika Komi) (Rheological Properties of Automorphic and Semihydromorphic Cryometamorphic Northern Taiga Soils in Northeastern European Russia (Komi Republic)), *Pochvovedenie*, 2018, No. 4., pp. 439–450.
14. Shein E.V., *Kurs fiziki pochv (Soil Physics)*, Moscow: Izd-vo Mosk. Un-ta, 2005, 432 p.
15. Shein E.V., Milanovskii E.Yu., Khaidapova D.D., Pozdnyakov A.I., Tyugai Z., Pochatkova T.N., Dembovetskii A.V., *Praktikum po fizike tverdoi fazy pochv* (Physics of Solid phase: Study Guide*)*, Moscow: Buki Vedi, 2017, 119 p.
16. Abbireddy C.O.R., Clayton C.R.I., The impact of particle form on the packing and shear behaviour of some granular materials: an experimental study, *Granular Matter*, 2015. Vol. 17, No. 4, pp. 427–438.
17. Armenise E., Redmile-Gordon M., Stellacci A.M., Ciccarese A., Rubino P., Developing a soil quality index to compare soil fitness for agricultural use under different managements in the Mediterranean environment, *Soil Tillage Research*, 2013, Vol. 130, pp. 91–98.
18. Barré P., Hallett P.D., Rheological stabilization of wet soils by model root and fungal exudates depends on clay mineralogy, *European Journal of Soil Science*, 2009, Vol. 60, pp. 525–538.
19. Bronick C.J., Lal R., Soil structure and management: A review, *Geoderma*, 2005, Vol. 124. pp. 3–22.
20. Buchmann C., Bentz J., Schaumann G.E., Intrinsic and model polymer hydrogel–induced soil structural stability of a silty sand soil as affected by soil moisture dynamics, *Soil Tillage Research*, 2015, Vol. 154, pp. 22–33.
21. Bünemann E.K., Bongiorno G., Bai Z., Creamer R.E., Deyn G.D., Goedy R.D., Fleskens L., Geissen V., Kuyper T.W., Mäder P., Pulleman M., Sukkel W., Willem J., Groenigen V., Brussaard L., Soil quality – A critical review, *Soil Biology and Biochemistry*, 2018, Vol. 120, pp. 105–125.
22. Dexter A.R., Soil physical quality. Part I. Theory, effects of soil texture,

density, and organic matter, and effects on root growth, *Geoderma*, 2004, Vol. 120, pp. 201–214.
23. Gliński J., Horabik J., Lipiec J. (Eds), *Encyclopedia of agrophysics*, Dordrecht: Springer, 2011, 1028 p.
24. *Food security and soil quality*, eds. R. Lal and B.A. Stewart. Boca Raton, USA: Taylor and Francis Group, 2010. 407 p.
25. Holthusen D., Pértile P., Reichert J.M., Horn R., Controlled vertical stress in a modified amplitude sweep test (rheometry) for the determination of soil microstructure stability under transient stresses, *Geoderma*, 2017, Vol. 295, pp. 129–141.
26. Holthusen D., Pértile P., Reichert J. M., Horn R., Viscoelasticity and shear resistance at the microscale of naturally structured and homogenized subtropical soils under undefined and defined normal stress conditions, *Soil Tillage Research*, 2019, Vol. 191, pp. 282–293.
27. Horn R., Holthusen D., Dörner J., Mordhorst A., Fleige H., Scale-dependent soil strengthening processes – What do we need to know and where to head for a sustainable environment? *Soil Tillage Research*, 2019, Vol. 195.
28. Kock I., Huhn K., Influence of particle shape on the frictional strength of sediments – A numerical case study, *Sedimentary Geology*, 2007, Vol. 196, No. 1–4, pp. 217–233.
29. Lal R., Shukla M.K, *Principles of soil physics*, New York, Basel: Marcel Dekker, 2004, 682 p.
30. 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.
31. Markgraf W., Horn R., Rheological stiffness analysis of K^+-treated and $CaCO_3$-rich soils, *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2006, Vol. 169, pp. 411–419.
32. Markgraf W., Horn R., Scanning Electron Microscopy – Energy Dispersive Scan Analyses and Rheological Investigations of South-Brazilian Soils, *Soil Science Society of America Journal*, 2007, Vol. 71, No. 3, pp. 851–859.
33. Markgraf W., Moreno F., Horn R., Quantification of Microstructural Changes in Salorthidic Fluvaquents Using Rheological and Particle Charge Techniques, *Vadose Zone Journal*, 2012, Vol. 11, pp. 1–11.
34. Mezger T.G., *The Rheology Handbook. For users of rotational and oscillatory rheometers*, Hanover: Vincentz Network, 2014, 4th edition, 434 p.
35. Mitchell J.K., Soga K., *Fundamentals of soil behavior*, Hoboken: John Wiley & Sons, 2005, 3rd edition, 577 p.
36. Pértile P., Reichert J.M., Gubiani P.I., Holthusen D., da Costa A., Rheological parameters as affected by water tension in subtropical soils,

Revista Brasileira de Ciencia do Solo, 2016, Vol. 40, pp. 2–14.
37. Pértile P., Holthusen D., Gubiani P.I., Reichert J.M., Microstructural strength of four subtropical soils evaluated by rheometry: properties, difficulties and opportunities, *Scientia Agricola*, 2018, Vol. 75, No. 2, pp. 154–162.
38. Phogat V.K., Tomar V.S., Dahiya R., Soil Physical Properties, *Soil Science: An Introduction*, Indian Society of Soil Science, 2016, First edition. pp. 135–171.
39. Reynolds D., Bowman B.T., Drury C.F., Tan C.S., Lu X., Indicators of good soil physical quality : density and storage parameters, *Geoderma*, 2002, Vol. 110, pp. 131–146.
40. Reynolds W.D., Drury C.F., Yang X.M., Tan C.S., Optimal soil physical quality inferred through structural regression and parameter interactions, *Geoderma*, 2008, Vol. 146, pp. 466–474.
41. Reynolds W.D., Drury C.F., Tan C.S., Fox C.A., Yang, X.M., Use of indicators and pore volume-function characteristics to quantify soil physical quality, *Geoderma*, 2009, Vol. 152, pp. 252–263.
42. Schoenholtz S.H., Miegroet H., van Burger J.A., A review of chemical and physical properties as indicators of forest soil quality : challenges and opportunities, *Forest and Ecology Management*, 2000, Vol. 138, pp. 335–356.
43. Shukla M.K., Lal R., Ebinger M., Determining soil quality indicators by factor analysis, *Soil Tillage Research*, 2006, Vol. 87, pp. 194–204.
44. Six J., Bossuyt H., Degryze S., Denef K.A., History of research on the link between (micro) aggregates, soil biota, and soil organic matter dynamics, *Soil Tillage Research*, 2004, Vol. 79, pp. 7–31.
45. Stoppe N., Horn R., Microstructural strength of tidal soils – A rheometric approach to develop pedotransfer functions, *Journal of Hydrology and Hydromechanics*, 2018, Vol. 66, No. 1, pp. 87–96.
46. Terzaghi K., Peck R.B., Nesri G., *Soil Mechanics in Engineering Practice*, New York – Chichester – Brisbane – Toronto – Singapore: John Wiley & Sons, 1996, 3rd edition, 417 p.
47. Ye C., Guo Z., Cai C.,Wang J., Deng J., Effect of water content, bulk density, and aggregate size on mechanical characteristics of Aquults soil blocks and aggregates from subtropical China, *Journal of Soils and Sediments*, 2016, Vol. 17, No. 1, pp. 210–219.
48. Zhang H.Q., Hartge K.H., Cohesion in unsaturated sandy soils and the influence of organic matter, *Soil Technology*, 1990, No. 3, pp. 311–326.

УДК 631.4

DOI: 10.19047/0136-1694-2020-103-149-167

Ссылки для цитирования:
Позднякова А.Д., Поздняков Л.А. Электрофизические и геоинформационные методы картографирования биологических свойств торфоземов // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2020. Вып. 103. С. 149-167. DOI: 10.19047/0136-1694-2020-103-149-167

Cite this article as:
Pozdnyakova A.D., Pozdnyakov L.A., Electrophysical and geoinformational methods of mapping the biological properties of peats, Dokuchaev Soil Bulletin, 2020, V. 103, pp. 149-167, DOI: 10.19047/0136-1694-2020-103-149-167

Электрофизические и геоинформационные методы картографирования биологических свойств торфоземов

© 2020 г. А. Д. Позднякова[1*], Л. А. Поздняков [1,2]**

[1]ФИЦ "Почвенный институт им. В.В. Докучаева", Россия, 119017, Москва, Пыжевский пер, 7, стр. 2,
[*]https://orcid.org/0000-0002-7277-8685, e-mail: antdanpozd@list.ru.

[2]МГУ им. М.В. Ломоносова, Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, 1,
[**]https://orcid.org/0000-0002-0525-5841, e-mail: apl-223@mail.ru.

Поступила в редакцию 03.06.2020, *после доработки* 12.08.2020, *принята к публикации* 10.09.2020

Резюме: Показано, что использование электрофизических методов и ГИС-технологий позволяет выявить структуру почвенного покрова и пространственное распределение отдельных биологических показателей, в частности интенсивности образования парниковых газов, в мелиорированных торфяных почвах (торфоземах), расположенных в сложных ландшафтно-гидрологических условиях долины реки Яхрома в Московской области. Таким образом, получен опыт интеграции на основе ГИС-технологий и геофизики различных аспектов строения и функционирования почвы, что генерирует легко читаемое "изображение" почвы в данном месте и в определенное время. Используемый подход основан на идее, что электрическое сопротивление почв, связанное с

плотностью подвижных зарядов (катионов и анионов почвенного поглощающего комплекса и раствора), формируется под влиянием почвообразующих процессов и является интегральным показателем широкого спектра свойств почвы. Принимая во внимание, что эволюция и деградация торфяников после их осушения является в первую очередь микробиологическим процессом, мы уделили особое внимание исследованиям в этой области. В рамках мониторинговых наблюдений на опытных стационарах Яхромской поймы проведено картирование микробного образования CO_2, N_2O и CH_4 в торфяных почвах. С одной стороны, это позволяет оценить текущую интенсивность разложения органического вещества и потери азота и углерода торфяными почвами различного ботанического состава, условий и методов мелиорации, а с другой – определить вклад этих почв в формирование парникового эффекта. Установлено, что электрическое сопротивление почвы, базальное, субстрат-индуцированное дыхание и денитрификационная активность (одна из форм анаэробного дыхания) зависят от одного и того же комплекса свойств торфозема и коррелируют друг с другом на исследуемой территории. Высокая скорость и производительность электрофизических методов позволяют использовать их для первичной диагностики почвы, выбора ключевых точек для дальнейших исследований, детализации картографических контуров и уточнения расчетов потоков парниковых газов с больших площадей.

Ключевые слова: электрическое сопротивление почв, цифровое картографирование почв, базальное дыхание, денитрификация, субстрат-индуцированное дыхание, парниковые газы.

Electrophysical and geoinformational methods of mapping the biological properties of peats

A. D. Pozdnyakova[1*], L. A. Pozdnyakov[1,2]**

[1]Federal Research Centre "V.V. Dokuchaev Soil Science Institute",
7 Bld. 2 Pyzhevskiy per., Moscow 119017, Russian Federation,
[*]https://orcid.org/0000-0002-7277-8685, e-mail: antdanpozd@list.ru.

[2]Lomonosov Moscow State University,
1 Leninskie Gori, Moscow 119234, Russian Federation,
[**]https://orcid.org/0000-0002-0525-5841, e-mail: apl-223@mail.ru.

Received 03.06.2020, *Revised* 12.08.2020, *Accepted* 10.09.2020

Abstract: It is shown that the use of electrophysical methods and GIS technologies allows revealing soil coverage structure and spatial distribution

of individual biological indicators, in particular, greenhouse gases production, in drained histosols (eutrophic peat soils) located in complex landscape and hydrological conditions of the Yakhroma Valley in the Moscow Region. The combination of GIS technologies and soil electrophysics made it possible to bring together the various aspects of the soil composition and functioning. Consequently, it generates easily readable "image" of soil in a given place and at certain times. The used approach is based on the idea that the electrical resistance of soils, associated with the density of mobile charges (cations and anions of soil absorbing complex and solution), is formed under the influence of soil-forming processes and it is an integral indicator of a wide range of soil properties. Taking into account that the evolution and degradation of peatlands after their drainage is a microbiological process primarily, we paid special attention to the research in this area. The experience has been obtained in the mapping of the microbial formation of CO_2, N_2O and CH_4 in peat soils. On the one hand, it allows estimating the current intensity of organic matter decomposition and losses of nitrogen and carbon by peat soils of different botanical composition, terms and methods of meliorations, and on the other hand, to determine the contribution of these soils to the greenhouse effect. It was established that the electrical resistance of the soil, basal, substrate-induced respiration and denitrification activity (specific form of anaerobic respiration) depend on the same set of soil properties and correlate with each other within the studied area. The high speed and productivity of electrophysical methods allow them to be used for primary soil diagnostics, selection of key points for further research, detailing the cartographic contours and refining the calculations of greenhouse gas fluxes from large areas.

Keywords: soil electrical resistance, digital mapping of soil, basal respiration, substrate-induced respiration, denitrification, greenhouse gases.

ВВЕДЕНИЕ

Величина удельного электрического сопротивления почвы как природного тела, имеющего в основном ионную проводимость, зависит от объемной плотности подвижных электрических зарядов, а потому оказывается связана с большим количеством процессов и свойств, определяющих их распределение в почвенном профиле. Из таких свойств, прежде всего, нужно отметить механический и минералогический состав, содержание органического вещества, концентрацию легкорастворимых солей, влажность и температуру. К перераспределяющим подвижные заряды процессам относятся подзолообразование, лессиваж, гумусо- и торфонакопление, засоление и др. (Поздняков и др., 1996).

Многочисленные попытки выявить доминирующий фактор, который определял бы величину электрического сопротивления отдельных почв и который мог бы напрямую рассчитываться по сопротивлению, привели к созданию множества разнообразных математических моделей, каждая из которых, однако, характерна для крайне специфических почвенных условий и обычно требует дополнительной настройки при использовании на другом объекте. Результатом этого стало понимание, что использовать электрическое сопротивление следует не для опосредованного определения тех или иных параметров почвы, а прежде всего – для выявления внутренне однородных почвенных объектов, которые впоследствии могут быть подробно исследованы традиционными методами почвоведения. В этом случае множественность факторов, определяющих электрическое сопротивление, становится не проблемой для интерпретации результатов, а достоинством, определяющим чувствительность метода: изменение любого из них приведет к изменению сопротивления и обнаружению неоднородности.

Для эффективного применения электрофизическая съемка должна предшествовать другим исследованиям. Поскольку удельное электрическое сопротивление почв относится к числу наиболее быстро измеряемых в полевых условиях показателей, то шаг сетки при этом может быть сокращен вплоть до минимума, определяемого физическими габаритами измерительной установки. Для наглядного представления распределения электрического сопротивления в пространстве полезно использовать программы геоинформационных систем, которые в последнее время широко применяются в почвенных исследованиях (Апарин, 2012; Бышов, 2013; Савин и др., 2019; 2020). С опорой на полученную цифровую карту производится отбор образцов и детальное изучение почв в характерных различающихся точках. Предварительное электрофизическое обследование позволяет, с одной стороны, сократить затраты времени и ресурсов, поскольку исключает отбор и анализ многочисленных образцов из однородных контуров, что неизбежно влечет за собой использование равномерной сетки, а с другой – позволяет улучшить точность картографирования, ука-

зывая на участки с высокой неоднородностью, которые требуют более тщательного анализа (Corwin, 2008).

Картографирование распределения электрического сопротивления по площади легко поддается автоматизации. Аппаратура для этих целей получила распространение на западных рынках в 1990-е годы с появлением доступных для гражданского использования систем спутникового позиционирования (Corwin, 2008). Обычно она выполняется в виде буксируемой тележки с вращающимися электродами дисковидной формы (Panissod, 1997; Lund, 1999; Lueck, 2013), и ее использование ограничивается пахотными землями. Вместе с этим используется также оборудование для бесконтактного определения электрического сопротивления посредством электромагнитной индукции (Doolittle, 2014) – оно существует как в буксируемом, так и в переносном варианте, однако для применения требует калибровки и характеризуется фиксированной глубиной (набором глубин), на которую может проводиться обследование почвы.

Портативное оборудование, используемое в данной работе, отличается универсальностью (Позднякова, 2018), благодаря чему лучше подходит для разнообразных исследовательских целей, но также может применяться и для решения производственных задач (Medeiros, 2016). Хотя в агрономической и почвенной практике электрофизическими методами обследуется обычно только верхний (пахотный, корнеобитаемый) слой, они позволяют получать информацию о целом почвенном профиле и верхних слоях материнских пород, вести послойное обследование, а также проводить детальную 3D визуализацию их структуры (Loke, 2013).

Картирование удельного электрического сопротивления внедряется в практику точного земледелия многих стран, где для разных почв и сельскохозяйственных культур этот метод используется для выделения территорий с одинаковой продуктивностью, либо требующих схожих способов обработки (Lund, 1999; Anderson-Cook, 2002; Corwin, 2003, 2008; Lueck, 2013; Doolittle, 2014; Stadler, 2015; Medeiros, 2016; Singh, 2016). Те же принципы могут быть применены для уточнения границ почвенных контуров при создании классических почвенных карт (Doolittle, 2014), поскольку направленность и степень развития процессов почвообра-

зования могут быть разделены по соответствующим им значениям электрического сопротивления (Поздняков, 1996).

