

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

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

БЮЛЛЕТЕНЬ

ПОЧВЕННОГО ИНСТИТУТА

имени В.В. ДОКУЧАЕВА

Выпуск 104

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 104

**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. Пушкирова, 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

Динамика факторов почвообразования и их влияние на технологию земледелия в Каменной степи <i>Исаев В.А., Белобров В.П., Иванов А.Л.</i>	5
Индикаторы качества почв пахотных угодий РФ <i>Столбовой В.С., Гребенников А.М.</i>	31
Современное состояние орошаемых почв юга Приволжской возвышенности <i>Зинченко Е.В., Горохова И.Н., Круглякова Н.Г., Хитров Н.Б.</i>	68
Современные методы мониторинга ветровой эрозии почв <i>Романовская А.Ю., Савин И.Ю.</i>	110
Цифровое картографирование степени эродированности почв с использованием моделей фактор – свойство и фактор – процесс – свойство (юг Среднерусской возвышенности) <i>Смирнова М.А., Жидкин А.П., Лозбенев Н.И., Заздравных Е.А., Козлов Д.Н.</i>	158
Сравнение методов цифрового анализа изображений для морфометрической характеристики почвенных агрегатов в шлифах <i>Плотникова О.О., Романис Т.В., Куст П.Г.</i>	199
Болотные торфяные почвы таежной и подтаежной зон Западной Сибири на цифровой модели почвенной карты России масштаба 1 : 2 500 000 в формате классификации почв России <i>Шишконокова Е.А., Аветов Н.А., Ананко Т.В., Герасимова М.И., Савицкая Н.В.</i>	223
К вопросу об изучении пылевидных образований в городских экосистемах <i>Укарханова Д.Т., Московченко Д.В., Юртаев А.А.</i>	241

CONTENTS

Dynamics of soil formation factors and their influence on agricultural technology in the Kamennaya Steppe <i>Isaev V.A., Belobrov V.P., Ivanov A.L.</i>	5
Soil quality indicators of arable lands in the Russian Federation <i>Stolbovoy V.S., Grebennikov A.M.</i>	31
Modern state of irrigated soils at the south of the Volga upland <i>Zinchenko E.V., Gorokhova I.N., Kruglyakova N.G., Khitrov N.B.</i>	68
Modern techniques for monitoring wind soil erosion <i>Romanovskaya A.Yu., Savin I.Yu.</i>	110
Digital mapping of erosion degree of soils using the factor – property and factor – process – property models (the south of the Central Russian upland) <i>Smirnova M.A., Zhidkin A.P., Lozbenev N.I., Zazdravnykh E.A., Kozlov D.N.</i>	158
Comparison of digital image analysis methods for morphometric characterization of soil aggregates in thin sections <i>Plotnikova O.O., Romanis T.V., Kust P.G.</i>	199
Mire peat soils of the taiga and sub-taiga zones of West Siberia on a digital model of the soil map of Russia at a scale of 1 : 2 500 000 in terms of the Russian soil classification <i>Shishkonakova E.A., Avetov N.A., Ananko T.V., Gerasimova M.I., Savitskaya N.V.</i>	223
On the question of studying dust-like formations in urban ecosystems <i>Ukarkhanova D.T., Moskovchenko D.V., Yurtaev A.A.</i>	241

УДК 631.474

DOI: 10.19047/0136-1694-2020-104-5-30



Ссылки для цитирования:

Исаев В.А., Белобров В.П., Иванов А.Л. Динамика факторов почвообразования и их влияние на технологию земледелия в Каменной степи // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2020. Вып. 104. С. 5-30. DOI: 10.19047/0136-1694-2020-104-5-30

Cite this article as:

Isaev V.A., Belobrov V.P., Ivanov A.L., Dynamics of soil formation factors and their influence on agricultural technology in the Kamennaya Steppe, Dokuchaev Soil Bulletin, 2020, V. 104, pp. 5-30, DOI: 10.19047/0136-1694-2020-104-5-30

Динамика факторов почвообразования и их влияние на технологию земледелия в Каменной степи

© 2020 г. В. А. Исаев*, В. П. Белобров, А. Л. Иванов

ФИЦ “Почвенный институт им. В.В. Докучаева”, Россия,
119017, Москва, Пыжевский пер, 7, стр. 2,
*e-mail: isva@mail.ru.

Поступила в редакцию 20.04.2020, после доработки 23.05.2020,
принята к публикации 11.11.2020

Резюме: Анализ данных многолетних наблюдений в Каменной степи (более 125 лет) за климатическими параметрами (температурой воздуха и количеством осадков), уровнем грунтовых вод (УГВ), видовым составом растительности выявил основные тренды в их изменчивости. С 1969 г. отмечается рост температуры и уменьшение ее вариабельности в течение года. В 2009–2018 гг. она увеличилась на 0.40 за счет холодного сезона. За период 2000–2018 гг. наблюдается рост количества осадков в холодное время года в среднем на 1.2 мм в год и уменьшение в теплое полугодие. Период наблюдений 2009–2018 гг. характеризуется более мягкими и влажными зимами, теплыми и сухими летними месяцами. В конце XX в. и в начале XXI в. отмечен подъем УГВ в среднем до 3.8 м, совпавший с ростом среднегодовой температуры и увеличением общего количества выпадающих осадков. Изменение многолетнего режима грунтового и поверхностного увлажнения привело к расширению ареала