Карты электрического сопротивления в зависимости от целей и методов построения могут быть источником информации как по варьированию конститутивных свойств почв (например, гранулометрического состава), так и по распределению текущих значений вариативных свойств, таких как влажность. В последнем случае целесообразно повторять процедуру картографирования многократно в различные сезоны и при разных погодных условиях. При этом отмечается воспроизведение на картах одних и тех же пространственных структур, различающихся абсолютными значениями сопротивления (Lund, 1999; Lueck, 2013; Doolittle, 2014; Stadler, 2015; Medeiros, 2016). Поэтому влияние колебаний температуры и влажности на информативность методов электрического сопротивления почв не следует переоценивать.

В конечном счете было показано, что электрическое сопротивление почв связано с урожайностью и другими показателями развития растений в той степени, в которой лимитирующим фактором для них являются свойства почвы (Lund, 1999; Anderson-Cook, 2002; Corwin, 2003, 2008; Stadler, 2015; Singh, 2016). Можно полагать, что продуктивность почвенных микробных сообществ, также чувствительных к особенностям своей среды обитания, будет проявлять опосредованную связь с электрическим сопротивлением. При изучении структуры почвенного покрова сельскохозяйственных угодий микроорганизмам обычно не уделялось первостепенное внимание, и они рассматривались как один из факторов развития культурных растений. Тем не менее в отдельных работах было показано, что состав микробного сообщества, его биомасса и физиологическая активность коррелирует со структурой почвы, гранулометрическим составом, содержанием азота, органического углерода и т. д. (Gelsomino, 1999; Groffman, 1996). Электрическое сопротивление почвы также оказывалось среди величин, связанных с отдельными биологическими показателями (Johnson, 2003; Kim et al., 2016).

Так, электрофизическими методами можно оценить пространственное варьирование скоростей образования парниковых газов в пахотном горизонте антропогенно-преобразованных тор-

фяных и дерново-подзолистых почв (Поздняков, 2008; Поздняков, 2015). Учет распределения удельного электрического сопротивления позволит не только выявить полный диапазон варьирования потоков парниковых газов, но также уточнить пространственную структуру их изменений и оценить площади, на которые приходятся те или иные их значения. Поскольку для расчетов эмиссии парниковых газов с обширной территории требуется информация о распределении конкретных свойств почвенного покрова, влияющих на величину потока, то картирование связанного с ними удельного электрического сопротивления позволит решить эту задачу точнее, чем использование традиционных почвенных карт, аналогично тому, как это отмечается для сельскохозяйственной практики (Савин, 2020).

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Исследования проводили на одном из старейших объектов мелиорации в России – Яхромской долине Московской области. Река Яхрома является притоком реки Сестры и принадлежит бассейну Волги. Ниже Дмитрова она протекает по обширной заторфованной котловине, которая традиционно называется “Яхромской поймой”, хотя данное название не вполне корректно, и ее происхождение не связано с деятельностью реки.

Освоение Яхромской поймы начиналось с участка “Ближний” в 1906–1914 гг. История этого участка хорошо документирована: в архивах ВНИИМЗ имеются ботанические, агрохимические и гидрологические данные практически с начального этапа освоения долины. На их основе можно проследить ряд общих закономерностей эволюции торфяников при освоении, определить интенсивность деградации и эволюции, прогнозировать дальнейшее развитие схожих низинных торфяников. В 1960-е годы вся территория поймы претерпела кардинальные изменения – было произведено осушение и вовлечение земельных угодий в сельскохозяйственный оборот. Естественная луговая и болотная растительность постепенно сменилась культурной и сорной, произошли глубокие изменения водного режима и различных свойств торфяных и других почв долины. Будучи осушенным на 50 лет раньше остальной территории, участок “Ближний” подвергся более глубо-

кой трансформации почвенного покрова, что представляет интерес для прогнозирования состояния торфоземов остальных частей долины.

Антропогенное воздействие различной степени и направленности оказалось наложено на исходную высокую неоднородность почвенного покрова долины. Находясь в сложных ландшафтных, гидрологических и геохимических условиях, почвы здесь сформированы на торфах различного ботанического состава (осокового, гипнового, древесного, тростникового и смешанных вариантов), переслаивающихся озерными, аллювиальными и делювиальными отложениями. Все это требует пристального внимания к неоднородности и структуре почвенного покрова Яхромской поймы и подобных ей объектов.

Для изучения этой структуры были использованы программы геоинформационных систем (ГИС). На предварительном этапе исследований методы ГИС позволили перевести старые карты в цифровой формат, обобщить и наглядно визуализировать архивный табличный материал, а также найти географические координаты точек обследования в предыдущие годы. В дальнейшем для мониторинга изменения почвенных свойств отбирались и исследовались образцы именно в этих точках (рис. 1). Для анализа отбирались смешанные образцы из пахотного горизонта, время отбора – конец июня.

Величины продукции парниковых газов определялись газохроматографическими методами в микрокосмах (Степанов, Лысак, 2002). Для этого из свежих образцов почвы отбирали навески по 2 г в пенициллиновые флаконы объемом 15 мл.

Во флаконах измерялись величины базального (БД), а также субстрат-индуцированного дыхания (СИД), в ходе чего количество вносимой глюкозы составляло 2.5 мг/г почв. Потенциальная способность к образованию метана оценивалась после внесения таких же количеств глюкозы и вытеснения воздуха во флаконах аргоном для создания анаэробных условий. Для определения активности образования N_2O денитрифицирующими микроорганизмами в почву добавляли раствор KNO_3 (0.3 мг/г) и глюкозы (2.5 мг/г), воздух во флаконах также замещался аргоном, и в него шприцом вносили 1 мл ацетилена. Ацетилен блокирует действие

фермента редуктазы закиси азота и останавливает поглощение этого газа. Инкубация образцов производилась в термостате при 28 °С в течение суток, за исключением СИД, интенсивность которого оценивалась в течение 2 часов.

Рис. 1. Расположение на участке “Ближний” точек отбора образцов и измерения удельного электрического сопротивления.
Fig. 1. Location of points for sampling and measuring of specific electric resistance at the “Blizhniy” experimental site.

Измерение электрического сопротивления проводилось прибором LandMapper ERM-02 с измерительной четырехэлек-

тродной установкой для профилирования (рис. 2), где электроды AB являются питающими, а MN приемными (Поздняков и др., 1996). Прибор автоматически проводит серию измерений, выдавая усредненные значения удельного электрического сопротивления почвы, рассчитанные через геометрический коэффициент K, зависящий от расстояния между электродами, которое определяет конфигурацию формирующегося электрического поля.

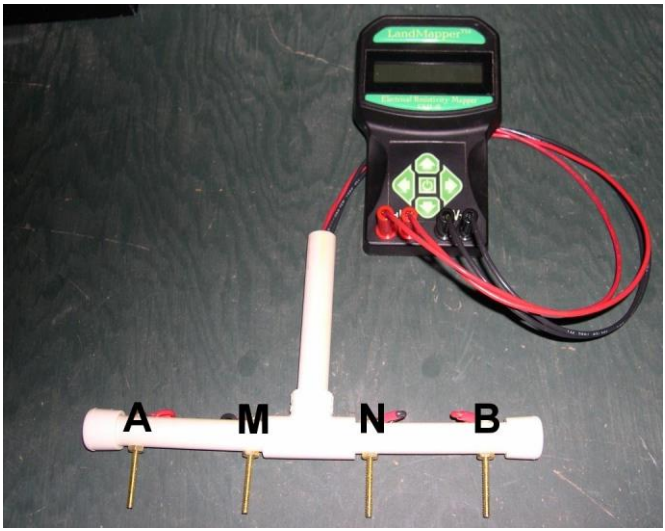

Рис. 2. Прибор LandMapper и установка AMNB для измерений удельного электрического сопротивления почв в полевых условиях.
Fig. 2. LandMapper device and AMNB installation for measuring of specific electric resistance of soils in the field.

Координаты точек обследования на местности определяли навигационным прибором GPS-72 фирмы Garmin, для последующей обработки в программах ГИС. В данной работе применялось программное обеспечение Surfer и MapInfo.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Согласно архивным данным обследований участка “Ближний”, распределение содержания $C_{орг}$, ЕКО, зольности, гидролити-

ческой кислотности и ряда других параметров соответствует делению поймы на прирусловый, притеррасный и центральный участки. В целом оно связано со всем комплексом условий торфо- и почвообразования в долине, обусловленным воздействием реки, выклинивающихся у склонов долины грунтовых вод, растительностью и ботаническим составом торфа. Так, вдоль русла Яхромы в пределах долины протянулась собственно пойма, причем аллювиальные отложения здесь залегают поверх торфа и чередуются с торфяными прослойками. В настоящее время слоистость данных почв разрушена вспашкой, и здесь сформированы торфоземы агроминеральные, имеющие в пахотном горизонте относительно низкое содержание $C_{орг}$, низкую ЕКО, но наивысшую кислотность.

Обширные пространства центральной части долины не были подвержены воздействию аллювиальных процессов. Здесь сформированы мощные залежи торфа древесного ботанического состава, содержащие максимальные запасы органического вещества, чем также обусловлена высокая ЕКО. Глубже иногда залегают торфа иного ботанического состава, что сказывается на гидрологии залежи. Сформировавшиеся здесь торфоземы являются наиболее плодородными почвами всей Яхромской поймы. Вдоль края долины на поверхность выходят жесткие минерализованные грунтовые воды, являвшиеся основной причиной ее заболачивания в прошлом. Торф здесь имеет осоково-гипновый состав, переслаивается делювием, но в целом имеет существенно более низкую зольность, чем в прирусловых частях. За счет грунтовых вод в почвенном профиле в обилии встречаются новообразования железа и карбонатов, а pH возрастает до нейтральных значений.

Полученные нами данные показывают, что распределение величин БД и СИД также соответствуют вышеуказанному делению. В целом БД в пахотном горизонте торфяных почв участка “Ближний” Яхромской поймы менялось довольно значительно: от 0.6 до 3.4 мкмоль $CO_2 \cdot г^{-1} \cdot сут^{-1}$. Наибольшие значения достигались в центральной части поймы, где почва все еще богата слаборазложенной органикой, а при приближении к руслу реки и притеррасной части поймы, где торф переслаивается минеральными наносами, рассматриваемый показатель снижался в 5 и более раз. Статистический анализ показал, что именно содержание минеральных

веществ (зольность), является тем фактором, который оказывает наибольшее влияние на величины образования CO_2.

СИД, то есть образование CO_2 при устранении ограничений по имеющимся в почве элементам питания и зависящее только от накопленной биомассы аэробных гетеротрофных микроорганизмов, проявляет те же закономерности, хотя изменяется еще более резко: от 2.4 до 19.5 мкмоль$CO_2 \cdot г^{-1} \cdot сут^{-1}$.

Аналогичным закономерностям подчинялась и активность денитрификации, которая достигала максимальных значений в центральной части поймы и снижалась при движении к террасе и руслу почти в 3 раза. Иным оказалось распределение метаногенеза, приуроченного в основном к переувлажненным притеррасным участкам.

Измеренное нами удельное электрическое сопротивление пахотного горизонта изменялось в полном соответствии с делением торфоземов по положению в прирусловой, центральной и притеррасной частях поймы. Наибольшие величины достигались в центральной пойме, где зольность минимальна, а почвенный раствор не так минерализован, то есть несет в себе мало подвижных ионогенных соединений (электрических зарядов) (рис. 3А).

Распределения величин дыхания и электрического сопротивления проявляют в почвенном покрове исследованного участка сходные паттерны, поскольку зависят от одного набора физико-химических свойств почвы, главным образом от содержания органического вещества и зольности. Прежде всего, это касается базального дыхания. Коэффициент детерминации R^2 для зависимости БД от удельного электрического сопротивления составляет 0.63, тогда как для СИД – 0.31. Важно, что сопротивление теснее связано со значениями БД, отражающего реальную активность микроорганизмов, чем с измеряемым в идеальных условиях СИД.

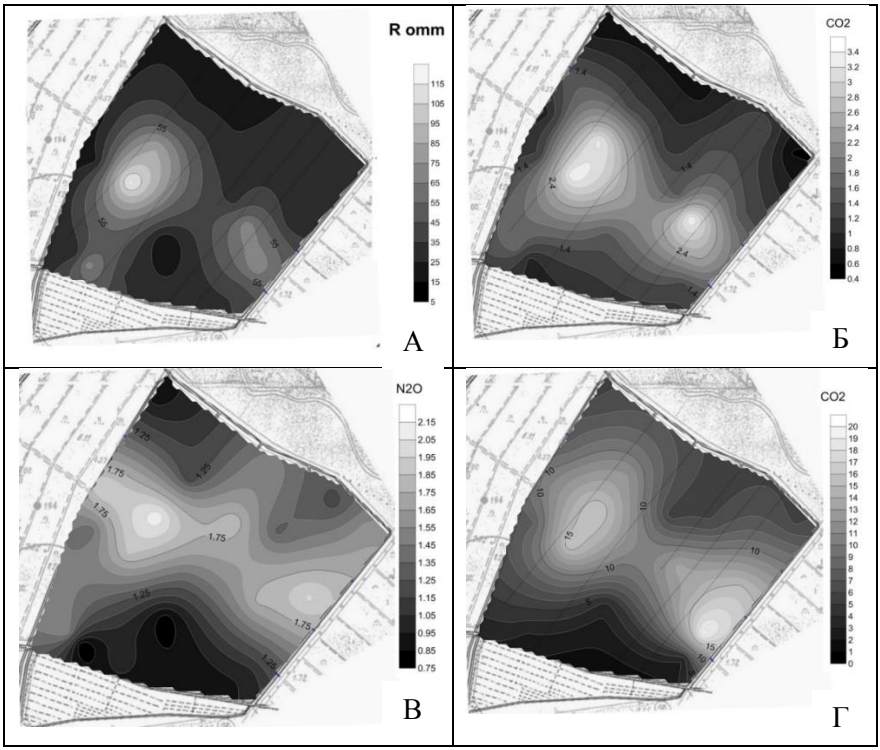

Рис. 3. Пространственное распределение электрических и микробиологических параметров пахотного горизонта участка "Ближний" (сверху – прирусловая часть участка, снизу – притеррасная). А – электрическое сопротивление (Ом·м); Б – базальное дыхание, В – денитрификация; Г – субстрат-индуцированное дыхание (мкмоль газа/(г почвы*сут)).

Fig. 3. Spatial distribution of electrical and microbiological parameters in the upper horizon at the "Blizhniy" experimental site (top of the map is located near the river, bottom – near the terrace). A – specific electric resistance; B – basal respiration; C – denitrification; D – substrate-induced respiration (μmol of corresponding gas/(g soil*day)).

Корреляция с денитрификацией слабее, что особенно заметно в прирусловой части, где ведется сельскохозяйственное производство, за счет чего R^2 опускается до 0.07. Здесь в 1-ом – 3-ем кварталах мы видим приуроченность локальных минимумов де-

нитрификации к максимальному уровню дыхательной активности (и наоборот), что может быть вызвано особенностями условий увлажнения, аэрации и азотного питания при проведении агротехнологических мероприятий. На всей остальной территории связь уровня денитрификации и электрического сопротивления прослеживается визуально (рис. 3).

Хуже всего ($R^2 = 0.02$) проявляется связь для активности метаногенов – узкоспециализированной группы строго анаэробных микроорганизмов. Ее максимумы приходятся на области с низким электрическим сопротивлением почвы, однако, в случае, если низкое сопротивление вызвано не переувлажнением, а, например, увеличением зольности, как в прирусловой части поймы, то фиксируется минимальный уровень образования метана. Важно отметить, что поскольку области с низким электрическим сопротивлением отделены друг от друга в пространстве, они были бы обнаружены и выделены при предварительной электроразведке, а последующее измерение активности метаногенеза в каждой из них все равно показало бы существование между ними отличий.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Удельное электрическое сопротивление, таким образом, может быстро и эффективно использоваться для характеристики структуры почвенного покрова, позволяя объективно подойти к выбору точек для дальнейших точных измерений и впоследствии корректно производить расчеты потоков парниковых газов с обширных территорий. Прежде всего это касается процессов микробного образования CO_2 и N_2O, а в определенной степени – и CH_4.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Апарин Б.Ф., Абакумов Е.В., Касаткина Г.А., Матинян Н.Н., Русаков А.В., Рюмин А.Г., Сухачева Е.Ю.* Почвенное картирование. СПб: Изд-во С.-Петерб. ун-та, 2012. 128 с.

2. *Бышов Н.В., Бышов Д.Н., Бачурин А.Н., Олейник Д.О., Якунин Ю.В.* Геоинформационные системы в сельском хозяйстве. Рязань: ФГБОУ ВПО РГАТУ, 2013. 169 с.

3. *Позднякова А.Д., Поздняков Л.А., Анциферова О.Н.* Универсальный прибор для измерений электрических свойств почв // Бюллетень науки и практики. 2018. Т. 4. № 4. С. 232–245. DOI: 10.5281/zenodo.1218483.
4. *Поздняков А.И., Позднякова Л.А., Позднякова А.Д.* Стационарные электрические поля в почвах. М.: КМК Scientific Press LTD, 1996. 358 с. URL: http://www.rfbr.ru/rffi/ru/books/o_37706.
5. *Поздняков А.И., Елисеев П.И., Поздняков Л.А.* Электрофизический подход к оценке некоторых элементов окультуренности и плодородия легких почв гумидной зоны // Почвоведение. 2015. № 7. С. 832–842.
6. *Поздняков Л.А.* Оценка биологической активности торфяных почв по удельному электрическому сопротивлению // Почвоведение. 2008. № 10. С. 1217–1223.
7. *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.
8. *Савин И.Ю., Жоголев А.В., Прудникова Е.Ю.* Современные тренды и проблемы почвенной картографии // Почвоведение. 2019. № 5. С. 517–528.
9. *Степанов А.Л., Лысак Л.В.* Методы газовой хроматографии в почвенной микробиологии. М.: МАКС Пресс, 2002. 88 с.
10. *Anderson-Cook C.M., Alley M.M., Roygard J.K.F., Khosla R., Noble R.B., Doolittle J.A.* Differentiating Soil Types Using Electromagnetic Conductivity and Crop Yield Maps // Soil Science Society of America Journal. 2002. No. 66 (5). P. 1562−1570. DOI: 10.2136/sssaj2002.1562.
11. *Corwin D., Lesch S., Shouse P.J., Soppe R., Ayars J.E.* Identifying Soil Properties that Influence Cotton Yield Using Soil Sampling Directed by Apparent Soil Electrical Conductivity // Agron. J. 2003. Vol. 95. DOI: 10.2134/agronj2003.03520.
12. *Corwin D.L.* Past, present, and future trends of soil electrical conductivity measurement using geophysical methods / *Allred B., Daniels J., Ehsani M.* (Eds.). Handbook of Agricultural Geophysics. 2008. Boca Raton: CRC Press. DOI: 10.1201/9781420019353.
13. *Doolittle J.A., Brevik E.C.* The use of electromagnetic induction techniques in soils studies // Geoderma. 2014. Vol. 223−225. P. 33–45. DOI: 10.1016/j.geoderma.2014.01.027.
14. *Gelsomino A., Keijzer-Wolters A.C., Cacco G., van Elsas J.D.* Assessment of bacterial community structure in soil by polymerase chain reaction and denaturing gradient gel electrophoresis // Journal of microbiological methods. 1999. No. 38 (1−2). P. 1−15.

15. *Groffman P.M., Eagan P., Sullivan W.M., Lemunyon J.L.* Grass species and soil type effects on microbial biomass and activity // Plant Soil. 1996. No. 183. P. 61−67.
16. *Johnson M.J., Lee K.Y., Scow K.M.* DNA fingerprinting reveals links among agricultural crops, soil properties, and the composition of soil microbial communities // Geoderma. 2003. Vol. 114. P. 279−303.
17. *Kim J., Roh A.-S., Choi S.-Ch., Kim E.-J., Choi M.-T., Ahn B.-K., Kim S.-K., Lee Y.-H., Joa J.-H., Kang S.-S., Lee S., Ahn J.-H., Song J., Weon H.-Y.* Soil pH and electrical conductivity are key edaphic factors shaping bacterial communities of greenhouse soils in Korea // Journal of Microbiology. 2016. Vol. 54. P. 838−845. DOI: 10.1007/s12275-016-6526-5.
18. *Loke M.H., Chambers J.E., Rucker D.F., Kuras O., Wilkinson P.B.* Recent developments in the direct-current geoelectrical imaging method // Journal of Applied Geophysics. 2013. Vol. 95. P. 135–156. DOI: 10.1016/j.jappgeo.2013.02.017.
19. *Lueck E., Ruehlmann J.* Resistivity mapping with GEOPHILUS ELECTRICUS − Information about lateral and vertical soil heterogeneity // Geoderma. 2013. Vol. 199. P. 2–11. DOI: 10.1016/j.geoderma.2012.11.009.
20. *Lund E.D., Christy C.D., Drummond P.E.* Practical applications of soil electrical conductivity mapping. In: *Stafford J.V.* (Ed.) Precision Agriculture. Proceedings of the Second European Conference on Precision Agriculture. Sheffield: Academic Press Ltd, 1999. P. 771–779.
21. *Medeiros W., Queiroz D., Valente D., Pinto F., Melo C.* The temporal stability of the variability in apparent soil electrical conductivity // Bioscience Journal. 2016. Vol. 32. P. 150–159. DOI: 10.14393/BJ-v32n1a2016-26287.
22. *Panissod C., Dabas M., Jolivet A., Tabbagh A.* A novel mobile multipole system (MUCEP) for shallow (0–3 m) geoelectrical investigation: the "Vol-de-canards" array // Geophysical Prospecting. 1997. Vol. 45 (6). P. 983–1002. DOI: 10.1046/j.1365-2478.1997.650303.x.
23. *Singh G., Williard K.W.J., Schoonover J.E.* Spatial Relation of Apparent Soil Electrical Conductivity with Crop Yields and Soil Properties at Different Topographic Positions in a Small Agricultural Watershed // Agronomy. 2016. Vol. 6 (4). P. 57. DOI: 10.3390/agronomy6040057.
24. *Stadler A., Rudolph S., Kupisch M., Langensiepen M., van der Kruk J., Ewert F.* Quantifying the effects of soil variability on crop growth using apparent soil electrical conductivity measurements // European Journal of Agronomy. 2015. Vol. 64. P. 8–20. DOI: 10.1016/j.eja.2014.12.004.

REFERENCES

1. Aparin B.F., Abakumov E.V., Kasatkina G.A., Matinyan N.N., Rusakov A.V., Ryumin A.G., Sukhacheva E.Yu., *Pochvennoe kartirovanie* (Soil mapping), Saint-Petersburg: Izd-vo S.-Peterb. un-ta, 2012, 128 p.
2. Byshov N.V., Byshov D.N., Bachurin A.N., Oleinik D.O., Yakunin Yu.V., *Geoinformatsionnye sistemy v sel'skom khozyaistve* (Geoinformation systems in agriculture), Ryazan': FGBOU VPO RGATU, 2013, 169 p.
3. Pozdnyakova A.D., Pozdnyakov L.A., Antsiferova O.N., Universal'nyi pribor dlya izmerenii elektricheskikh svoistv pochv (Universal device for measuring electrical properties of soils), *Byulleten' nauki i praktiki*, 2018, Vol. 4. No. 4, pp. 232–245.
4. Pozdnyakov A.I., Pozdnyakova L.A., Pozdnyakova A.D., *Statsionarnye elektricheskie polya v pochvakh* (Stationary electric fields in soils Stationary electric fields in soils), Moscow: KMK Scientific Press LTD, 1996, 358 p. URL: http://www.rfbr.ru/rffi/ru/books/o_37706.
5. Pozdnyakov A.I., Eliseev P.I., Pozdnyakov L.A., Elektrofizicheskii podkhod k otsenke nekotorykh elementov okul'turennosti i plodorodiya legkikh pochv gumidnoi zony (The electrophysical approach to assessing some elements of cultivation and fertility of light soils of the humid zone), *Pochvovedenie*, 2015, No. 7, pp. 832–842.
6. Pozdnyakov L.A., Otsenka biologicheskoi aktivnosti torfyanykh pochv po udel'nomu elektricheskomu soprotivleniyu (Assessment of the biological activity of peat soils by electrical resistivity), *Pochvovedenie*, 2008, No.10, pp. 1217–1223.
7. Savin I.Yu., Spatial aspects of applied Soil Science, *Dokuchaev Soil Bulletin*, 2020, Vol. 101, pp. 5–18, DOI: 10.19047/0136-1694-2020-101-5-18.
8. 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.
9. Stepanov A.L., Lysak L.V., *Metody gazovoi khromatografii v pochvennoi mikrobiologii* (Gas chromatography methods in soil microbiology), Moscow: MAKS Press, 2002, 88 p.
10. Anderson-Cook C.M., Alley M.M., Roygard J.K.F., Khosla R., Noble R.B., Doolittle J.A. Differentiating Soil Types Using Electromagnetic Conductivity and Crop Yield Maps, *Soil Science Society of America Journal*, 2002, Vol. 66 (5), pp. 1562–1570, DOI: 10.2136/sssaj2002.1562.
11. Corwin D., Lesch S., Shouse P.J., Soppe R., Ayars J.E., Identifying Soil Properties that Influence Cotton Yield Using Soil Sampling Directed by Apparent Soil Electrical Conductivity, *Agronomy J.*, 2003, Vol. 95 (2), DOI: 10.2134/agronj2003.03520.

12. Corwin D.L., Past, present, and future trends of soil electrical conductivity measurement using geophysical methods, *Handbook of Agricultural Geophysics*, Boca Raton: CRC Press, 2008, pp. 17–36. DOI: 10.1201/9781420019353.
13. Doolittle J.A., Brevik E.C., The use of electromagnetic induction techniques in soils studies, *Geoderma*, 2014, Vol. 223–225, pp. 33–45, DOI: 10.1016/j.geoderma.2014.01.027.
14. Gelsomino A., Keijzer-Wolters A.C., Cacco G., van Elsas J.D., Assessment of bacterial community structure in soil by polymerase chain reaction and denaturing gradient gel electrophoresis, *Journal of microbiological methods*, 1999, No. 38 (1–2), pp. 1–15.
15. Groffman P.M., Eagan P., Sullivan W.M., Lemunyon J.L., Grass species and soil type effects on microbial biomass and activity, *Plant Soil*, 1996, No. 183, pp. 61–67.
16. Johnson M.J., Lee K.Y., Scow K.M., DNA fingerprinting reveals links among agricultural crops, soil properties, and the composition of soil microbial communities, *Geoderma*, 2003, Vol. 114, pp. 279–303.
17. Kim J., Roh A.-S., Choi S.-Ch., Kim E.-J., Choi M.-T., Ahn B.-K., Kim S.-K., Lee Y.-H., Joa J.-H., Kang S.-S., Lee S., Ahn J.-H., Song J., Weon H.-Y. Soil pH and electrical conductivity are key edaphic factors shaping bacterial communities of greenhouse soils in Korea, *Journal of Microbiology*, 2016, Vol. 54, pp. 838–845. DOI: 10.1007/s12275-016-6526-5.
18. Loke M.H., Chambers J.E., Rucker D.F., Kuras O., Wilkinson P.B., Recent developments in the direct-current geoelectrical imaging method, *Journal of Applied Geophysics*, 2013, Vol. 95, pp. 135–156. DOI: 10.1016/j.jappgeo.2013.02.017.
19. Lueck E., Ruehlmann J., Resistivity mapping with GEOPHILUS ELECTRICUS – Information about lateral and vertical soil heterogeneity, *Geoderma*, 2013, Vol. 199, pp. 2–11. DOI: 10.1016/j.geoderma.2012.11.009.
20. Lund E.D., Christy C.D., Drummond P.E., Practical applications of soil electrical conductivity mapping, *Precision Agriculture. Proceedings of the Second European Conference on Precision Agriculture*. Sheffield: Sheffield Academic Press Ltd, 1999, pp. 771–779.
21. Medeiros W., Queiroz D., Valente D., Pinto F., Melo C. The temporal stability of the variability in apparent soil electrical conductivity, *Bioscience Journal*, 2016, Vol. 32, pp. 150–159, DOI: 10.14393/BJ-v32n1a2016-26287.
22. Panissod C., Dabas M., Jolivet A., Tabbagh A., A novel mobile multipole system (MUCEP) for shallow (0–3 m) geoelectrical investigation: the "Vol-de-canards" array, *Geophysical Prospecting*, 1997, Vol. 45 (6), pp. 983–1002, DOI: 10.1046/j.1365-2478.1997.650303.x.

23. Singh G., Williard K.W.J., Schoonover J.E., Spatial Relation of Apparent Soil Electrical Conductivity with Crop Yields and Soil Properties at Different Topographic Positions in a Small Agricultural Watershed, *Agronomy*, 2016, Vol. 6 (4), 57 p., DOI: 10.3390/agronomy6040057.
24. Stadler A., Rudolph S., Kupisch M., Langensiepen M., van der Kruk J., Ewert F., Quantifying the effects of soil variability on crop growth using apparent soil electrical conductivity measurements, *European Journal of Agronomy*, 2015, Vol. 64, pp. 8–20, DOI: 10.1016/j.eja.2014.12.004.

УДК 631.4

DOI: 10.19047/0136-1694-2020-103-168-187

Ссылки для цитирования:
Иванов А.Л., Столбовой В.С., Гребенников А.М., Оглезнев А.К., Петросян Р.Д., Шилов П.М. Ранжирование кислых почв по приоритетности проведения известкования в Российской Федерации // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2020. Вып. 103. С. 168-187. DOI: 10.19047/0136-1694-2020-103-168-187

Cite this article as:
Ivanov A.L., Stolbovoy V.S., Grebennikov A.M., Ogleznev A.K., Petrosyan R.D., Shilov P.M., Ranking of acidic soils by priority of liming in the Russian Federation, Dokuchaev Soil Bulletin, 2020, V. 103, pp. 168-187, DOI: 10.19047/0136-1694-2020-103-168-187

Ранжирование кислых почв по приоритетности проведения известкования в Российской Федерации

© 2020 г. А. Л. Иванов[1], В. С. Столбовой[1*], А. М. Гребенников[1], А. К. Оглезнев[1], Р. Д. Петросян[2], П. М. Шилов[1]

[1]ФИЦ "Почвенный институт имени В.В. Докучаева", Россия, 119017, Москва, Пыжевский пер, 7, стр. 2,
[*]e-mail: vladimir.stolbovoy@gmail.com.

[2]Верхневолжский федеральный аграрный научный центр, Россия, 601261, Владимирская обл., Суздальский р-н, пос. Новый, ул. Центральная, д. 3.

Поступила в редакцию 27.05.2020, *после доработки* 27.07.2020, *принята к публикации* 10.09.2020

Резюме: Почвы с избыточной кислотностью составляют треть пашни в Российской Федерации (35.1 млн га). За послереформенный период (1990–2019 гг.) доля кислых почв в пахотном фонде страны увеличилась на 2%, что связано с резким уменьшением площади известкования, восстановлением известкованных ранее генетически кислых почв, а также с возвратом в сельскохозяйственный оборот части кислых почв, перелогов и залежей. На примере Владимирской области в исследовании демонстрируется новый подход определения приоритетности (очередности) проведения мероприятий по известкованию. В

исследовании используется вновь созданная база данных “Почвы сельскохозяйственных земель в Российской Федерации”, которая включает 10 000 типологических единиц качества почв и 57 678 картографических единиц качества почв (КЕКП). Национальная “модель зернового эквивалента” рассчитывает стандартные урожаи зерновых культур по каждой КЕКП. ГИС-анализ позволяет объединить пространственное распределение кислотности почвы и показателей нормативных урожаев зерновых с целью определения приоритетных районов известкования. Кислые почвы с наивысшей нормативной урожайностью зерновых культур предлагаются в качестве приоритетных для известкования. Применение данного подхода на примере двух районов Владимирской области показало существенное уменьшение сроков окупаемости мероприятий по известкованию.

Ключевые слова: почвы, кислотность, очередность известкования, нормативная урожайность.

Ranking of acidic soils by priority of liming in the Russian Federation

A. L. Ivanov[1], V. S. Stolbovoy[1*], A. M. Grebennikov[1], A. K. Ogleznev[1], R. D. Petrosyan[2], P. M. Shilov[1]

[1]Federal Research Centre “V.V. Dokuchaev Soil Science Institute”, 7 Bld. 2 Pyzhevskiy per., Moscow 119017, Russian Federation, [*]e-mail: vladimir.stolbovoy@gmail.com.

[2]Upper Volga Federal Agricultural Research Centre, 3 Tsentral'naya Str., Vladimirskaya obl., Suzdal'skiy r-n, pos. Noviy 601261, Russian Federation.

Received 27.05.2020, *Revised* 27.07.2020, *Accepted* 10.09.2020

Abstract: Excessively acidic soils account for one third of arable land in the Russian Federation (35.1 million ha). Over the post-reform period (1990–2019), the relative share of acidic soils increased by 2%, due to a sharp decrease in the area of liming, and thus restoration of acidic properties of genetically acidic soils previously limed, as well as the involvement in agricultural use of some abandoned fields and fallows covered by acidic soils. This paper demonstrates a new approach to prioritize areas for liming by the example of the Vladimir region. The study makes use of newly established database “Soils of agricultural lands in the Russian Federation” which includes 10,000 soil quality typological unites and 57,678 soil quality mapping units (SQMU). National “Grain equivalent model” calculates the standard yields for

grain crops by each SQMU. The GIS analysis allows joining spatial distribution of soil acidity and standard yields of grains in order to determine the priority areas for lime application. Acidic soils with the highest grains standard yield are proposed to be considered as high-priority ones for liming. Application of the given method in two districts of the Vladimir region showed significant reduction in the payback period of liming.

Keywords: soil, acidity, priority of liming, standard yield.

ВВЕДЕНИЕ

Проектом “Государственной программы эффективного вовлечения в оборот земель сельскохозяйственного назначения и развития мелиоративного комплекса Российской Федерации на 2021–2030 гг.” (Проект…, 2020) предусмотрено известкование кислых почв на площади до 9 млн га. Ожидается, что прибавка урожая после проведения мероприятий по известкованию кислых почв в стоимостном эквиваленте составит более 150 млрд руб. Программа предусматривает существенную финансовую поддержку из федеральных, региональных, внебюджетных источников, составляющую 1.4 трлн рублей. При этом показатели окупаемости вкладываемых средств основываются на устаревшей нормативно-правовой базе, включая усредненные по административным районам данные сплошного агрохимического обследования. Недостаточное обоснование не может обеспечить гарантию получения ожидаемого результата повышения плодородия почв и экономического эффекта от вложенных средств. Очевидно, что планируемые Программой вложения средств должны обеспечивать конкурентоспособную маржинальность, что создается адресным использованием средств на основе детального почвенного обследования, агроэкологической оценки земель, современной цифровой нормативно-правовой базы, новых оптимизационных критериев оценки качества управленческих и технологических решений.

По современным представлениям выделяют агроэкологические и экономические критерии эффективности вложений.

Агроэкологические критерии сводятся главным образом к регулированию экологических функций почв, подлежащих, в соответствии с основным контекстом Программы, интенсификации активного сельскохозяйственного производства.

В части известкования существенных экологических ограничений при осуществлении Программы не существует.