гидроморфных почв, что отрицательно сказывается на традиционной системе земледелия, применяющей обработки почв. Трансформация растительности за 100 лет наблюдений имела несколько этапов с общим трендом к смене степного разнотравья на лугово-степную, кустарниковую и древесные породы. Опыт применения прямого посева на типичных черноземах в течение 4 лет без использования обработок показал его адаптивность к изменяющимся условиям среды, а также тренд на восстановление деградированных свойств почв – увеличение запасов гумуса и подвижного фосфора в 30-сантиметровом слое почв.

Ключевые слова: вариабельность, сумма температур и осадков, уровень грунтовых вод, степь, технология земледелия.

Dynamics of soil formation factors and their influence on agricultural technology in the Kamennaya Steppe

V. A. Isaev*, V. P. Belobrov, A. L. Ivanov

*Federal Research Centre “V.V. Dokuchaev Soil Science Institute”,
7 Bld. 2 Pyzhevskiy per., Moscow 119017, Russian Federation,
e-mail: isva@mail.ru.

Received 20.04.2020, Revised 23.05.2020, Accepted 11.11.2020

Abstract: The analysis of long-term observations in the Kamennaya Steppe (over 125 years) for climatic parameters (air temperature and precipitation), ground water level, vegetation species composition revealed the main trends in their variability. Since 1969 there has been an increase in temperature and a reduction in temperature fluctuation during the year. Over the last 30 years, the difference has reached 1.90, and over the last decade it has grown by 0.40 due to the cold season. The amount of precipitation over the same 50-year period has not changed much. In total, an increase of 45 mm was observed over the decade (1999–2008). In the XXI century, there has been registered an increase in the amount of precipitation in the cold season by 12.7% and a decrease in the warm season, which creates certain prerequisites for climate continentality mitigation during the annual cycle. During the first 70 years of observations, the groundwater level in the well No. 1 was on average at the depth of 6.5 m (5.7–7.3 m). At the end of the XX century and at the beginning of the XXI century, there was marked a pronounced rise in the ground water level, the average depth was 3.8 m, which coincided with the growth of average annual temperature and an increase in total rainfall. In this period changes in the long-term regime of ground and surface soil moisture resulted

in expanding the area of wetlands and hydromorphic soils on the territory of the steppe. The period of 2009–2018 is characterized by a continued increase in average annual temperatures and a decrease in precipitation, which may lead to a seasonal change in temperature and precipitation to milder and wetter winters and warmer and drier summers. Transformation of vegetation for 100 years of observations had several stages with a general trend to change the steppe grasslands to meadow-steppe, shrubs and woody species.

Keywords: variability, sum of temperatures and precipitation, ground water level, steppe, agricultural technology.

ВВЕДЕНИЕ

Каменная степь – уникальный полигон, на котором уже более 125 лет проводится не имеющий аналогов в мире эксперимент по преобразованию природы с целью борьбы с “природными невзгодами”. С момента формирования территории Каменной степи как объекта научного наследия В.В. Докучаева и пристального внимания ученых к процессам почвообразования и почвам на ее территории были организованы многочисленные и систематические наблюдения за изменяющимися природными и антропогенными факторами почвообразования. Среди природных факторов почвообразования наиболее динамичными являются погодноклиматические показатели (температура и осадки), тесно связанный с ними уровень грунтовых вод (УГВ) и растительность. Изменчивость этих показателей во времени и пространстве обуславливает разнообразие почв на региональном и зональном уровне. Антропогенные факторы усиливают вариабельность природных параметров, трансформируя свойства почв и структуру почвенного покрова ([Сорокина, 2007](#); [Хитров, 2009](#); [Чевердин, 2013](#)).

Обобщение и анализ обширного материала наблюдений и полученных результатов исследований показывают, что антропогенно-хозяйственное внедрение в природные процессы приводит к кратковременным (десятки лет) позитивным изменениям, например, по увлажнению почв, тогда как реакция технологий земледелия на цикличность природных явлений, периодически повторяющихся во времени, запаздывает, либо отсутствует. В связи с этим не удастся дать долгосрочный прогноз о состоянии агроландшафта, чтобы своевременно вносить коррективы в ведение сельского

хозяйства и системы земледелия, мелиорацию земель, восстановление свойств и плодородия почв.

На сравнительно небольшой территории природного заказника площадью около 5 тыс. га формируются преимущественно обыкновенные, а также типичные черноземы, лугово-черноземные и черноземно-луговые почвы, солонцеватые и солончаковатые черноземы, солонцы, периодически переувлажненные черноземы, таксономия которых может меняться от сезона к сезону в зависимости от характера и времени выпадающих осадков, их интенсивности, зимних и летних температур.