Экономические критерии эффективности мероприятий известкования включают опцию максимизации урожаев, возделываемых культур и являются следствием конъюнктуры рынка. Другим вариантом является достижение наибольшей рентабельности от применения агрохимических средств, что позволяет наилучшим образом использовать ассортимент имеющегося ресурса мелиорантов. Этот подход особенно эффективен в условиях дефицита мелиоранта и высокой стоимости его применения.

Метод оптимизации средств химизации по критерию экономической рентабельности, в связи с его простотой и достаточно высокой информативностью, находит все более широкое практическое применение в агрохимии. Он достаточно хорошо освещен и апробирован в производстве (Модель адаптивно-ландшафтного…, 2002).

К сожалению, в практике известкования доминируют приемы, основанные на устаревших нормативных, балансовых методах расчета доз по результатам сплошного агрохимического обследования. Отсюда вытекают издержки и низкая рентабельность мероприятий по известкованию.

Целью работы является анализ фонда избыточно кислых пахотных почв РФ, его динамики за период 1990–2019 гг., а также исследование потенциала новой цифровой базы данных “Почвы сельскохозяйственных угодий РФ” для обоснования ранжирования кислых пахотных почв в целях определения очередности проведения известкования.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Работа выполнена на основе новой цифровой базы почвенных данных “Почвы сельскохозяйственных угодий РФ” (БД ПСХР), которая разрабатывается ФИЦ “Почвенный институт им. В.В. Докучаева”. Государственная регистрация БД ПСХР планируется в 2020 г. По мнению разработчиков, БД ПСХР должна обеспечивать сопровождение сельскохозяйственной деятельности на федеральном уровне. Задачи субъекта и муниципального образования должны решаться на основе детализации почвенных дан-

ных, обеспечивающих уровень проектных разработок. Двухуровневая по географическому масштабу и детализации организация почвенных данных предусмотрена статьей 72 Конституции РФ о совместном ведении РФ и субъектов РФ в отношении вопросов владения, пользования и распоряжения землей. В настоящее время разделение полномочий в отношении формирования и организации почвенных данных не проводится, что противоречит требованиям действующей Конституции РФ и продолжает унаследованные от СССР традиции не существующего в стране исключительно централизованного управления почвенными ресурсами. Научно-методологические основы нового современного двухуровневого обеспечения почвенными данными, включая взаимодействие между федеральными и субъект-муниципальными уровнями, должно строиться на принципе системной дополнительности, т. е., вводя детали параметров и (дополнительные) понятия на субъект-муниципальном уровне, совокупность всех почвенных данных обоих уровней должна обеспечивать воспроизведение целостности почвенного сопровождения решаемой задачи.

Геометрическая часть БД ПСХР включает 57 678 КЕКП.

Семантическая часть БД ПСХР содержит 10 000 типологических единиц качества почв (ТЕКП), которые, кроме разнообразных почвенных характеристик, содержат параметры природных условий сельскохозяйственного производства, данные национальных докладов и др. (Государственный (национальный) доклад..., 2020). Кроме того, БД ПСХР также включает рассчитанные по рекомендованной Министерством Экономического Развития РФ методике (Методические указания..., 2003) показатели нормативной урожайности зерновых культур.

Для КЕКП БД ПСХР Владимирской области создана карта гидролитической кислотности почв (Нг). Для этих же КЕКП рассчитаны показатели и создана карта нормативной урожайности зерновых культур. Наложение перечисленных выше карт позволило построить карту комбинаций групп кислотности почв и классов нормативной урожайности зерновых, которые интерпретированы в целях определения очередности проведения мероприятий по известкованию почв.

Расчеты, анализ и визуализация отдельных тематических

слоев выполнены в среде QGIS.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Распространение кислых почв в пахотных угодьях РФ. По данным IV тура обследований земель сельскохозяйственного назначения, проведенных институтами РосНИИземпроект, на 1 января 1990 г. в РФ площадь пахотных земель составляла 128 931.6 тыс. га (табл. 1). Выявленная площадь генетически кислых почв, включая слабо-, средне- и сильнокислые, была 36 240 тыс. га. По данным национального доклада (2016), на 1 января 2015 г. площадь пашни РФ уменьшилась до 115 093.1 тыс. га. Сократилась также и площадь “генетически кислых” почв до 33 800 тыс. га. В 2019 г. в РФ отмечено некоторое увеличение площади пахотных почв почти до 117 000 тыс. га. При этом также возросла площадь кислых почв до 35.1 млн га. Таким образом обнаруживается достаточно ясная зависимость – увеличение площади пахотных почв согласуется с увеличением площади кислых почв. Установленная закономерность упоминается и в других исследованиях (Лукин, 2012; Сычев, 2019). Несколько иная картина обнаруживается при анализе динамики относительной доли кислых почв в фонде пахотных земель страны (табл. 1). Из приведенных данных следует, что при разнонаправленном изменении площади пахотных почв доля кислых почв имеет устойчивую тенденцию к увеличению – 28, 29 и 30% в 1990, 2015 и 2019 гг. соответственно. При этом скорость увеличения доли кислых почв со временем возрастает по экспоненте. Так за 15-летний период (с 1990 по 2015 гг.) доля кислых почв увеличилась на 1%, в то время как за более короткий период (с 2015–2019 гг., т. е. за 4 года) увеличение доли кислых почв составило также 1%. Иными словами, как показывают наши данные, в первый период, до 2015 г., это увеличение происходило медленнее (1% за 15 лет), чем во второй период в (1% за 4 года) (табл. 1). Среди причин, объясняющих рассмотренную динамику этого периода, следует отметить сокращение объемов известкования кислых почв и растянутое во времени замедляющееся восстановление кислотности мелиорированных почв. Во второй период времени, кроме восстановления кислотности почв, по-видимому, играет роль резко возрастающее вовлечение в

пашню кислых почв, залежей и перелогов. В итоге, по данным Минсельхоза Российской Федерации, на 1 января 2019 г., фонд пахотных почв с избыточно кислой реакцией почвенной среды, которая подлежит известкованию, составляет 35.1 млн га.

Таблица 1. Динамика площадей пашни и кислых почв сельскохозяйственных угодий РФ
Table 1. Area dynamics of arable lands and acid soils in the Russian Federation

Годы	Площадь пашни, млн га	Кислые почвы, млн га	Доля кислых почв, % площади пашни
1990	128.9	36.2	28
2015	115.1	33.8	29
2019	117.0	35.1	30

В 2019 г., по данным Минсельхоза Российской Федерации, регионами было произвестковано около 303.5 тыс. га пашни (менее 1% площади кислых почв), что на 11.5 тыс. га больше, чем годом ранее. Средняя стоимость затрат в 2019 г. на проведение известкования почв составляла 16 тыс. руб. на гектар. На Дальнем Востоке аналогичные затраты больше и равнялись 37.5 тыс. руб. В 2020-м году планируется произвести известкование на площади 1.1 млн га почв, а в 2021-м – 1.35 млн га (около 3% и 4% от площади кислых почв соответственно). Учитывая значительную стоимость проведения известкования кислых почв, даже при относительно небольшой площади работ затраты государства составят значительные суммы. Очевидно, что в условиях ограниченности ресурсов и больших затрат крайне важным становится обоснованный выбор приоритетных для известкования территорий, т. е. ранжирование территорий по очередности проведения мелиорации.

Ранжирование кислых почв в целях определения очередности проведения мероприятий по известкованию. В общем виде решение задачи по известкованию почв проходит в несколько этапов:

1. Определение потребности в известковании.
2. Определение доз вносимых мелиорантов.
3. Выделение земельных участков возделываемых культур.
4. Составление проекта на известкование.

Потребность почв в известковых материалах обосновывается, как правило, величинами потенциальной кислотности, как обменной, так и гидролитической (табл. 2).

Таблица 2. Группировка почв по величине pH солевой вытяжки и гидролитической кислотности (Hг) (Чуян и др., 2019)
Table 2. Grouping of soils by pH value (KCl) and hydrolytic acidity (Chuyan et al., 2019)

Класс почвы	Степень кислотности	pH солевой вытяжки	Hг гидролитическая кислотность	Потребность почв в известковании
I	Очень сильнокислая	4.0 и ниже	более 6.0	Очень сильная
II	Сильнокилая	4.1–4.5	5.1–6.0	Сильная
III	Среднекислая	4.6–5.0	4.1–5.0	Средняя
IV	Слабокислая	5.1–5.5	3.1–4.0	Слабая
V	Близкая к нейтральной	5.6–6.0	2.1–3.0	Очень слабая
VI	Нейтральная	6.0 и более	менее 2.0	Отсутствует

Установление очередности известкования почв связано со степенью их нуждаемости в этом мероприятии (табл. 2), которая часто также считается признаком вероятной эффективности действия извести. В этом случае предлагается известковать в первую очередь только почвы наиболее кислые с целью получения наибольшей экономической эффективности. Традиционные подходы рекомендуют учитывать для определения приоритетности

агроклиматические условия и другие факторы (Чуян и др., 2019). Вместе с тем исходными данными выступают средневзвешенные показатели кислотности почв для административного района, которые не имеют привязки к свойствам почв и структуре почвенного покрова (Методические указания..., 2003). Очевидно, что такое осреднение сглаживает внутрирайонное разнообразие почв, что снижает эффективность известкования. Другие недостатки данного подхода связаны с тем, что приоритетность четко обосновывается значением кислотности, в то время как рекомендации по учету других факторов, например, плодородия почв, неопределенны. Действительно, для кислотности есть четкие критерии выбора (табл. 2), при этом ясные нормативы учета "агроклиматических условий и других факторов" отсутствуют. Очевидно, что в таком подходе возникает серьезный риск ошибки выбора приоритета, что может привести к проведению известкования малоплодородных вариантов кислых почв. В результате проведенные мероприятия по известкованию будут менее эффективны.

Использование новой цифровой БД ПСХР позволяет решить задачу выбора приоритетности проведения известкования с учетом плодородия почв и особенностей структуры почвенного покрова пахотных земель. Применение такого подхода иллюстрируется на примере Владимирской области[3], которая является пилотной для адаптации БД ПСХР в целях почвенного сопровождения деятельности АПК (рис. 1).

Кислотность почв Владимирской области по значению Нг варьирует в пределах 3.0–3.8 мг-экв на 100 г почвы (рис. 2А). Отмеченное относительно небольшое колебание показателя Нг связано с ограниченным составом структуры почвенного покрова пахотных почв области, представленным генетически близкими пахотными дерново-подзолистыми и светло-серыми лесными почвами. Эти почвы объединяются в один отдел текстурно-дифференцированных почв.

[3] Аналогичный анализ может быть выполнен для всех почв сельскохозяйственных угодий муниципальных образований и субъектов РФ.

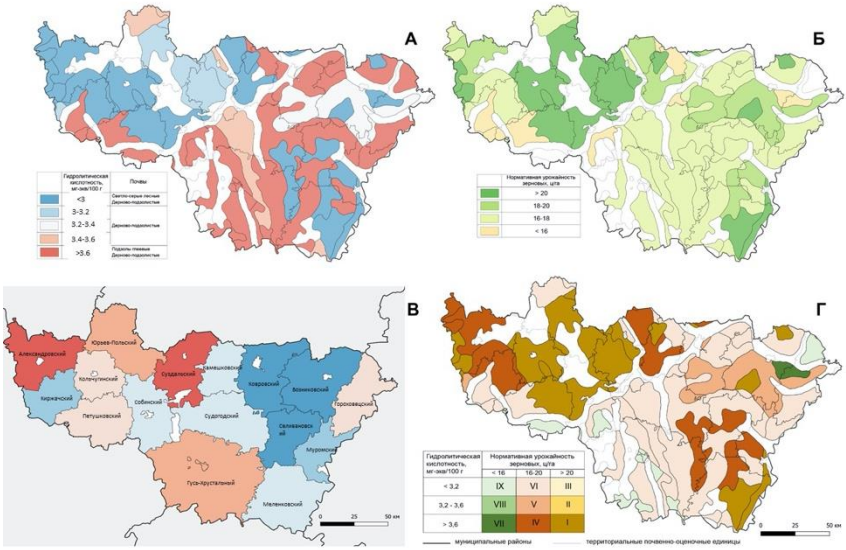

Рис. 1. Ранжирование пахотных кислых почв сельскохозяйственных угодий Владимирской области по приоритетности проведения известкования: **А)** визуализация тематического слоя БД ПСХР, гидролитическая кислотность почв (мг-экв на 100 г); **Б)** визуализация тематического слоя БД ПСХР, нормативная урожайность зерновых культур (ц/га); **В)** картограмма гидролитической кислотности (из отчета агрохимслужбы Владимирской области, 2019) и визуализация тематического слоя БД ПСХР муниципальные образования РФ; **Г)** визуализация наложения тематических слоев БД ПСХР **А** и **Б** для генерации тематического слоя **Г**, очередность для проведения мероприятий по известкованию (от I очереди до IX очереди).

Fig. 1. Ranking of acid soils of agricultural lands in Vladimir region by priority of liming: **A)** visualization of the thematic layer hydrolytic soil acidity (meq/100 g) of DB ALR; **Б)** visualization of the thematic layer the standard yield of grain crops (centner/ha) of DB ALR; **B)** cartogram of hydrolytic acidity (taken from the report of the agrochemical service of Vladimir region, 2019) and visualization of DB ALR thematic layer of municipalities of the Russian Federation; **Г)** visualization of the overlaying of both DB ALR thematic layers – **А** and **Б** – for the generation of thematic layer **Г**, ranking by priority of liming (from the I rank to the IX one).

Ареалы пахотных почв с относительно повышенным значением Нг показаны темно-синим цветом (рис. 1А). Из рисунка видно, что рассматриваемые почвы встречаются в разных районах Владимирской области, где занимают различную площадь. Аналогичная картина пространственного размещения отмечается и для всех других ареалов кислых почв пашни области. Хозяйственно важной особенностью пространственного распространения кислых пахотных почв является также контрастность компонентов структуры почвенного покрова. Переходы между соседними почвами с разной кислотностью контрастные, т. е. почвы с наименьшими значениями Нг часто соседствуют с почвами, имеющими наибольшие значения Нг. Отмеченная мозаичность картины размещения Нг связана с пространственной неоднородностью почвообразующих пород, т. е. имеет литологическую природу. Очевидно, что в случае порайонного осреднения значений Нг (рис. 1В) выявленные особенности структуры почвенного покрова пахотных почв не будут учтены при проведении мероприятий по известкованию. Почвы с разной литологической основой получат одинаковые объемы мелиоранта, что не позволит эффективно улучшить кислотный фон пахотных почв. Иными словами, эффективность мероприятий по известкованию будет снижена.

Картограмма гидролитической кислотности (рис. 1В), составленная агрохимической службой Владимирской области методом среднего значения по району (Методические указания..., 2003), имеет рисунок, повторяющий границы муниципальных образований. Представленные данные кислотности не отражают внутрирайонную дифференциацию почвенного покрова и размещение ареалов кислотности, как в случае с картой рис. 1А, т. е. не учитывают разнообразие почвенных условий. Также очевидно, что основания для решения о проведении известкования в случае использования картограммы рис. 1В предоставляются в осредненном виде, что существенно увеличивает вероятность принятия ошибочного решения по определению очередности проведения известкования. Следует подчеркнуть, что рассмотренный случай с использованием осредненных данных кислотности соответствует картине обоснования принятия решений по известкованию в Государственной программе (Проект…, 2020).

Качество почв Владимирской области оценивалось по показателю нормативной урожайности зерновых культур (рис. 1Б), как принято в экономической оценке земель сельскохозяйственного назначения (Методические указания…, 2003; Сапожников, Носов, 2012). Как отмечалось выше, данные нормативной урожайности зерновых культур являются частью БД ПСХР и определяются по формуле:

$$Ун = 33{,}2 \times 1{,}4 \times \frac{АП}{10} \times К_1 \times К_2 \times К_3 \times К_4, \text{ где} \qquad [1]$$

Ун – нормативная урожайность зерновых культур, ц/га;

АП – величина местного агроклиматического потенциала для зерновых культур;

10.0 – базовое значение величины *АП*;

33.2 – нормативная урожайность (ц/га) зерновых культур на эталонной почве, полученная при применении среднего уровня зональных технологий при базовом значении *АП* (10.0);

1.4 – коэффициент пересчета на уровень урожайности при интенсивной технологии возделывания;

$К_1$...$К_4$ – поправочные коэффициенты на показатели качества почв:

$К_1$ – содержание гумуса в пахотном слое;

$К_2$ – мощность гумусового горизонта;

$К_3$ – содержание физической глины в пахотном слое;

$К_4$ – негативные свойства почв.

Модель [1] рассчитывает нормативную урожайность зерновых культур относительно таковой эталонной почвы. В качестве последней выбран чернозем, сформированный на лёссе с содержанием гумуса 4% в пахотном слое, имеющий гумусовый горизонт мощностью 50 см и содержание физической глины 50%. Почвообразующий лёсс обладает оптимальными тепловыми и водно-физическими свойствами (водопроницаемость 0.1–1.0 м/сут.) и хорошим внутренним дренажом. Эталонный чернозем не имеет негативных свойств, таких как эродированность, избыточное увлажнение, уплотнение, засоление и др.

Подчеркнем, что перечень индикаторов качества почв модели [1] не включает показатели почв, обладающие высокой про-

странственной вариабельностью в пределах отдельных производственных участков и поддающиеся относительно простому регулированию, такие показатели как содержание элементов питания растений, кислотность, состав поглощенных катионов и пр. в перечень индикаторов качества почв не включены. Это исключает "двойной" учет кислотности почв, проведенный выше (рис. 1А).