Одна из важных современных проблем землепользования в Каменной степи связана с переувлажнением почв и обусловлена быстро (до десятка лет) меняющимися во времени погодноклиматическими условиями, связанными с глобальным изменением климата. В данной проблеме переувлажнения исходно автоморфных почв видится много очевидных и неопределенных явлений, связанных с изменяющимися в пространстве процессами почвообразования ([Овечкин, Исаев, 1989](#); [Зайдельман и др., 2012](#); [Разумова и др., 2016](#); [Савин и др., 2016](#); [Хитров, Чевердин, 2007б](#); [Чевердин, 2013](#); [Исаев, Иванов, 2020](#)). Реальных успехов в изучении этих процессов, динамики площадей гидроморфных почв, разработке приемов мелиорации и внедрения передовых технологий земледелия, например, прямого посева, крайне мало. Редкие фазы мониторинга почвенного покрова, последняя из которых закончилась больше 10 лет назад, дают ряд важных данных по динамике развития переувлажненных почв на территории степи ([Хитров, 2009](#)). Этого недостаточно для прогнозирования и характеристики изменений как свойств почв, так и СПП степи в целом.

В Каменной степи одним из факторов переувлажнения черноземов является верховодка, обусловленная в частности глинами, подстилающими почвы и создающими водоупоры при увеличении объемов поступающей влаги выше полевой влагоемкости ([Овечкин, Исаев, 1989](#); [Сорокина, 2007](#); [Хитров, 2009](#)). Верховодка формируется и исчезает достаточно быстро, и связана с темпами обводнения и иссушения почв, которые непостоянны и, в свою очередь, зависят от природных процессов и антропогенных изменений в ландшафтах, направленных на влагосбережение, защиту

от водной эрозии, дефляции и т. д. Переувлажнение приводит к снижению плодородия черноземов и функционирования биоты в силу изменения водного, воздушного и температурного режимов ([Лебедева и др., 2016](#); [Гребенников и др., 2018](#); [Кутовая и др., 2018](#)), способствует осолонцеванию, разрушению структуры и увеличению плотности почв. Кроме того, переувлажнение вызывает выпревание посевов, затрудняет своевременную и обязательную при традиционной технологии земледелия механизированную обработку почвы, задерживает сроки посева, что в совокупности снижает кадастровую стоимость высокоплодородных земель ([Разумова и др., 2016](#)). Вместе с тем в определенных условиях в засушливые годы гидроморфные почвы служат резервом влаги, что способствует сохранению и развитию растений и обеспечивает получение удовлетворительного для засушливого года урожая.

Цель статьи заключается в анализе многолетних данных по оценке наиболее динамичных факторов почвообразования и связанных с ними проблем использования традиционных и новых почвосберегающих систем земледелия в Каменной степи, адаптированных к современным климатическим условиям, а также направленных на восстановление деградированных свойств и повышение плодородия почв.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Объекты исследований – различные подтипы и виды черноземов (Chernozems) Каменной степи ([Исаев и др., 1986](#); [Исаев, 1988](#); [Зборищук и др., 2007](#)), почвы и почвенный покров опытных полей по изучению влияния обработок на свойства почв ([Исаев, Баранова, 1994](#); [Гармашов и др., 2017](#); [Гребенников и др., 2019](#); [Исаев, Иванов, 2020](#)), а также растительность степных участков и лесополос ([Аврорин, 1934](#); [Камышев, 1971](#); [Бобровская и др., 2008](#); [Казанцева и др., 2008, 2011](#)).

Методика работы основана на полевых исследованиях, проведенных авторами, начиная с 1985 г., а также анализе литературных и архивных данных за многолетний период наблюдений (более 100 лет) за изменяющимися во времени и пространстве факторами почвообразования. Акцент сделан на последние 50 лет, которые были наиболее динамичными за весь 125-летний период

наблюдений.

Данные по температуре, осадкам и глубине грунтовых вод были сгруппированы по десятилетиям. До 1969 г. значимых изменений по этим показателям не наблюдалось. В связи с этим в таблицах приведены данные с 1969 г. – начала изменений и формирования трендов в климатических показателях и УГВ.

Основной метод исследования динамичных факторов почвообразования – сравнительно-географический анализ природных параметров, свойств почв и видового состава растительности во временном цикле. Детальные почвенные исследования по изучению почвосберегающих систем обработки почв, включая прямой посев, ведутся с 2013 г. на опытном поле № 2 с координатами 51°03'16.1" с. ш. и 40°44'45.4" в. д. и размером 250 × 75 м. Был проведен анализ следующих свойства почв: макроагрегатный состав почв методом сухого и мокрого просеивания, равновесная плотность по фиксированным глубинам (0–10, 10–20, 20–30, 30–40, 40–50 см) методом цилиндров объемом 100 см³ и буром Качинского, влажность и агрохимические показатели (содержание гумуса и подвижной формы фосфора в 3-кратной повторности по вариантам с разными обработками через каждые 10 см до глубины 50 см). Статистическая обработка данных выполнена в программе Excel 2016.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Температура воздуха и осадки. В таблицах 1 и 2 представлены результаты наблюдений за температурой и выпавшими осадками в Каменной степи за последние 50 лет. При сравнении среднегодовых температур за десятилетия, начиная с 1969 г. (табл. 1), выявляется определенный тренд роста температуры за последние 30 лет. Разница составляет 1.9 °C, причем только за 2009–2018 гг. она выросла на 0.4 °C. По коэффициенту вариации выделяются два двадцатилетних периода с высокой вариабельностью температур (КВ = 19.7) и низкой (КВ = 7.3–8.9), что отражает современные тенденции глобального и регионального изменения климата, которые сказываются на испаряемости, развитии растительного покрова, скорости биологических процессов и свойствах определяющих плодородие почв.

Среднее количество осадков в каждом из пяти десятилетий, достаточно постоянно и только в период 1999–2008 гг. отмечается увеличение на 45 мм (табл. 2). В тоже время вариабельность выпавших осадков по годам высокая ($KB = 15.1–20.4$) с максимальным размахом в каждом десятилетнем цикле, начиная с 1969 г., в 243, 290, 284, 279 и 221 мм. Так, в 1984, 1991, 1996 и 2008 гг. выпало менее 400 мм осадков, а в 1970, 1976, 1981, 1990, 2004–2006, 2013 и 2016 гг., напротив, отмечался максимум, свыше 600 мм в год.

Два десятилетия подряд (1999–2018 гг.) количество осадков в зимний период увеличивается в среднем на 1.2 мм в год (табл. 3, 4), причем в период 2009–2018 гг. отмечается резкое снижение выпадающих осадков в летний и осенний периоды (табл. 4), что на фоне роста среднегодовой температуры (сумма средних многолетних температур свыше 100 °С в последние годы увеличилась с 25 690 °С до 29 070 °С) может привести к дефициту влаги в почвах в вегетационный период.

Тенденция повышения температуры воздуха и уменьшения поступления влаги в почву за вегетационный сезон привела в последние годы к возрастанию степени аридизации почв на всей территории степи. То, с чем многие годы боролись с помощью влагосбережения, создавая благоприятные условия для возделывания полевых культур, возвращается с нарастающим глобальным потеплением. При сохранении отмеченных тенденций следует ожидать, что сухостепным условиям будут соответствовать не отдельные месяцы, а вегетационный период в целом, что может привести к потерям потенциала почвенного плодородия и снижению урожайности сельскохозяйственных культур. С этим связана необходимость повышения адаптивного потенциала видов и сортов сельскохозяйственных культур, сопряженная с разработкой агротехнологий, применительно к изменяющимся условиям внешней среды, что является решающим фактором устойчивости земледелия.

Таблица 1. Средние за год и десятилетия температуры воздуха (°C) в Каменной степи (составлено по online данным – <http://www.pogodaiklimat.ru/history/34139.htm> и литературным источникам; координаты метеостанции – 51.05° с. ш. 40.70° в. д.; высота над уровнем моря 194 м.)

Table 1. Average annual and decadal air temperatures (°C) in the Kamennaya Steppe (coordinates of the weather station – latitude 51.05°; longitude 40.70°; altitude 194 m.)

1969	1970	1971	1972	1973	1974	1975	1976	1977	1978	М*	СО*	КВ*
4.4	6.2	6.5	6.8	6.2	6.4	7.6	3.7	5.7	5.2	5.9	1.16	19.7
1979	1980	1981	1982	1983	1984	1985	1986	1987	1988			
6.2	4.9	7.5	6.1	7.3	6.0	5.1	6.0	3.5	5.9	5.9	1.16	19.7
1989	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998			
7.8	7.2	6.9	6.4	5.1	5.6	8.0	5.9	6.0	6.6	6.6	0.94	14.4
1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008			
7.7	7.2	7.4	7.6	6.1	7.5	7.5	6.5	8.3	8.0	7.4	0.65	8.9
2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018			
7.8	8.7	6.6	7.6	8.2	7.6	8.3	7.9	7.8	7.4	7.8	0.57	7.3

Примечание. * – здесь и далее в таблицах: М – средняя арифметическая, СО – стандартное отклонение, КВ – коэффициент вариации.

Таблица 2. Средние за год и десятилетия суммы осадков (мм) в Каменной степи (составлено по online данным – <http://www.pogodaiklimat.ru/history/34139.htm> и литературным источникам)

Table 2. Average annual and decadal precipitation amounts in the Kamennaya Steppe

1969	1970	1971	1972	1973	1974	1975	1976	1977	1978	М	СО	КВ
416	651	405	467	513	492	408	642	514	504	501	88.2	17.6
1979	1980	1981	1982	1983	1984	1985	1986	1987	1988			
479	572	633	511	439	343	491	457	541	523	499	79.2	15.9
1989	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998			
595	618	376	598	563	411	580	334	464	560	510	104.0	20.4
1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008			
534	596	593	459	490	612	676	614	485	397	545	86.8	15.9
2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018			
405	458	485	538	602	442	555	626	523	417	506	76.1	15.1

Таблица 3. Ежемесячное количество осадков (мм), выпавшее в Каменной степи за 20-летний период с 1999 г. по 2018 г.