Величина нормативной урожайности зерновых для почв Владимирской области изменяется в диапазоне от 10 до 26 ц/га (рис. 1Б). Нормативная урожайность отражает средний уровень экстенсивных и нормативных технологий производства. При интенсификации агротехнологий актуальная урожайность зерновых культур достигает 50 и более ц/га, особенно на серых лесных почвах Владимирского Ополья. Отмеченный выше значительный диапазон величин нормативной урожайности зерновых культур определяется неоднородностью агроклиматических условий, разнообразием свойств почв, включая гранулометрический состав, оглеение, а также различиями рельефа, уровнем залегания грунтовых вод, литологическим строением почвообразующих пород и др. Максимальная величина урожайности зерновых культур (темно-зеленый цвет) отмечается в Александровском, Юрьев-польском, Кольчугинском и Суздальском районах и превышает 20–26 ц/га. В других районах картина пространственного размещения нормативной урожайности зерновых культур достаточно мозаична, как и в случае с Нг.

Вместе с тем контрастность граничащих полигонов почв с разной нормативной урожайностью (рис. 1Б) выражена меньше и изменение нормативной урожайности в соседних контурах почв сглажено. Отмеченная слабая контрастность пространственной дифференциации нормативной урожайности определяется постепенным градиентом агроклиматических условий, который во многом контролирует нормативную урожайность сельскохозяйственных культур.

Наложение слоев Нг (рис. 1А) и нормативной урожайности зерновых культур (рис. 1Б) создает пространственную картину пересечения двух отмеченных показателей, которая рекомендуется в качестве основания для определения очередности проведения известкования кислых пахотных почв (рис. 1Г). Интересно, что

полученная в результате пересечения картина (рис. 1Г) эмерджентна по отношению к исходным рисункам, т. е. не повторяет рис. 1А и рис. 1Б. С позиции теории систем, картина очередности проведения известкования – это некоторое новое свойство агроэкосистемы, которое не присутствует в исходных отдельных данных или их сумме, но является результатом их взаимодействия, демонстрируя так называемый “системный эффект”. Сам по себе факт проявления системности иллюстрирует, что созданная БД ПСХР интегрирует логически связанные формальные описания и представляет собой систему присущих сельскохозяйственным почвам показателей. В итоге обнаруживается, что почвы с одинаковым значением величины Нг могут иметь существенно разную нормативную урожайность. Так в Александровском и Кольчугинском районах, где почвы имеют близкие значения Нг, нормативная урожайность зерновых культур различна – 10–16 ц/га и 20–26 ц/га соответственно.

По приоритетности (очередности) проведения известкования во Владимирской области выделено 9 категорий, которые включают условное разделение территории по трем классам нормативной урожайности и трем группам гидролитической кислотности (рис. 1Г). Выделение по три градации отмеченных выше категорий сделано в целях упрощения и улучшения читаемости рисунка. На практике количество градаций категорий может быть иным в зависимости от количества классов нормативной урожайности и групп кислотности. Необходимо отметить, что число градаций категорий определяет степень дробности территории по приоритетности известкования, т. е. позволяет оптимизировать площадь известкования, увязав ее с доступными ресурсами для проведения мероприятия. Возможность такой оптимизации особенно важна в условиях ограниченных ресурсов. Принципиальным является то, что категории приоритетности дифференцируются не только по кислотности почв, но и их плодородию, оцененному по величине нормативной урожайности зерновых культур. Также важно отметить, что приведенный пример Владимирской области демонстрирует возможность применения БД ПСХР для всей территории сельскохозяйственных земель РФ, т. е. БД

ПСХР может служиить основой для планирования ежегодных объемов работ по известкованию на федеральном уровне.

Необходимо отметить, что разработка деталей проекта по известкованию, согласно конституционному требованию разделения полномочий совместного ведения, является компетенцией субъектов и муниципальных образований и в настоящей статье не рассматривается. Очевидно, что конкретные мероприятия на отдельном производственном участке (поле) относятся к компетенции региональных институтов и в масштабе федерального уровня излишне детальны. Вместе с тем на рисунке 1 показано, что БД ПСХР дает возможность принимать более обоснованные решения по распределению федеральных субсидий по субъектам федерации с учетом региональной эффективности вложений. Последнее можно рассматривать в числе существенных дополнительных плюсов обсуждаемого подхода в определении очередности проведения известкования.

Как показано на рисунке 1, практически все районы Владимирской области представляются неоднородными по разнообразию участков кислых пахотных почв, нормативной урожайности зерновых культур и очередности проведения мероприятий известкования. Такое разнообразие категорий очередности должно учитываться, если иметь в виду значительную стоимость выполнения работ и возможное снижение экономической эффективности их проведения в случае ошибки выбора приоритета.

Рассмотрим экономическую эффективность проведения известкования во Владимирской области на основе традиционных обобщенных средних показателей. Так, по данным министерства сельского хозяйства Владимирской области, средняя прибавка урожая зерновых от известкования кислой почвы (серые лесные и черноземные) в 2019 г. составляет около 2 ц/га при средней стоимости известкования около 4 833 руб. на га. Средняя стоимость пшеницы (3-го, 4-го, 5-го классов) в Центральном Федеральном Округе, по данным Минсельхоза РФ, на конец 2019 г. составила около 10 500 руб. за тонну (Агровестник) или 2 100 руб. за 2 ц. Таким образом, расчеты показывает, что средняя окупаемость известкования во Владимирской области составляет (4 833 / 2 100 = 2.3), т. е. почти 2–3 года.

Как будет выглядеть эффективность известкования на основе предлагаемого метода использования БД ПСХР? По нашим подсчетам, отмеченный выше средний прирост урожая составляет около 15% величины нормативной урожайности во Владимирской области.

Так в Александровском районе прибавка урожая зерновых (15%) от известкования на кислых пахотных почвах с низкой нормативной урожайностью (10–16 ц/га) составит около 2.0 ц/га при среднем значении нормативной урожайности 13 ц/га. На аналогичных по кислотности пахотных почвах Кольчугинского района с высокой нормативной урожайностью (20–26 ц/га) прибавка урожая в единицах нормативной урожайности будет более 3.5 ц/га при среднем значении нормативной урожайности 23 ц/га. Иными словами, предложенный подход определения очередности известкования позволяет выбрать первоочередным Кольчугинский район, что даст возможность получить около 1.5 ц/га зерна дополнительно с гектара мелиорированных почв. В стоимостном выражении эта разница составит около 1 600 руб. с мелиорированного гектара. Соответственно сократится время окупаемости мероприятий по известкованию с 2–3 до 1–2 лет (во втором случае 4 833 / 3 700 = 1.3).

Таким образом, подсчеты показывают, что рассмотренный выше подход определения очередности проведения мероприятий по известкованию позволит более рационально подойти к выполнению Государственной программы повышения плодородия почв и будет способствовать повышению экономической эффективности вложений в проведение известкования кислых почв. Так срок окупаемости вложений сократится почти в 1.8 раза.

ВЫВОДЫ

1. Доля кислых почв в пахотном фонде РФ за период с 1990 по 2019 гг. увеличилась на 2% и составила 35.1 млн га или 30% пахотного фонда страны. При этом увеличение доли кислых почв происходит по экспоненте, что связано с резким увеличением возврата в сельскохозяйственный оборот кислых залежных земель в последние 4 года на фоне постепенного восстановления генетической кислотности пахотных почв в условиях резкого сокращения

объемов известкования в стране начиная с 90-х годов прошлого века.

2. Показана перспективность использования новой цифровой базы данных “Почвы сельскохозяйственных угодий РФ” (БД ПСХР) для выбора регионов первоочередного проведения мероприятий по известкованию в целях повышения эффективности “Государственной программы эффективного вовлечения в оборот земель сельскохозяйственного назначения и развития мелиоративного комплекса Российской Федерации на 2021–2030 гг.”

3. На примере Владимирской области показано, что новый подход к определению приоритетности (очередности) территорий, подлежащих известкованию, позволяет в 1.8 раза сократить срок окупаемости мероприятий по известкованию, что будет способствовать выполнению Государственной программы повышения плодородия почв и отвечает государственному требованию повышения эффективности вложений.

4. Опыт использования цифровой БД ПСХР обнаруживает, что последняя представляет собой логически связанные формальные описания, интегрированные в систему почвенно-экологических показателей, присущих сельскохозяйственным землям. В итоге очередность проведения известкования – это некоторое новое свойство агроэкосистемы, которое не присутствует в исходных отдельных данных или их сумме, но является результатом их взаимодействия, демонстрируя так называемый “системный эффект”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

25. О ситуации на рынке зерна с 16–20 декабря 2019 г. (Минсельхоз РФ) // *Агровестник*. URL: https://agrovesti.net/lib/industries/cereals/o-situatsii-na-rynke-zerna-s-16-20-dekabrya-2019-g.html.

26. Государственный (национальный) доклад о состоянии и использовании земель в Российской Федерации в 2019 году. URL: https://rosreestr.ru/site/activity/sostoyanie-zemel-rossii/gosudarstvennyy-natsionalnyy-doklad-o-sostoyanii-i-ispolzovanii-zemel-v-rossiyskoy-federatsii/.

27. *Лукин С.В., Цыгуткин А.С., Блинникова В.Д., Кауфман А.Л.* Агроэкологическая оценка кислотности почв Центрального Черноземья

и необходимость проведения химической мелиорации при возделывании белого люпина // Плодородие. 2012. № 6 (69). С. 38–40.
28. Приказ Министерства экономического развития РФ от 12 мая 2017 г. N 226 “Об утверждении методических указаний о государственной кадастровой оценке” (с изменениями и дополнениями). URL: http://base.garant.ru/71686152/#ixzz6WPvL2MHF.
29. Методические указания по проведению комплексного мониторинга плодородия почв земель сельскохозяйственного назначения. М.: ФГНУ “Росинформагротех”, 2003. 240 с.
30. Модель адаптивно-ландшафтного земледелия Владимирского ополья / Под ред. *В.И. Кирюшина и А.Л. Иванова*. М.: “Агроконсалт”, 2004. 456 с.
31. Приказ Минсельхоза России от 11.02.2020 N 57 “О внесении изменений в приказ Минсельхоза России от 21 марта 2018 г. N 119 “Об утверждении модели ранжирования проектов (программ) и ведомственных целевых программ с учетом оценки достижения целей Государственной программы развития сельского хозяйства и регулирования рынков сельскохозяйственной продукции, сырья и продовольствия на 2013–2020 годы”. URL: http://mcx.ru/upload/iblock/2d9/2d9ad7c2c7356ff94e5467f225d0efd7.pdf.
32. Проект “Государственная программа эффективного вовлечения в оборот земель сельскохозяйственного назначения и развития мелиоративного комплекса Российской Федерации на 2021–2030 гг.” 2020. URL: http://viapi.ru/news/detail.php?ID=228301.
33. *Сапожников П.М., Носов С.И.* Государственная кадастровая оценка земель сельскохозяйственного назначения Российской Федерации. М.: ООО “НИПКЦ ВОСХОД–А”, 2012. 160 с.
34. *Сычев В.Г.* Современное состояние плодородия почв и основные аспекты его регулирования. М.: РАН, 2019. 328 с.
35. *Чуян О.Г., Дубовик Д.В., Масютенко Н.П., Лазарев В.И.* Научно-практические рекомендации по известкованию почв в Курской области. Курск: ФГБНУ “Курский федеральный аграрный научный центр”, Комитет АПК Курской области, 2019. 30 с.

REFERENCES

1. O situatsii na rynke zerna s 16–20 dekabrya 2019 g. (Minsel'khoz RF) (bout the situation on the grain market from December 16–20, 2019 (Ministry of Agriculture of the Russian Federation)), *Agrovestnik*, URL: https://agrovesti.net/lib/industries/cereals/o-situatsii-na-rynke-zerna-s-16-20-dekabrya-2019-g.html.

2. State (national) report on the state and use of land in the Russian Federation in 2019. URL: https://rosreestr.ru/site/activity/sostoyanie-zemel-rossii/gosudarstvennyy-natsionalnyy-doklad-o-sostoyanii-i-ispolzovanii-zemel-v-rossiyskoy-federatsii/.
3. Lukin S.V., Tsygutkin A.S., Blinnikova V.D., Kaufman A.L., Agroekologicheskaya otsenka kislotnosti pochv Tsentral'nogo Chernozem'ya i neobkhodimost' provedeniya khimicheskoi melioratsii pri vozdelyvanii belogo lyupina (Agroecological assessment of the acidity of soils in the Central Chernozem Region and the need for chemical reclamation in the cultivation of white lupine), *Plodorodie*, 2012, No. 6 (69), pp. 38–40.
4. Order of the Ministry of Economic Development of the Russian Federation of May 12, 2017 No. 226 "On the approval of guidelines on state cadastral valuation" (with amendments and additions), URL: http://base.garant.ru/71686152/#ixzz6WPvL2MHF.
5. *Methodological guidelines for the comprehensive monitoring of soil fertility of agricultural lands*, Moscow: FGNU "Rosinformagrotech", 2003, 240 p.
6. Kiryushin V.I., Ivanov A.L. (Eds), *Model' adaptivno-landshaftnogo zemledeliya Vladimirskogo opol'ya* (Model of adaptive landscape agriculture of Vladimir opolye), Moscow: "Agroconsult", 2004, 456 p.
7. Order of the Ministry of Agriculture of Russia of 11.02.2020 No. 57 "On Amending the Order of the Ministry of Agriculture of Russia of March 21, 2018 No. 119 "On the approval of a model for ranking projects (programs) and departmental target programs, taking into account the assessment of the achievement of the goals of the State Program for the Development of Agriculture and regulation of markets for agricultural products, raw materials and food for 2013–2020". URL: http://mcx.ru/upload/iblock/2d9/2d9ad7c2c7356ff94e5467f225d0efd7.pdf.
8. The project "State program for the effective involvement of agricultural land in use and the development of the reclamation complex of the Russian Federation for 2021–2030." 2020. URL: http://viapi.ru/news/detail.php?ID=228301.
9. Sapozhnikov P.M., Nosov S.I., *Gosudarstvennaia kadastrovaya otcenka zemel' selskokhoziastvennogo naznatchenya* (State cadastrial evaluation of agricultural land in Russian Federation). Mosscow: LLC "NIPKC VOSHOD-A", 2012, 160 p.
10. Sychev V.G., *Sovremennoe sostoyanie plodorodiya pochv i osnovnye aspekty ego regulirovaniya* (The current state of soil fertility and the main aspects of its regulation), Moscow: RAN, 2019, 328 p.
11. Chuyan O.G., Dubovik D.V., Masyutenko N.P., Lazarev V.I., *Nauchno-prakticheskie rekomendatsii po izvestkovaniyu pochv v Kurskoi oblasti*

(Scientific and practical recommendations for liming soils in the Kursk region), Kursk: FGBNU “Kurskii federal'nyi agrarnyi nauchnyi tsentr”, Komitet APK Kurskoi oblasti, 2019, 30 p.

УДК 631.474

DOI: 10.19047/0136-1694-2020-103-188-210

Ссылки для цитирования:
Савин И.Ю. Генеалогическое древо современного российского почвоведения // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2020. Вып. 103. С. 188-210. DOI: 10.19047/0136-1694-2020-103-188-210

Cite this article as:
Savin I.Yu., Genealogical tree of modern Russian Soil Science, Dokuchaev Soil Bulletin, 2020, V. 103, pp. 188-210, DOI: 10.19047/0136-1694-2020-103-188-210

Благодарность:
Исследования проведены при финансовой поддержке РФФИ (грант № 19-05-50063) и РНФ (№ 20-67-46017).
Выражаю благодарность С.А. Аветяну, Е.А. Шишконаковой и А.С. Фриду за помощь в сборе исходных данных.

Acknowledgments:
The studies were carried out with the financial support of the Russian Foundation for Basic Research (project No. 19-05-50063) and Russian Science Foundation (project No. 20-67-46017).
The author wishes to express his sincere gratitude to Mr. S.A. Avetyan, Mrs. E.A. Shishkonakova and Mr. A.S. Frid for their contribution to the collection of the initial data.

Генеалогическое древо современного российского почвоведения

© 2020 г. И. Ю. Савин

ФИЦ "Почвенный институт им. В.В. Докучаева", Россия, 119017, Москва, Пыжевский пер, 7, стр. 2,
http://orcid.org/0000-0002-8739-5441, e-mail: savin_iyu@esoil.ru.

Поступила в редакцию 08.05.2020, *после доработки* 23.05.2020, *принята к публикации* 10.09.2020

Резюме: Современное российское почвоведение является молодой наукой и возникло немногим более 100 лет назад. Статья посвящена анализу современных научных школ в области почвоведения, которые функционируют в России. Исследования базируются на анализе кандидатских диссертаций, защищенных по специальности "почвоведение" в России за последние десять лет, а также на

информации о научных руководителях этих диссертаций и их принадлежности к той или иной научной школе. Установлено, что наиболее активно развиваются школы почвоведов – непосредственных учеников В.В. Докучаева, А.В. Советова или А.Н. Сабанина. В качестве отдельных "веток" развития отечественного почвоведения выделяются школы С.С. Неуструева и И.В. Тюрина. Основными центрами подготовки ученых-почвоведов на сегодняшний момент являются факультет почвоведения МГУ им. М.В. Ломоносова, РГАУ–МСХА имени К.А. Тимирязева, Почвенный институт им. В.В. Докучаева, Башкирский и Кубанский ГАУ, Воронежский университет. Количество подготовленных ученых-почвоведов за последние 10 лет имеет тенденцию к снижению, что связано с малой востребованностью профессии в современных условиях развития страны.

Ключевые слова: история почвоведения, научные школы, Россия, подготовка научных кадров.

Genealogical tree of modern Russian Soil Science

Savin I.Yu.

Federal Research Centre "V.V. Dokuchaev Soil Science Institute",
7 Bld. 2 Pyzhevskiy per., Moscow 119017, Russian Federation,
http://orcid.org/0000-0002-8739-5441, e-mail: savin_iyu@esoil.ru.