Table 3. Monthly precipitation (mm) in the Kamennaya Steppe for the 20-year period from 1999 to 2018

Год	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	XIX	X	XI	XII	Сумма
1999	23	29	17	6	57	43	87	112	29	70	14	47	537
2000	38	27	38	18	37	117	83	13	150	12	8	55	596
2001	35	35	61	42	39	66	62	45	60	50	42	56	593
2002	22	52	16	24	35	41	14	8	87	83	54	23	459
2003	28	11	6	27	18	88	105	38	21	86	35	28	490
2004	64	57	31	31	74	76	67	23	45	62	38	44	612
2005	50	47	20	61	41	85	98	93	9	56	34	80	676
2006	20	28	48	32	67	93	12	93	50	64	90	17	614
2007	80	36	15	37	49	44	42	20	54	33	55	20	485
2008	33	17	45	37	44	43	28	11	51	46	29	13	397
2009	38	47	29	8	41	51	69	9	2	31	32	48	405
2010	45	37	31	48	40	39	81	63	29	65	27	33	458
2011	54	35	9	25	34	81	38	51	24	51	28	55	485
2012	45	37	31	48	40	39	81	63	29	65	27	33	538
2013	27	15	52	5	85	50	59	85	151	45	17	11	602
2014	62	16	28	28	29	133	4	49	7	17	6	63	442
2015	21	50	2	90	46	108	79	5	4	33	83	34	555
2016	64	40	42	98	52	77	21	53	52	31	62	34	626
2017	31	25	29	33	49	50	54	39	49	54	55	55	523
2018	57	26	56	58	22	3	42	9	61	26	8	49	417
Среднее годовое количество осадков за 20 лет													525

Таблица 4. Среднее количество осадков (мм) за сезон в Каменной степи в десятилетнем цикле

Table 4. Average precipitation (mm) per season in the Kamennaya Steppe in a 10-year cycle

Десятилетия	Среднее количество осадков за сезон				Среднее за год
	Весна	Лето	Осень	Зима	
1969–1978	99	153	146	103	501
1979–1988	101	150	143	105	499
1989–1998	106	164	144	96	510
1999–2008	107	175	151	112	545
2009–2018	114	145	123	124	506

Уровень грунтовых вод. Об уровне грунтовых вод в Каменной степи обычно судят по глубине воды в колодце № 1, наблюдения по которому публикуются по данным на 1 сентября каждого года более 125 лет (табл. 5 и 6). За первые 70 лет наблюдений УГВ находился на достаточно стабильных в среднем за десятилетия глубинах 5.7–7.3 м, при изменчивости по КВ от низкой 7.7 до высокой 16.6 (табл. 5).

Временной отрезок, начиная с 1977 г. и вплоть до 2007 г., выделяется повышением УГВ (табл. 6). Наиболее значительный подъем УГВ до 2.65 м пришелся на 1993 г. и в целом на 90-е годы и характеризовался ростом среднегодовой температуры и увеличением общего количества выпадающих осадков (табл. 1 и 2). Многолетняя, достаточно устойчивая до этого времени, система грунтового и поверхностного увлажнения почв существенно изменилась, что отразилось на свойствах черноземов, расширив ареал переувлажненных и гидроморфных почв в Каменной степи ([Хитров, Чевердин, 2007](#)).

Таблица 5. Уровень грунтовых вод (м) в Каменной степи за период с 1892 по 1968 гг. (колодец № 1, координаты – 51.03° с. ш. и 40.70° в. д., абсолютная высота ~ 192 м.)

Table 5. Ground water level (m) in the Kamennaya Steppe for the period from 1892 to 1968 (well No. 1)

Годы наблю- дений	1892 - 1901	1902 - 1911	1912 - 1921	1922 - 1931	1932 - 1941	1942 - 1951	1952 - 1961	1962 - 1968
М	6.9	6.5	5.7	6.7	7.3	6.1	7.1	5.9
СО	0.76	1.08	0.93	0.98	0.77	0.86	0.58	0.46
КВ	10.0	16.6	16.4	14.7	10.6	14.2	8.2	7.7

Период увеличения обводненности территории степи ([Савин и др., 2016](#)) сменился в 2009–2018 гг. на менее влажный с заметным падением УГВ. С одной стороны, он характеризуется продолжением роста среднегодовых температур и снижением количества выпадающих осадков, с другой, ранее не отмечавшейся тенденцией к сезонной смене трендов по температуре и выпадающим осадкам на более мягкие и влажные зимы и более теплые и сухие летние месяцы.

Таким образом, за 50 лет (начиная с 1969 г.) уровень воды в колодце сначала повысился в 90-е годы в среднем на 3.5 м., а затем снизился до 7.1 м (табл. 6). В настоящее время вода находится на глубинах, характерных для начала измерений в конце XIX в., типичных для автоморфно развивающихся черноземов степи. Вместе с тем следует отметить, что колодец № 1 находится под лесным массивом, где понижение УГВ в определенной степени связано с транспирацией лесным ценозом, чего не было более 100 лет назад. Это явление сказывается на растительном покрове косимой залежи, где отмечается замена луговых трав более ксероморфными степными видами. Происходит уменьшение численности дождевых червей в составе почвенной мезофауны. В летний период, за исключением почв под лесополосами, из-за недостатка влаги они встречаются крайне редко.

Таблица 6. Уровень грунтовых вод (м) в Каменной степи за период с 1969 г. по 2018 г. (колодец № 1)

Table 6. Ground water level (m) in the Kamennaya Steppe for the period from 1969 to 2018 (well No. 1)

Год	УГВ, м	Год	УГВ, м	Год	УГВ, м	Год	УГВ, м	Год	УГВ, м
1969	5.65	1979	3.53	1989	3.35	1999	4.05	2009	6.62
1970	5.47	1980	3.99	1990	2.81	2000	3.52	2010	7.25
1971	4.95	1981	3.31	1991	2.85	2001	3.65	2011	6.70
1972	5.87	1982	3.56	1992	3.95	2002	3.75	2012	6.93
1973	5.70	1983	3.75	1993	2.65	2003	4.17	2013	7.57
1974	5.11	1984	4.92	1994	3.08	2004	3.36	2014	7.74
1975	5.26	1985	5.17	1995	3.89	2005	3.25	2015	7.60
1976	4.88	1986	4.95	1996	4.10	2006	3.44	2016	6.95
1977	4.00	1987	4.29	1997	4.60	2007	4.12	2017	7.06
1978	4.00	1988	3.97	1998	4.20	2008	5.40	2018	-
М	5.1		4.1		3.5		3.9		7.1
СО	0.66		0.66		0.68		0.63		0.41
КВ	12.9		15.9		19.4		16.1		5.7

Снижение УГВ в колодце № 1 продолжается даже зимой, приближаясь к абсолютному минимуму стояния за весь период наблюдений до 8.8 м в январе 1960 г. (в 2018 г. отмечалось даже полное пересыхание колодца).

Важно еще раз обратить внимание на то, что УГВ в скважинах, расположенных на полях, где в севооборотах возделываются разные культуры, не везде коррелирует с уровнем воды в колодце № 1. За период с 1990 г. по 2014 г., по данным ЦТ “Воронежгеомониторинг”, в этих скважинах, в отличие от колодца № 1 под лесом, отчетливо проявляется сезонная динамика УГВ (табл. 7). Большую часть времени в течение года он остается в пределах 1.5–3.0 м, редко поднимаясь до 0.5–1.0 м и опускаясь глубже 5 м, как это было в экстремально засушливый 2010 г.

Таким образом, наряду с глобальными изменениями климатических условий локальные особенности гранулометрического состава подстилающих пород, поверхностного и внутрипочвенного рельефа и стока определяют как глубину УГВ, так и ее сезонную динамику.

Растительность. Степные сообщества в Каменной степи претерпели за 125 лет наблюдений существенные изменения. По замыслу В.В. Докучаева, заповедная некосимая степь (восточнее 40-ой лесополосы) должна была служить эталоном, своеобразным контролем агроландшафтов. Однако в настоящее время она превратилась в лесное урочище, в котором доминирует клен американский с редким подлеском и травяным покровом. Комплекс климатических, гидрогеологических и антропогенных воздействий способствовал развитию не произраставших здесь ранее растений: купырь лесной (*Anthriscus silvestris*), гравилат городской (*Geum urbanum*) как луговые виды, а также будра плющевидная (*Glechoma hederacea*) как лесной вид ([Бобровская и др., 2008](#)).

Многолетние наблюдения показывают, что на участке с абсолютным заповедным режимом первоначально сформировалась лугово-степная растительность (вторичная целина). В 1913 г. в травостое господствовал пырей ползучий (*Elytrigia repens*), присутствовало многочисленное разнотравье, были отмечены также ковыль сарептский (*Stipa sareptana*) и большое число одно- и двулетних видов.

Таблица 7. Среднемесячный УГВ (м) в скважине 04*; абсолютная отметка 189.8 м, координаты 51°03'22.25" с. ш. и 40°44'36.12" в. д.

Table 7. Average monthly ground water level (GWL) (m) in the well 04*; absolute level 189.8 m, coordinates 51°03'22.25" N and 40°44'36.12" E

Год	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	XIX	X	XI	XII	M
2014	2.83	2.69	2.30	1.67	1.27	1.31	1.46	1.85	2.09	2.19	2.25	2.14	2.01
2015	2.02	1.92	2.07	1.31	0.94	1.12	1.46	1.93	2.19	2.28	2.38	2.50	1.85
2016	2.57	2.48	1.76	0.96	0.54	0.56	0.71	0.81	1.01	1.20	1.20	1.24	1.25
2017	1.71	2.34	2.48	2.03	1.79	1.69	1.92	2.21	2.37	2.42	2.46	2.44	2.16
2018	2.00	1.73	1.63	1.31	1.05	1.08	1.32	1.49	Нет данных				
2019	Нет данных							1.95**	Нет данных				

Примечание. * – данные получены из территориального центра “Воронежгеомониторинг”; ** – собственные измерения 27.08.2019 при проведении полевых работ.

Постепенно в травостой стали внедряться отдельные всходы деревьев и кустарников. Уже в 30-х годах упоминается о наличии в растительном покрове 2 видов деревьев – груша (*Pirus communis*) и вяз мелкий (*Ulmus minor*) (Аврорин, 1934). Появились и такие кустарники, как жимолость (*Lonicera tatarica*), боярышник (*Crataegus*), шиповник коричный (*Rosa cinnamomea*), слива колючая – терн (*Prunus spinosa*). В травяном покрове стали достаточно заметны кострец (*Bromopsis riparia*), пырей ползучий (*Elytrigia repens*), мятлик узколистный (*Poa angustifolia*).