Received 08.05.2020, *Revised* 23.05.2020, *Accepted* 10.09.2020

Abstract: Modern Russian Pedology is a young science and emerged a little more than 100 years ago. The article is devoted to the analysis of modern scientific schools in the field of soil science, which are developing in Russia. The investigations are based on the analysis of candidate's dissertations (PhD theses equivalent in Russia) defended on a specialty "soil science" in Russia for the last ten years, as well as on information about the scientific advisors supervised these dissertations and their belonging to this or that scientific school. It has been found that the most actively developing schools are the ones of immediate disciples of V.V. Dokuchaev, A.V. Sovetov or A.N. Sabanin. The schools of S.S. Neustruev and I.V. Tyurin are singled out as separate "branches" in the development of Russian soil science. At present, the main training resource centres in pedology are the Faculty of Soil Science of Lomonosov Moscow State University, Russian State Agrarian University – Moscow Agricultural Academy named after K.A. Timiryazev, V.V. Dokuchaev Soil Science Institute, Bashkir Agricultural Institute, Voronezh and Kuban universities. Number of soil scientists with advanced

degrees over the past 10 years has tended to decrease, which is associated with the low demand for the profession in modern conditions of the country.

Keywords: history of Soil Science, scientific schools, Russia, education in Pedology.

ВВЕДЕНИЕ

В 1883 г. в монографии “Русский чернозем” В.В. Докучаев впервые выделил почву как объект исследования (самостоятельное природное тело, сформированное “факторами почвообразования”), который необходимо изучать собственными методами (Докучаев, 1883). Этот момент считается началом современного научного генетического почвоведения. Таким образом, с момента возникновения почвоведения как науки прошло уже почти 140 лет. По сравнению с другими науками почвоведение – очень молодая наука. Тем не менее, за это время сменилось уже несколько генераций почвоведов. Некоторые научные лидеры отечественного почвоведения не оставили после себя никаких научных школ. Отдельные научные школы, возникшие еще при В.В. Докучаеве, до сих пор достаточно активны в своем развитии. В научной литературе периодически публикуются статьи по истории развития той или иной школы почвоведения в России (Виленский, 1940; Прасолов, 1943; Димо, 1946; Герасимов, Иванова, 1948; Тюрин, 1957; История…, 1980; Иванов, 2003; Костенков и др., 2005; Беляев, 2008), в которых обобщаются достижения этих школ, а также анализируются основные научные направления их развития. Многие ВУЗы и кафедры в настоящее время на своем сайте в сети Интернет размещают странички по истории их становления и развития (см., например, страничку https://www.timacad.ru/education/fakultety/fakultet-pochvovedeniia-agrokhimii-i-ekologii/kafedra-pochvovedeniia-geologii-i-landshaftovedeniia/istoriia). Кроме того, публикуется достаточно большое количество биографий ученых, в том числе в связи с их памятными датами (Фирсова, 1996; Сычева, 2003; Международная…, 2005; Матинян и др., 2013; Савостьянов, 2013; Проблемы…, 2017; Березин, Азаренко, 2018).

Но подобная информация является очень фрагментарной и не дает полной картины развития отечественного почвоведения.

В настоящей статье сделана попытка проанализировать генеалогическое развитие отечественного почвоведения на современном этапе.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Критерии выделения научных школ могут быть разными (Козлова, 2014). Единого набора не существует, что предопределяется расплывчатостью самого понятия этого термина. В наших исследованиях мы не пытались выделить научные школы с учетом всех существующих критериев. За основу были взяты следующие соображения.

Ученым-почвоведом человек становится лишь после защиты кандидатской диссертации, а не после обучения в университете или институте. Именно в аспирантуре формируются научные взгляды соискателя степени, он получает навыки научной работы, написания научных статей. По сути, именно диплом кандидата наук является дипломом, подтверждающим овладение профессией ученого. Таким образом, защитившийся аспирант и есть продолжатель той ветки генеалогического древа науки, которое представляет его руководитель. Следовательно, генеалогическое древо современного почвоведения можно построить, проследив всю цепочку научных руководителей аспирантов, защитившихся по специальности “почвоведение”.

Для нашего анализа были отобраны все защиты кандидатских диссертаций в России за период с 2010 по 2019 гг. по специальности “почвоведение” (как по биологическим, так и по сельскохозяйственным наукам). Всего было отобрано 226 диссертации. Список диссертаций сформирован по данным ВАК Минобрнауки России (https://vak.minobrnauki.gov.ru/main). В список не включались защиты по смежным научным дисциплинам (например, агрохимия, агрофизика, мелиорация и т. п.).

Для каждой диссертации в созданной базе данных указывалась следующая информация: ФИО автора, название, место защиты, научный руководитель, год защиты. После этого добавлялась следующая информация: регион исследований и научная тематика работы.

Далее для каждого научного руководителя диссертации устанавливалось кто был научным руководителем его кандидатской диссертации, и затем делалась попытка выявить научных руководителей кандидатских диссертаций всей цепочки до основателей направления в почвоведении. Для этого использовался архив авторефератов диссертаций Российской государственной библиотеки (https://www.rsl.ru/), анализ публикаций авторов на Elibrary (https://elibrary.ru/defaultx.asp), поиск в сети Интернет информации об отдельных ученых, истории кафедр, институтов, университетов, включая опубликованные некрологи, поздравления с юбилеем, биографии, отдельные публикации о развитии почвоведения в России и СССР, а также неопубликованные данные, полученные от отдельных сотрудников Почвенного института им. В.В. Докучаева и МГУ им. М.В. Ломоносова.

Вся полученная информация была сведена в генеалогическое древо современного отечественного почвоведения.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Всего за рассматриваемый период кандидатские диссертации по почвоведению защищались в 26 научных или учебных заведениях (табл. 1).

Только в 9 организациях защиты диссертаций проводятся регулярно. В остальных защищается 1–2 диссертации за 10 лет, причем во многих из них лишь в начале анализируемого временного периода (2010–2011 гг.).

Необходимо обратить внимание, что в таблице 1 приведен перечень организаций, где состоялись защиты, а не где реально проводились исследования.

В таблице 2 представлены результаты анализа в разрезе направлений почвоведения. Разделение диссертаций по направлениям в некоторых случаях является достаточно условным, так же как и сам набор направлений. Но тем не менее анализ этой таблицы позволяет оценить в каких направлениях готовятся кандидаты наук в области почвоведения в разных организациях.

Таблица 1. Количество защищенных кандидатских диссертаций по годам
Table 1. Number of defended Ph.D. theses arranged by the years

Организация	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	итого
Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова	4	10	7	11	4	3	8	5	3	3	58
Башкирский государственный аграрный университет	2	7	2	6	1	2	4	3	5	8	40
Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева	5	6	0	4	1	5	3	2	0	3	29
Почвенный институт имени В.В. Докучаева	2	2	2	2	2	2	2	0	0	1	15
Воронежский государственный университет	0	5	3	4	0	2	0	0	0	0	14
Институт почвоведения и агрохимии СО РАН	2	4	0	4	0	1	0	0	0	2	13
Институт общей и экспериментальной биологии СО РАН	2	2	1	4	0	1	1	0	1	0	12
Национальный исследовательский Томский государственный университет	0	0	2	2	0	1	1	2	1	1	10
Кубанский государственный аграрный университет имени И.Т. Трубилина	0	1	1	3	2	0	1	0	0	0	8
Алтайский государственный аграрный университет	2	2	0	0	0	0	0	0	0	0	4
НИИ сельского хозяйства Юго-Востока РАСХН	2	1	0	0	0	0	0	0	0	0	3
Астраханский государственный университет	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	2
Государственный аграрный универ-	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	2

ситет Северного Зауралья											
Красноярский государственный аграрный университет	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2
Санкт-Петербургский государственный аграрный университет	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	2
ВНИИЗиЗПЭ РАСХН	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
Институт почвоведения Таджикской академии сельскохозяйственных наук	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
Сургутский государственный университет Ханты-Мансийского автономного округа – Югры	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
Биолого-почвенный институт ДВО РАН	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1
Санкт-Петербургский государственный университет	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1
Тюменская государственная сельскохозяйственная академия	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1
Красноярский государственный аграрный университет	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1
Кабардино-Балкарская государственная сельскохозяйственная академия им. В.М. Кокова	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1
Курская государственная сельскохозяйственная академия имени профессора И.И. Иванова	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
Нижегородская государственная сельскохозяйственная академия	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
Пермская государственная сельскохозяйственная академия имени Д.Н. Прянишникова	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1

Из таблицы следует, что больше всего диссертаций защищается в области плодородия почв, химии и загрязнения почв, а также генезиса почв и их гумусного состояния. Меньше всего защит зафиксировано в направлении физики почв. Лидером (отмечены зеленым цветом в таблице 2) по большинству направлений является факультет почвоведения МГУ им. М.В. Ломоносова. По 4 направлениям лидирует Башкирский государственный аграрный университет. Сибирские институты играют ведущую роль в области географии и оценки почв.

Генеалогический анализ научных руководителей аспирантов показал, что в настоящее время большая часть работ (65 из 226) защищается под руководством учеников В.В. Докучаева в 5-ом или 6-ом колене, 41 работа защищена под руководством учеников А.В. Советова в 5–7-ом колене, 14 работ – под руководством учеников С.С. Неуструева в 4–5-ом колене, 8 работ – под руководством учеников А.Н. Сабанина в 4–5-ом колене, и 7 работ – под руководством учеников И.В. Тюрина в 3-ем колене. Остальные диссертации (82) защищены под руководством или не почвоведов (химиков, физиков, биологов, экологов и т. п.), или под руководством почвоведов, чьи учителя в первом или втором поколении были не почвоведами.

Результаты анализа в виде отдельных генеалогических деревьев представлены на рисунках 1–5.

Полученные данные показали, что в настоящее время подготовка ученых-почвоведов на постоянной основе ведется в России в 8 организациях (табл. 1). В большинстве остальных организаций из 26, представленных в списке, последние защиты датированы 2010 и 2011 гг. По-видимому, это связано с тем, что диссертационные советы в них, работающие по специальности “почвоведение”, с начала 2010-х годов были закрыты. Это не говорит о том, что подготовка специалистов в этих организациях полностью остановилась. Это означает, что в них уже не хватает специалистов-почвоведов высокой квалификации для открытия диссовета по данной специальности, что является косвенным свидетельством угасания активности в этой области знаний.

Таблица 2. Количество защищенных кандидатских диссертаций по направлениям
Таблица 2. Number of defended Ph.D. theses arranged according to scientific fields

Организация	география	оценка	биология	биохимия	генезис	плодородие	загрязнение	химия	мониторинг	картография	деградация	палео	рекультивация	физика
Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова	2	2	0	9	9	3	7	4	5	5	4	3	3	2
Башкирский государственный аграрный университет	1	2	3	3	2	6	3	10	3	0	4	1	1	1
Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева	0	2	2	2	2	4	1	4	0	2	3	2	5	0
Почвенный институт имени В.В. Докучаева	1	1	2	1	1	2	1	2	0	3	0	0	1	0
Воронежский государственный университет	0	0	2	1	1	1	1	2	1	0	1	2	0	2
Институт почвоведения и агрохимии СО РАН	0	3	0	0	2	2	1	1	0	0	0	2	3	0
Институт общей и экспериментальной биологии СО РАН	3	1	1	1	2	2	1	1	0	0	0	0	0	0
Национальный исследовательский Томский государственный университет	1	0	0	1	2	1	0	4	0	0	0	1	0	0
Кубанский государственный аграрный университет имени И.Т. Трубилина	0	2	1	0	0	5	0	0	0	0	0	0	0	0
Алтайский государственный аграрный университет	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	1
НИИ сельского хозяйства Юго-Востока РАСХН	0	0	0	0	1	2	0	0	0	0	0	0	0	0
Астраханский государственный университет	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Государственный аграрный университет Северного Зауралья	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0
Красноярский государственный аграрный университет	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0
Санкт-Петербургский государственный аграрный университет	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0
ВНИИЗиЗПЭ РАСХН	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Институт почвоведения Таджикской академии сельскохозяйственных наук	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Сургутский государственный университет Ханты-Мансийского автономного округа – Югры	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
Биолого-почвенный институт ДВО РАН	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Санкт-Петербургский государственный университет	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
Тюменская государственная сельскохозяйственная академия	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
Красноярский государственный аграрный университет	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Кабардино-Балкарская государственная сельскохозяйственная академия им. В.М. Кокова	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
Курская государственная сельскохозяйственная академия имени профессора И.И. Иванова	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
Нижегородская государственная сельскохозяйственная академия	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
Пермская государственная сельскохозяйственная академия имени Д.Н. Прянишникова	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
Итого:	11	15	12	19	23	36	16	31	10	10	13	11	13	6

Лидерство в количестве защит на факультете почвоведения МГУ им. М.В. Ломоносова, так же как в РГАУ–МСХА имени К.А. Тимирязева, вполне закономерно в связи с наличием сильной аспирантуры, преподавателей высокой квалификации, приборной базы и штата чисто научных сотрудников (не преподавателей).

Небольшой негативный тренд в количестве защит в этих организациях все же обозначен. Но если в РГАУ–МСХА, по-видимому, он связан действительно с уменьшением количества защищающихся аспирантов, то в МГУ данное явление скорее всего обусловлено переориентацией факультета почвоведения на подготовку специалистов по экологии в ущерб подготовке ученых по специальности “почвоведение”.

Небольшое, но стабильное количество защит в Почвенном институте им. В.В. Докучаева объясняется количественными ограничениями на прием аспирантов в научных организациях страны, а также отсутствием условий для приема иногородних аспирантов.

В списке лидеров присутствует Башкирский государственный аграрный университет. Его ведущее положение, очевидно, обусловлено как наличием хорошей местной школы почвоведов, так и тем, что при закрытии диссоветов в близлежащих регионах страны все аспиранты теперь защищаются в БашГАУ, где диссовет по “почвоведению” удалось сохранить.

В таблице 2 представлены результаты анализа в разрезе защит по отдельным направлениям почвоведения. Всего выделено 14 направлений. При этом лишь несколько организаций демонстрируют возможности по подготовке специалистов по большинству из этих направлений. За последние 10 лет защиты по 10 и более направлениям из 14 состоялись в 5 организациях: МГУ, РГАУ–МСХА, Почвенный институт, БашГАУ и Воронежский госуниверситет. Это свидетельствует о том, что пречисленные организации на данный момент действительно являются основными в стране центрами подготовки ученых-почвоведов. В остальных организациях, по всей видимости, есть специалисты высокой квалификации лишь в отдельных направлениях почвоведения. Так, например, судя по данным таблицы 2, более активны в подготовке специалистов в области географии почв Институт общей и экспе-

риментальной биологии СО РАН и МГУ, в области плодородия – БашГАУ и Кубанский ГАУ имени И.Т. Трубилина, в области рекультивации почв – РГАУ–МСХА.

По большинству направлений в среднем защищается в стране около 1 диссертации в год. Небольшое количество диссертаций, защищенных по физике почв, объясняется тем, что для подготовки диссертации на современном уровне нужно хорошее научное оборудование, которое не во всех организациях есть. Кроме того, большая часть работ в этой области, скорее всего, пограничная и защищается по другой научной специальности – "агрофизика". Одновременно при наличии подобной же смежной научной специальности "агрохимия", по направлениям плодородия почв и химии почв по специальности "почвоведение" в среднем защищается более 3 диссертаций в год. Вероятнее всего, это связано с большей практической востребованностью перечисленных направлений почвоведения в настоящее время, а также с тем, что многие региональные аграрные университеты имеют специалистов-почвоведов высокой квалификации именно в этих направлениях.

Наличие основных центров подготовки ученых-почвоведов сказывается и на географии проводимых исследований. Часто материал для диссертаций аспиранты собирают в регионе, где они проходят обучение. Но при этом чем крупнее научный центр, тем шире география объектов исследования. Так, например, из всех диссертаций, защищенных в МГУ, одна треть базируется на данных, собранных в Московской и прилегающих областях. Материал для диссертаций, защищенных в БашГАУ, почти на 100% собран в Предуралье и близлежащих регионах, а в Кубанском ГАУ – в Предкавказье. В организациях, где количество защит невелико, практически все диссертации основаны на локальных данных.

Таким образом, локализация подготовки ученых-почвоведов в отдельных центрах также сказывается и на географии проведения научных почвенных работ в стране. Так, к примеру, количество научных публикаций по почвам Башкортостана должно расти гораздо быстрее, чем количество публикаций по почвам Ульяновской области и, соответственно, изученность этих почв будет выше.

“Специализация” организаций на подготовке кадров по тому или иному направлению тесно связана с историей развития почвоведения в них и с существующими там научными школами.

Связь с современными защитами прослеживается лишь у пяти непосредственных учеников В.В. Докучаева: Захарова С.А., Тумина Г.М., Глинки К.Д., Димо Н.А. и Сибирцева Н.М. (рис. 1). Из этого направления больше всего защит (33 диссертации) принадлежит “ветке” учеников С.А. Захарова, к которой относятся многие почвоведы МГУ. На втором месте защиты учеников Г.М. Тумина (17 диссертаций), представленные в основном Воронежской школой почвоведов. На “ветку” учеников К.Д. Глинки приходится 13 защит, 3 – Н.А. Димо и 1 защита – учеников Н.М. Сибирцева.

Это, конечно же, не означает, что вклад других учеников В.В. Докучаева в развитие отечественного почвоведения невелик. Речь идет лишь о подготовке ученых-почвоведов.

Из учеников А.В. Советова связь с современными защитами прослеживается лишь у П.А. Костычева – В.Р. Вильямса (30 диссертаций) и у С.П. Кравкова (11 диссертаций) (рис. 2). В этих “ветках” наиболее широко представлена школа почвоведения РГАУ–МСХА, но также и много региональных школ (например, Сибирская школа).