В 50-х годах произошло увеличение роли типчака и ковылей ([Камышев, 1971](#)). На залежи в это время присутствуют ковыль волосистый (*Stipa capillata*), опушеннолистный (*S. dasyphylla*). В этот период из травостоя практически исчез мятлик луговой (*Poa pratensis*), который вновь появляется в травостое в 2001 г., в то время как *P. angustifolia* из его состава выпадает.

Проведенное в 1972 г. картирование растительности участка ([Пашенко, 1992](#)) показало, что древесно-кустарниковые заросли стали занимать более 63% площади залежи, в состав которых в это время входило уже 10 древесных видов и 13 кустарников. В сохранившемся к этому времени лугово-степном травостое все еще можно было выделить несколько растительных группировок, среди которых следует упомянуть кострово-свербиговое (*Bunias orientalis* + *Bromopsis inermis*); разнотравно-ковыльное сообщество (*Stipa pennata* + *Vicia tenuifolia* + *Campanula glomerata*) и подмаренниково-душищевое (*Origanum vulgare* + *Galium verum*) сообщества. Из травостоя почти полностью исчезли практически все одно- и двулетние растения: лопушник (*Arctium alpina*), змееголовник тимьяноцветковый (*Dracocephalum thymiflorum*) и др., такие многолетники, как *Poa pratensis*, катран татарский (*Crambe tatarica*) и др. С 1972 г. начинается бурное зарастание этого “микророзаповедника” древесными и кустарниковыми видами, которое протекает на фоне возрастающего количества осадков и приближающейся к поверхности почвы “верховодки”. Менее чем за 30 лет к концу прошлого столетия на залежи 1908 г. сформировался сомкнутый кленовый лес. Видовой состав трав в лесу, по описанию растительности в 2001 г. ([Бобровская и др., 2008](#); [Казанцева и др., 2008, 2011](#)), чрезвычайно беден – всего 21 вид – при проек-

тивном покрытии менее 3%. Проведенное в 2010 г. повторное описание кленового леса выявило практически полное отсутствие травяно-кустарничкового яруса.

Влияние динамики факторов почвообразования на технологию земледелия. С XIX в. и до второй половины XX в. климатические параметры (температура и осадки) в годовом цикле имели постоянную вариабельность, что определяло в Каменной степи стабильные условия земледелия, которое опиралось на традиционную систему с обязательными обработками почв. Описанные выше изменения климатических показателей, вызванные природными (длительное, около 30 лет, стояние грунтовых вод на глубине активного влияния на почвенный профиль черноземов) и антропогенными (лесомелиорации, влагосбережение, обводнение территории) факторами, привели к трансформации видового состава растительности, расширению ареалов переувлажненных почв ([Хитров, Чевердин, 2007а, 2007б](#)), изменению их свойств – деградации структуры, дегумификации, формированию плужной подошвы и т. д. ([Зайдельман и др., 2012](#); [Чевердин, 2013](#); [Лебедева и др., 2016](#); [Гармашов и др., 2017](#); [Гребенников и др., 2018](#)).

Автоморфные черноземы приобретают черты характерные для лугово-черноземных почв, особенно в местах стояния верховодки, что сдвигает сроки посева культур на более поздние, пока не просохнет почва. Кроме того, обрабатывающая техника создает на полях неоднородность по плотности и увлажнению почв, формируя агромикрорельеф, что также усложняет посев и требует дополнительных мероприятий по выравниванию поверхности поля. В определенных случаях это создает условия для развития процесса поверхностного гидроморфизма.

Как следствие, возникла необходимость адаптации систем земледелия к меняющимся условиям среды. С этой целью на ключевых участках были проведены комплексные полевые опыты по изучению почвосберегающих систем земледелия, различных модификаций обработок почв, включая прямой посев, с оценкой влияния вносимых доз минеральных удобрений. В зерновом севообороте изучали следующие виды обработок: отвальная вспашка на глубину 20–22 см, безотвальная обработка на глубину 15–17 см, поверхностная обработка дискованием на глубину 10–12 см и

нулевая обработка (прямой посев). Исследования показали, что типичные черноземы в слоях 0–30 и 0–50 см имеют наибольшие запасы гумуса после четырех лет применения технологии прямого посева ([Гребенников и др., 2019](#)) (табл. 8). Максимальная разница в запасах гумуса в слоях 0–30 и 0–50 см отчетливо выражена при сравнении варианта прямого посева, с одной стороны, и вспашки отвальной и безотвальной, с другой.

Через четыре года проведения опытов запасы P_2O_5 в слое 0–30 см увеличились при использовании прямого посева по сравнению с другими обработками (табл. 8). Наиболее низкими запасами этого элемента питания характеризовался вариант с отвальной вспашкой и поверхностной обработкой.