Связь школы А.Н. Сабанина с современными защитами прослеживается через одного его непосредственного ученика – В.В. Геммерлинга (8 диссертаций) (рис. 3).

Связь школы С.С. Неуструева прослеживается в 12 защищенных диссертациях (рис. 4), а школы И.В. Тюрина – в 7 диссертациях (рис. 5).

Таким образом, подготовка ученых-почвоведов для развития современного почвоведения продолжается преимущественно трудами учеников С.А. Захарова, П.А. Костычева – В.Р. Вильямса, Г.М. Тумина, К.Д. Глинки и С.П. Кравкова.

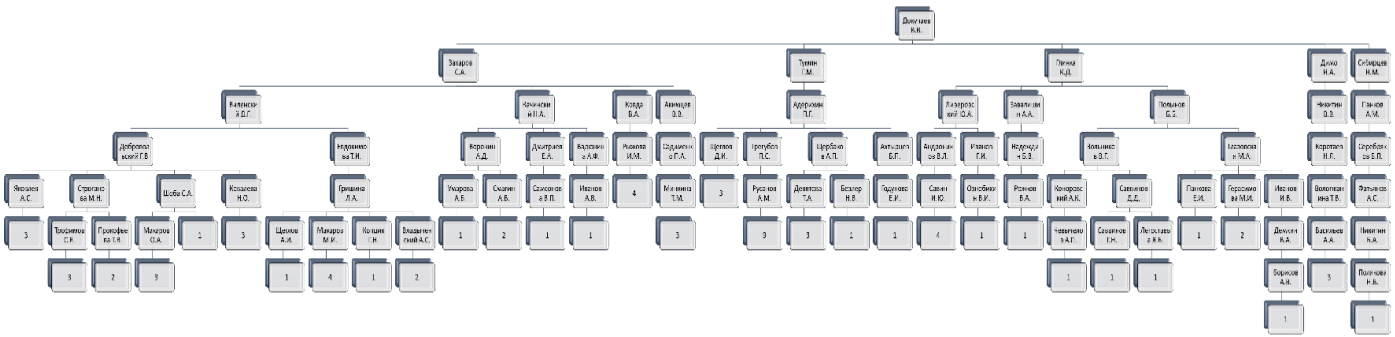

Рис. 1. Ученики школы В.В. Докучаева (цифры означают количество защитившихся аспирантов).
Fig. 1. V.V. Dokuchayev School followers (the figures indicate the number of postgraduate students defended Ph.D. theses).

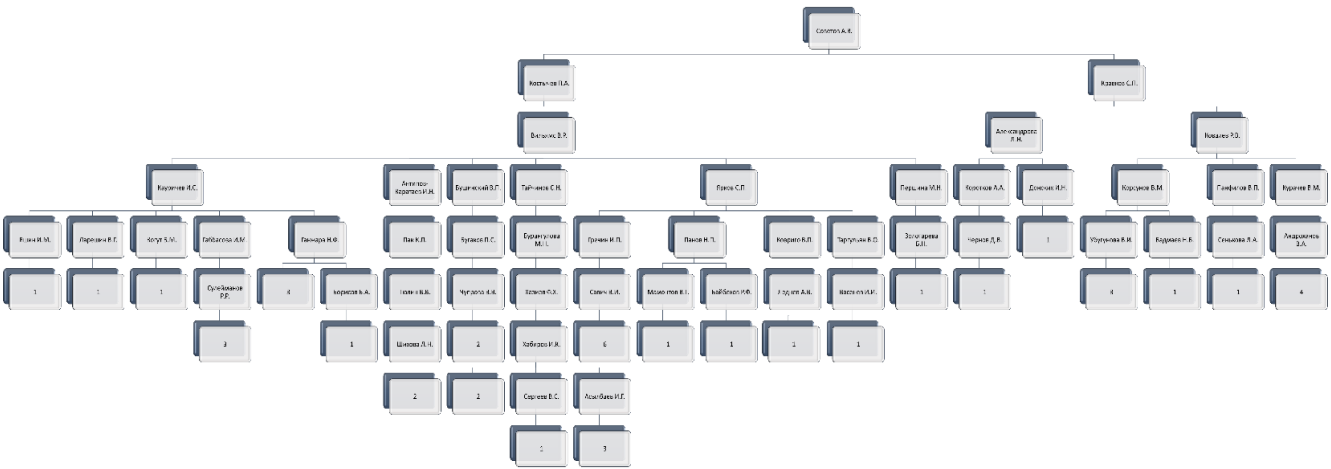

Рис. 2. Ученики школы А.В. Советова (цифры означают количество защитившихся аспирантов).
Fig. 2. A.V. Sovetov School followers (the figures indicate the number of postgraduate students defended Ph.D. theses).

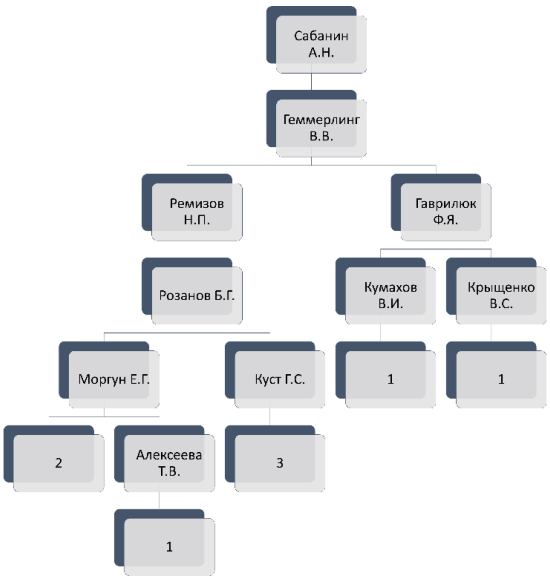

Рис. 3. Ученики школы А.Н. Сабанина (цифры означают количество защитившихся аспирантов).
Fig. 3. A.N. Sabanin School followers (the figures indicate the number of postgraduate students defended Ph.D. theses).

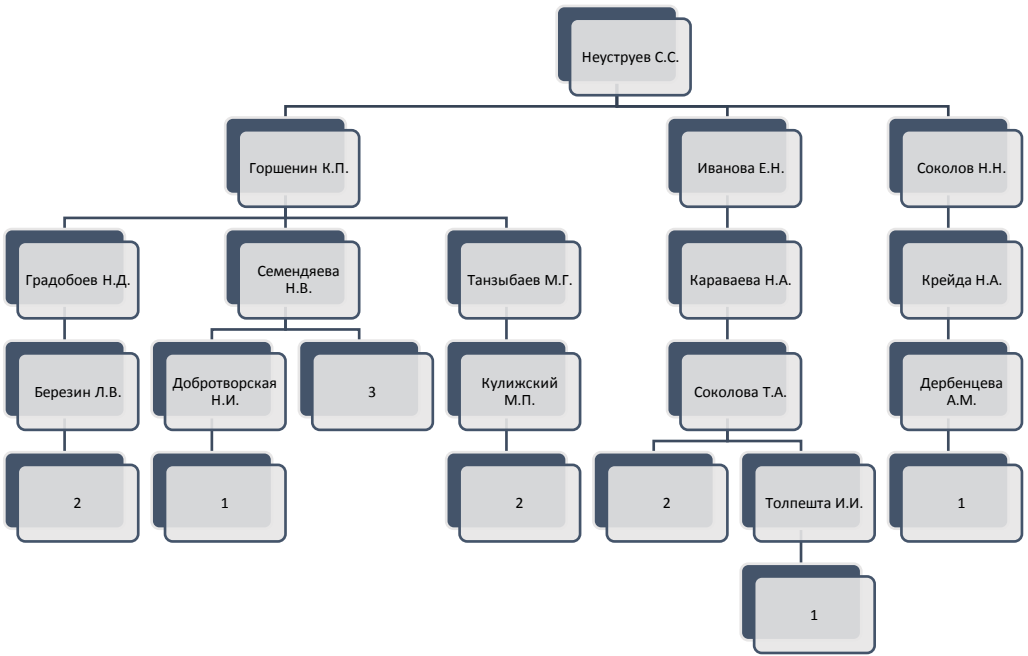

Рис. 4. Ученики школы С.С. Неуструева (цифры означают количество защитившихся аспирантов).
Fig. 4. S.S. Neustruev School followers (the figures indicate the number of postgraduate students defended Ph.D. theses).

Рис. 5. Ученики школы И.В. Тюрина (цифры означают количество защитившихся аспирантов).
Fig. 5. I.V. Turin School followers (the figures indicate the number of postgraduate students defended Ph.D. theses).

Данные результаты показывают лишь связь основателей отечественного почвоведения с современной подготовкой кадров ученых-почвоведов. Результаты анализа не отражают вклад отдельных школ в развитие почвоведения в целом. Большое количество высококвалифицированных современных почвоведов не занимаются подготовкой научных кадров или не уделяют этому большого внимания, нацелившись лишь на развитие самой науки.

Но то, каких ученых-почвоведов готовят сегодня, предопределяет и общий тренд развития отечественного почвоведения. Если сегодня больше всего готовят почвоведов, специализирующихся на изучении химии почв, то именно это направление почвоведения и получит преимущественное развитие в ближайшие годы. Если Башкирский ГАУ сегодня является одним из лидеров в области подготовки ученых-почвоведов, то завтра почвы этого региона будут лучше исследованы, а местная научная школа и ее направления исследований будут все больше укрепляться и развиваться.

С этой точки зрения, в течение последних 10 лет наблюдается укрепление научных школ почвоведов – учеников С.А. Захарова и П.А. Костычева – В.Р. Вильямса. Именно с этим связано и большое количество защит в области плодородия и химии почв. Хорошие темпы подготовки ученых-почвоведов поддерживаются в МГУ и РГАУ–МСХА, а также в Башкирском ГАУ. Снизилась активность в подготовке ученых-почвоведов в Сибирских институтах и в Воронежском университете, а также во многих региональных институтах и университетах. Таким образом, происходит концентрация подготовки ученых-почвоведов в 5–6 центрах страны.

Конечно же, необходимо учитывать, что полученные данные отражают лишь подготовку ученых по специальности “почвоведение” и не включают диссертации, защищенные по смежным дисциплинам или на стыке с ними: “агрофизика”, “агрохимия”, “мелиорация”, “экология” и др.

Также очевидно, что выбранный принцип генеалогического анализа весьма условен. Ученый может защитить диссертацию под руководством одного ученого, но впоследствии активно участвовать в работе другой школы почвоведения. Тем не менее, в своем анализе мы исходили из того, что формирование ученого и

навыки научной деятельности ученый получает именно во время обучения в аспирантуре.

ВЫВОДЫ

1. В настоящее время подготовка ученых-почвоведов на постоянной основе ведется в России в 8 организациях:

- Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова;
- Башкирский государственный аграрный университет;
- Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева;
- Почвенный институт имени В.В. Докучаева;
- Воронежский государственный университет;
- Институт почвоведения и агрохимии СО РАН;
- Институт общей и экспериментальной биологии СО РАН;
- Национальный исследовательский Томский государственный университет.

2. Лишь несколько организаций демонстрируют возможности по подготовке специалистов по большинству из этих направлений. За последние 10 лет защиты по 10 и более направлениям из 14 были в 5 организациях: МГУ, РГАУ–МСХА, Почвенный институт, Башкирский ГАУ и Воронежский госуниверситет. В остальных организациях, по-видимому, есть специалисты высокой квалификации лишь в отдельных направлениях почвоведения.

3. Локализация подготовки ученых-почвоведов в отдельных центрах сказывается и на географии проведения научных почвенных работ в стране.

4. Подготовка ученых-почвоведов для развития современного почвоведения продолжается преимущественно трудами учеников С.А. Захарова, П.А. Костычева – В.Р. Вильямса, Г.М. Тумина, К.Д. Глинки и С.П. Кравкова. В течение последних 10 лет наблюдается укрепление научных школ почвоведов – учеников С.А. Захарова и П.А. Костычева – В.Р. Вильямса.

5. Происходит концентрация подготовки ученых-почвоведов в 5–6 центрах страны.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Беляев А.Б.* Воронежская региональная школа почвоведов. Воронеж: ВГУ, 2008. 44 с.
2. *Березин Л.В., Азаренко Ю.А.* Вклад К.П. Горшенина в развитие агропочвоведения Сибири (к 130-летию со дня рождения и 100-летию Омского государственного аграрного университета) // Почвы и окружающая среда. 2018. № 1(2). С. 80–88.
3. *Виленский Д.Г.* Почвоведение в Московском университете к 185-летнему его юбилею // Почвоведение. 1940. № 6. С. 3–7.
4. *Герасимов И.П., Иванова Е.Н.* История и современное состояние почвоведения: Памяти проф. С.С. Неуструева (К 20-летию со дня его смерти) // Почвоведение. 1948. № 12. С. 742–746.
5. *Димо Н.А.* Некоторые даты из истории русского почвоведения // Почвоведение. 1946. С. 6–10.
6. *Докучаев В.В.* Русский чернозем: Отчет Императорскому вольному экономическому обществу: с почвенной картой и 12 рисунками в тексте. Санкт-Петербург: Типография Деклерона и Евдокимова, 1883. Т. III, IV. 376 с.
7. *Иванов И.В.* История отечественного почвоведения: Развитие идей, дифференциация, институциализация. Книга первая. 1870–1947 гг. СПб.: Наука, 2003. 397 с.
8. История и методология естественных наук. Вып. XXIV: Почвоведение / Науч. ред. Г.В. Добровольский. М.: МГУ, 1980.
9. *Козлова Л.А.* “Научная школа” в научной политике и социальном исследовании // Вестник института социологии. 2014. № 3(10). С. 45–65.
10. *Костенков Н.М., Михайлова Н.А.,Ознобихин В.И.* Почвенные исследования на Дальнем Востоке России // Вестник ДВО РАН. 2005. № 5. С. 119–126.
11. *Матинян Н.Н., Бахматова К.А., Горбунова В.С., Колодка В.П., Гостинцева Е.В.* Почвоведение в Санкт-Петербурге. XIX–XXI вв.: Биографические очерки. СПб.: Нестор-История, 2013. 404 с.
12. Международная конференция “Почвоведение: история, социология, методология”. М.: Наука, 2005. 422 с.
13. *Прасолов Л.И.* Четверть века советского почвоведения (1917–1942 гг.) // Почвоведение. 1943. № 1–2. С. 3–7.
14. Проблемы истории методологии и социологии почвоведения. Доклады 3-ей Всерос. конф. с междун. участием / отв. ред. И.В. Иванов. Пущино: КМК, 2017. 352 с.

15. *Савостьянов В.К.* Профессор П.С. Бугаков, педагог и ученый (к 90-летию со дня рождения). Абакан: ООО "Кооператив "Журналист", 2013. 44 с.
16. *Сычева С.А.* Женщины-почвоведы. Биографический справочник о российских и советских исследовательницах почв / Под ред. Г.В. Добровольского и Н.Г. Рыбальского. М.: НИА–Природа, 2003. 440 с.
17. *Тюрин И.В.* Развитие почвоведения в СССР за 40 лет // Почвоведение. 1957. № 11. С. 1–13.
18. Фирсова В.П. Расскажу вам о себе и своих коллегах. Екатеринбург. 1996. 114 с.

REFERENCES

1. Belyayev A.B., *Voronezhskaya regional'naya shkola pochvovedov* (Voronezh Regional School of Soil Science), Voronezh: VGU, 2008. 44 p.
2. Berezin L.V., Azarenko Yu.A., Vklad K.P. Gorshenina v razvitiye agropochvovedeniya Sibiri (k 130-letiyu so dnya rozhdeniya i 100-letiyu Omskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta) (Contribution of K.P. Gorshenin in the development of agricultural soil science in Siberia (to the 130th anniversary of the birth and the 100th anniversary of the Omsk State Agrarian University) // *Pochvy i okruzhayushchaya sreda*, 2018, No. 1(2). pp. 80–88.
3. Vilenskiy D.G., Pochvovedeniye v Moskovskom universitete k 185-letnemu yego yubileyu (Soil science at Moscow University to its 185th anniversary) // *Pochvovedeniye*, 1940, No. 6, pp. 3–7.
4. Gerasimov I.P., Ivanova Ye.N., Istoriya i sovremennoye sostoyaniye pochvovedeniya: Pamyati prof. S.S. Neustruyeva (History and current state of soil science: In memory of prof. S.S. Neustruev) // *Pochvovedeniye*, 1948, No. 12, pp. 742–746.
5. Dimo N.A., Nekotoryye daty iz istorii russkogo pochvovedeniya (Some dates from the history of Russian soil science) // *Pochvovedeniye*, 1946, pp. 6–10.
6. Dokuchayev V.V., *Russkiy chernozem: Otchet Imperatorskomu vol'nomu ekonomicheskomu obshchestvu: s pochvennoy kartoy i 12-yu risunkami v tekste* (Russian Chernozems: Report to the Imperial Free Economic Society: with a soil map and 12 figures in the text), Saint Petersburg: Tipografiya Deklerona i Yevdokimova, 1883, Vol. III, IV, 376 p.
7. Ivanov I.V., *Istoriya otechestvennogo pochvovedeniya: Razvitiye idey, differentsiatsiya, institutsializatsiya. Book 1 1870–1947* (History of Russian soil science: Development of ideas, differentiation, institutionalization. Book 1 1870–1947), Saint Petersburg: Nauka, 2003, 397 p.

8. Dobrovol'skiy G.V. (Ed.), *Istoriya i metodologiya yestestvennykh nauk. Vyp. XXIV: Pochvovedeniye* (History and methodology of natural sciences. Vol. XXIV: Soil Science), Moscow: MGU, 1980.
9. Kozlova L.A., "Nauchnaya shkola" v nauchnoy politike i sotsial'nom issledovanii ("Scientific school" in science policy and social research) // *Vestnik instituta sotsiologii*, 2014, No. 3(10), pp. 45–65.
10. Kostenkov N.M., Mikhaylova N.A., Oznobikhin V.I., Pochvennyye issledovaniya na Dal'nem Vostoke Rossii (Soil research in the Far East of Russia) // *Vestnik DVO RAN*, 2005, No. 5, pp. 119–126.
11. Matinyan N.N., Bakhmatova K.A., Gorbunova V.S., Kolodka V.P., Gostintseva Ye.V., *Pochvovedeniye v Sankt-Peterburge. XIX-XXI vv.: Biograficheskiye ocherki* (Soil science in St. Petersburg. XIX-XXI centuries: Biographical essays), Saint Petersburg: Nestor-Istoriya, 2013, 404 p.
12. *Dokladi Mezhdunarodnoy konferentsii "Pochvovedeniye: istoriya, sotsiologiya, metodologiya"* (Proc. Intern. Conf. "Soil Science: History, Sociology, Methodology"), Moscow: Nauka, 2005, 422 p.
13. Prasolov L.I., Chetvert' veka sovetskogo pochvovedeniya (1917–1942) (A quarter of a century of Soviet soil science (1917–1942)) // *Pochvovedeniye*, 1943, No. 1–2, pp. 3–7.
14. Ivanov I.V. (Ed.), *Dokladi 3-ei Vseros. konf. s mezhdun. uchastiyem "Problemy istorii metodologii i sotsiologii pochvovedeniya"* (Proc. Of the 3rd All-Russian. Conf. with Intern. participation "Problems of the history of the methodology and sociology of soil science"), Pushchino: KMK, 2017, 352 p.
15. Savost'yanov V.K., *Professor P.S. Bugakov, pedagog i uchenyy (k 90-letiyu so dnya rozhdeniya)* (Professor P.S. Bugakov, teacher and scientist (on the occasion of the 90th Birthday)), Abakan: OOO "Kooperativ "Zhurnalist", 2013, 44 p.
16. Sycheva S.A., (Eds: Dobrovol'skiy G.V., Rybal'skiy N.G.), *Zhenshchiny-pochvovedy. Biograficheskiy spravochnik o rossiyskikh i sovetskikh issledovatel'nitsakh pochv* (Female soil scientists. Biographical Handbook of Russian and Soviet Soil Researchers), Moscow: NIA–Priroda, 2003, 440 p.
17. Tyurin I.V., Razvitiye pochvovedeniya v SSSR za 40 let (The development of soil science in the USSR during 40 years) // *Pochvovedeniye*, 1957, No. 11, pp. 1–13.
18. Firsova V.P., *Rasskazhu vam o sebe i svoikh kollegakh* (I will tell you about myself and my colleagues), Yekaterinburg, 1996, 114 p.

НАУЧНЫЕ РЕЦЕНЗИИ

УДК 631.4

DOI: 10.19047/0136-1694-2020-103-211-218

Ссылки для цитирования:
Апарин Б.Ф. Новое прочтение // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2020. Вып. 103. С. 211-218. DOI: 10.19047/0136-1694-2020-103-211-218
Cite this article as:
Aparin B.F., New reading, Dokuchaev Soil Bulletin, 2020, V. 103, pp. 211-218, DOI: 10.19047/0136-1694-2020-103-211-218

Новое прочтение*

© 2020 г. Б. Ф. Апарин[1,2]

[1]Центральный музей почвоведения им. В.В. Докучаева – филиал ФИЦ "Почвенный институт им. В.В. Докучаева", Россия 199034, Санкт-Петербург, Биржевой проезд, д. 6, e-mail: soilmuseum@bk.ru.

[2]Санкт-Петербургский государственный университет, Россия, 199034, Санкт-Петербург, Университетская наб., д. 7–9.

Поступила в редакцию 04.06.2020, *принята к публикации* 10.09.2020

Резюме: В статье дается краткий анализ содержания монографии "Почвы Республики Беларусь", опубликованной в 2019 году в Минске. Книга представляет собой синтез главных достижений научной мысли в области теоретического и прикладного почвоведения. Она является новым прочтением накопленных за последние 40 лет в области генетических исследований почвенно-картографических и земельно-оценочных работ. Публикация монографии "Почвы Республики Беларусь" вызовет интерес у специалистов и ученых разного естественно-научного профиля, а также у практиков, постоянно работающих на земле.

Ключевые слова: почвы Беларуси, деградация, оценка почв, агрогенная трансформация почв.

**В.В. Лапа и др.* Почвы Республики Беларусь. Минск: ИВЦ Минфина, 2019. 632 с. Рецензия на монографию.

New reading*

B. F. Aparin[1,2]

[1]Central Soil Museum by V.V. Dokuchaev – Branch of the Federal Research Centre "V.V. Dokuchaev Soil Science Institute", 6 Birzhevoy proezd, Saint Petersburg 199034, Russian Federation, e-mail: soilmuseum@bk.ru.

[2]Saint Petersburg State University, 7–9 Universitetskaya Emb., Saint Petersburg 199034, Russian Federation.

Received 04.06.2020, *Accepted 10.09.2020*

Abstract: The article provides the summary analysis of the content of the monograph "Soils of the Republic of Belarus" published in 2019 in Minsk. The book is a synthesis of the main achievements of scientific thought in the field of theoretical and applied soil science. It represents the new reading of the accumulated works over the past 40 years in the field of genetic research, soil mapping and land assessment. The monograph "Soils of the Republic of Belarus" will attract a lot of attention of specialists and scientists of various natural science profiles, as well as of practitioners who constantly work in the field.

Keywords: soils of Belarus, degradation, assessment of soils, agrogenic transpiration of soils.

В 2019 году в научном сообществе почвоведов произошло знаменательное событие: вышла в свет монография "Почвы Республики Беларусь". Она подготовлена коллективом ученых института почвоведения и агрохимии (БелНИИПА), последователей выдающихся представителей Белорусской научной школы почвоведения: Я.Н. Афанасьева, П.П. Рогового, А.Г. Медведева, Т.Н. Кулаковской, Н.И. Смеяна. Следует отметить, что институт с 1931 г. осуществляет научно-методическое обеспечение всей совокупности почвенных и агрохимических мероприятий для аграрного комплекса страны.

* *V.V. Lapa et al.,* Soils of the Republic of Belarus, Minsk: Information Center of the Ministry of Finance, 2019, 632 p. Review of the monograph.

Эта публикация представляет интерес в двух аспектах: не только для почвоведов и специалистов Беларуси, но и для почвоведов других научных школ, составлявших в недавнем прошлом единое сообщество ученых одной страны. Для большинства республик, входивших в состав СССР, прошедшие 30 лет стали периодом ломки устоев государственной системы землепользования, управления почвенными ресурсами и плодородием на основе регулярного агрохимического обследования почв. Последствием этого стало уменьшение площадей сельхозугодий, нарушение севооборотов, сокращение доз минеральных и органических удобрений, обострение деградационных процессов в почвах, снижение их плодородия. Опыт Беларуси интересен тем, что в ней не произошло коренного переустройства в системе землепользования и управления почвенным плодородием. В республике сохранилась тесная взаимосвязь между производителями научных знаний и их непосредственным потребителем – земледельцами.

В рассматриваемой монографии прослеживается преемственность и традиции строго научного обобщения и интерпретации экспериментальных данных, свойственные двум предшествующим монографиям, посвященным почвам БССР (1952 г., 1974 г.). За последующие 40 лет в республике были проведены разносторонние фундаментальные и прикладные исследования почв, различным аспектам которых посвящено около двух десятков монографий. Характерной особенностью последней монографии является глубокий синтез главных достижений научной мысли в области теоретического и прикладного почвоведения.

Обобщать ученым института было что. С 1960 г., когда началось крупномасштабное исследование земель колхозов и совхозов, было проведено 13 туров обследования почв. В настоящее время все почвы сельхозугодий обследуются с периодичностью 1 раз в 4 года по следующим параметрам: степень кислотности, содержание гумуса, подвижных форм фосфора, калия, меди, бора, цинка, кальция, магния, а также цезия-137 и стронция-90.

В республике регулярно проводится известкование почв и внесение органических и минеральных удобрений. В целом обеспечено постепенное улучшение агрохимических показателей пахотных почв, несмотря на уменьшение доз минеральных (до 150

кг/га д. в.) и органических удобрений (до 6.3 т/га) в период с 1991 по 2005 гг. К 2015 г. дозы минеральных удобрений несколько превысили уровень 1990 г. и составили 263 кг/га д. в. За последние 40 лет кислотность снизилась в 1.1 раза, содержание гумуса возросло в 1.3 раза, подвижных форм фосфора и калия в 1.9 и 2.1 раза соответственно. Как следствие, урожайность зерновых и зернобобовых достигла 26.5 ц/га, картофеля – около 400 ц/га. На сельскохозяйственные земли приходится 41% от общего земельного фонда Республики. Беларусь входит в число первых 20 стран мира по величине доли пахотных земель на одного человека – 0.6 га. Учитывая стабильную урожайность сельхозкультур за последние годы, Беларусь в условиях нарастающего продовольственного кризиса обеспечила не только свою продовольственную безопасность, но и стала донором сельхозпродукции.

В этом успехе несомненен вклад сельскохозяйственной науки и в значительной мере БелНИИПА. Рецензируемая монография является хорошим подтверждением данного тезиса. Вопросами научного обеспечения сельского хозяйства посвящено 4 из 8 глав монографии. В главе 3 рассматривается качественное состояние почв сельскохозяйственных земель республики. С 1995 г. произошло сокращение сельскохозяйственных земель на 837 тысяч гектар. Эти изменения произошли в результате оптимизации землепользования сельскохозяйственных организаций. Земли, оцениваемые величиной менее 20 баллов, были изъяты из сельскохозяйственного оборота и переданы лесохозяйственным и другим землепользователям. За последние 60 лет лесистость увеличилась почти вдвое и достигла максимальных значений за более чем столетний период (42.3% земельного фонда).

В структуре сельскохозяйственных угодий преобладают пахотные земли – 67.4%. На долю луговых приходится 31.2%. Удельный вес осушенных сельскохозяйственных земель составляет около 40%, в том числе земли, осушенные закрытым дренажем, составляют 65%. Мелиоративные системы с двусторонним регулированием водного режима занимают 22%. В компонентном составе почвенного покрова пахотных земель насчитывается около 440 почвенных разновидностей, преобладают дерново-

подзолистые (47%) и дерново-подзолистые заболоченные (40.5%). На долю торфяно-болотных, дерновых и дерново-карбонатных заболоченных приходится около 10%.

В республике проведены работы по оцифровке почвенных карт крупномасштабного картографирования сельскохозяйственных земель (1 : 10 000), создана и постоянно пополняется данными единая Почвенно-информационная система, ведутся работы по экспертной геоинформационной системе, соединяющей в себе базу данных характеристик почв и базу знаний по оптимизации условий возделывания сельскохозяйственных культур.

Важным результатом исследований ученых стала разносторонняя оценка качества почв сельхозугодий по многим параметрам их плодородия: увлажненности, завалуненности, контурности, агрохимическим показателям (NPK, pH, гумус, микроэлементы).

Обобщение и синтез материалов крупномасштабного картографирования почв выявил различные деградациионные процессы на сельскохозяйственных угодьях: заболачивание, частичную или полную сработку органогенного слоя осушенных торфяных почв, погребение гумусового горизонта, потерю поглощенных оснований. В наибольшей мере деградационные процессы проявились в торфяных почвах. В общей сложности процессы негативной антропогенной трансформации почв отмечены на 3.3% от сельскохозяйственных угодий. Были исследованы причины и механизмы деградации почв и разработаны рекомендации по их предотвращению.

Агропроизводственная группировка почв для сельскохозяйственных целей сохраняет важное место в оценке почв (глава 7). Первая группировка была создана в 1960 г. В ней было выделено 11 агрогрупп. По мере накопления знаний о почвах число агрогрупп увеличилось. Последующие работы по совершенствованию разделения почв на агрогруппы привели к созданию специализированных группировок по их пригодности для возделывания отдельных культур, а также для организации и введения севооборотов в хозяйствах. В качестве показателей степени пригодности под культуры (4 степени) были выбраны следующие: тип почв, степень увлажнения, гранулометрический состав почв, материнской и подстилающих пород, эродированность, завалуненность и кис-

лотность. Группировки почв, выполненные для территории всей республики и отдельных хозяйств, находят применение в целях планирования посевных площадей, при выращивании культур по полям севооборотов и т. д.

Завершается блок исследований по агропроизводственной характеристике почв материалами по оценке земель в условных единицах (глава 8). Теория бонитировки в республике прогрессивно развивалась по мере накопления новых знаний о почвах, реформирования сельского хозяйства и изменения земельных отношений. Основой оценки плодородия почв является шкала оценочных баллов, объективно отражающих их плодородие при возделывании различных сельскохозяйственных культур. Современная шкала балльной оценки включает 332 почвенные разновидности по 16 сельскохозяйственным культурам. Баллы плодородия почв могут использоваться самостоятельно, а также служить основой для оценки технологических свойств и местоположения рабочих участков, оценки земли как средства сельскохозяйственного производства. Обобщающими показателями качества земельных участков являются дифференцированный и нормативно чистый доход, общий балл кадастровой оценки земель и ее кадастровая стоимость.

Центральное место в монографии как по объему (378 с.), так и по информативной насыщенности занимает глава 5, посвященная агрогенной трансформации состава и свойств основных типов почв сельскохозяйственных земель. Глава насыщена огромным количеством фактического материала, полученного в результате применения арсенала полевых и лабораторных исследований почв и процессов, статистической обработки данных всех туров агрохимического обследования земель. Несомненным достоинством оценки динамики основных показателей плодородия и качества почв является опора на фундаментальные исследования генезиса почв, их состава и свойств, почвообразующих процессов.

Характер и тренды агрогенной трансформации почв оценивались по оригинальной методике, разработанной в Институте почвоведения и агрохимии. Она состоит из нескольких разделов:

– Создание рядов основных типов пахотных почв разных сроков освоения и их естественных аналогов.

– Расчет среднестатистических величин свойств естественных и пахотных почв и установление генетических критериев, отражающих эти изменения.

– Определение величин отклонений свойств пахотных почв по сравнению с естественными аналогами.

– Определение суммарного показателя степени изменения.

– Экологическая оценка степени трансформации почв (слабая, умеренная, сильная, очень сильная).

Изложенная в книге методика может быть успешно использована и в других регионах.

Главу 6 монографии можно рассматривать как тематическое продолжение пятой главы. В ней акценты делаются на выявлении общих закономерностей в пространственно-временном изменении почв под влиянием осушительной мелиорации, водной и ветровой эрозии, а также загрязнения почв соединениями хлора, натрия и техногенными радиоактивными элементами.

В начале главы авторы анализируют изменения минералогического и гранулометрического составов минеральной матрицы пахотных почв. Установлено, что в пахотных почвах республики синхронно протекают два противоположных процесса: аградация глинистых минералов и деградация. Баланс ила в гумусово-аккумулятивных горизонтах пахотных почв суглинистого гранулометрического состава отрицательный, песчаного – положительный. Причина этого явления не ясна.

Актуальной проблемой для Беларуси остается загрязнение почв цезием-137 и стронцием-90 в результате аварии на Чернобыльской АЭС. Мониторинг радионуклидов в почвах показал, что с 1992 по 2018 гг. наблюдается ежегодное сокращение площадей сельскохозяйственных земель с плотностью загрязнения выше 37 кБк/м^2 в среднем на 1.5–2%; стронцием-90 с плотностью загрязнения выше 5.55 кБк/м^2 – в среднем на 15–16 тысяч га ежегодно.

Почвоведы республики всегда уделяли внимание почвенному районированию как основе планирования рационального использования почвенно-земельных ресурсов.

История и современное состояние районирования рассматриваются в главе 5. Первое почвенно-географическое районирование было опубликовано в книге “Почвы БССР” (1952 г.). Вторая

схема почвенно-географического районирования была разработана в 70-х годах. В нем появился еще один таксономический уровень – провинция, число округов выросло до 7, число районов уменьшилось на 2 единицы. В 90-х годах было разработано почвенно-экологическое районирование, основной таксономической единицей которого был принят район. Это районирование стало базовым для дальнейших работ по интегральной оценке почвенно-земельных ресурсов административных районов, типизации земель, разработки систем земледелия и т. д.

Завершается монография главой 9 “Охрана почв Беларуси”. Правовой базой охраны почв в республике в настоящее время признан “Кодекс Республики Беларусь о земле” (2008 г.) и закон Республики Беларусь “Об охране окружающей среды”, в котором понятие “почва” подменяется понятием “земля”. Остается пожелать почвоведам Беларуси добиться принятия самостоятельного закона об охране почв. Для этого есть все основания, как показывает рецензируемая монография.

Рецензируемая монография является плодом работы большого коллектива авторов, что не сказалось на целостности изложения объемного (632 с.) научного труда. Книга хорошо иллюстрирована многочисленными графиками, картами, таблицами, фотографиями. После каждой главы приводится обширный список литературных источников по рассматриваемой теме. Важно отметить, что авторы не замыкаются на региональных исследованиях, а широко используют труды ученых других научных школ. Вне всякого сомнения, монография “Почвы Республики Беларусь” вызовет интерес у специалистов и ученых разного естественно-научного профиля, а также у практиков, постоянно работающих на земле.

Научное издание

Бюллетень Почвенного института
имени В.В. Докучаева

Выпуск 103

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 25.09.2020 г.
Подписано в печать 25.09.2020 г.
Формат 60×84/16. Бумага офсетная.
Усл. печ. л. 12,8 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