Таблица 8. Запасы гумуса (т/га) и подвижного фосфора P_2O_5 (кг/га) в гумусовом горизонте агрочерноземов Каменной степи на вариантах полевого опыта (поле № 2)

Table 8. Reserves of humus (t/ha) and mobile phosphorus P_2O_5 (kg/ha) in the humus horizon of agrochernozems of the Kamennaya Steppe in the field experiment variants (field No. 2)

Агро- хими- ческие показа- тели	Глубина образца почв, см	Способы обработки почвы			
		Прямой посев (нулевая обработ- ка)	Поверх- верх- ностная	Вспашка безот- вальная	Вспашка отваль- ная
Гумус	0–30	261.9	207.7	190.8	195.2
	0–50	358.3	304.7	266.6	279.8
P_2O_5	0–30	447.7	384.7	423.2	402.2

Таким образом, на фоне меняющихся динамичных факторов почвообразования типичные черноземы Каменной степи хорошо откликаются на систему земледелия с нулевой обработкой (прямой посев), при использовании которой после жатвы на поверхности почв остаются растительные остатки, что обеспечивает рост запасов органического вещества и подвижного фосфора в гумусовом горизонте за достаточно короткий период времени (4 года).

Такая система земледелия в наибольшей степени адаптирована к изменяющимся природным условиям среды, поскольку прямой сев приближен к естественному функционированию почвенного покрова. Как отмечалось, в последние годы вегетационный период в Каменной степи имеет тенденцию к дефициту по увлажнению почв. В этой связи ориентация на прямой посев в системе земледелия оправдана еще и в силу того, что уже опробована и показала позитивные результаты как в засушливой зоне Ставропольского края ([Дридигер и др., 2017](#)), так и в близких к Каменной степи природных условиях Курской области ([Холодов и др., 2016](#)).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Наиболее динамичные во времени факторы почвообразования – климат и растительность – претерпели за время наблюдений в Каменной степи существенные изменения. В этой экологической нише рациональное использование почв в земледелии требует оперативной оценки ситуации и трендов изменения показателей факторов почвообразования. Традиционные способы возделывания сельскохозяйственных культур и сами культуры должны соответствовать быстро меняющимся во времени условиям среды. Вариабельность и рост годовых температур в Каменной степи, трансформация в сезонном распределении годовых осадков, усиление аридизации в 2009–2018 гг. вызывает необходимость применения наиболее адаптированной к меняющимся параметрам ресурсо- и почвосберегающей системы земледелия, ориентированной на восстановление деградированных свойств почв. Полученные на базе полевых опытов в Каменной степи результаты по применению различных обработок почв показали, что прямой посев в наибольшей степени адаптирован к изменениям в силу особенностей его технологии, приближенной к природным экосистемам разного типа. Это подтверждают данные, полученные при использовании прямого посева на производственных площадях в засушливых районах Ставропольского края и в научно-производственных опытах в Курской области. Таким образом, выявленные на примере Каменной степи тренды изменений факторов почвообразования во времени отражают, по нашему мнению,

общую динамику глобального потепления в ЦЧО и сопряженных с ним субъектах Федерации, где доминируют черноземные почвы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аврорин Н.А. Растительность разновозрастных залежей Каменной степи // Геоботаника. 1934. Т. 1. Сер. 3. С. 187–195.
2. Бобровская Н.И., Казанцева Т.И., Пащенко А.И., Тищенко В.В. Изменение видового состава луговостепной залежи в процессе ее трансформации в лесную группировку // Ботан. журн. 2008. Т. 93. № 4. С. 620–633.
3. Гармашов В.М., Чевердин Ю.И., Белобров В.П., Гребенников А.М., Исаев В.А., Беспалов В.А. Влияние способа основной обработки почв на агрофизические свойства миграционно-мицелярных агрочерноземов // Вестник Российской сельскохозяйственной науки. 2017. № 3. С. 26–29.
4. Гребенников А.М., Беспалов В.А., Исаев В.А., Белобров В.П., Юдин С.А., Гармашов В.М., Чевердин Ю.И. Влияние разных способов обработки агрочерноземов на их влажностный и температурный режим в условиях высокой обеспеченности почв влагой // Современное состояние чернозёмов. 2018. Т. 1. С. 376–383.
5. Гребенников А.М., Исаев В.А., Чевердин Ю.И., Гармашов В.М., Нужная Н.А., Корнилов И.М. Влияние способа основной обработки почвы на агрохимические свойства миграционно-мицелярных легкоглинистых агрочерноземов юго-востока ЦЧЗ // Вестник российской сельскохозяйственной науки. 2019. № 5. С. 23–26.
6. Дридигер В.К., Невечеря А.Ф., Токарев И.Д., Вайцеховская С.С. Экономическая эффективность технологии No-till в засушливой зоне Ставропольского края // Земледелие. 2017. № 3. С. 16–19.
7. Зайдельман Ф.Р., Тюльпанов В.И., Ангелов Е.Н. Деградационные изменения богарных черноземов лесостепной и степной зон Европейской России в результате переувлажнения и мелиоративные мероприятия по восстановлению их плодородия / Деградация богарных и орошаемых черноземов под влиянием переувлажнения и их мелиорация. М.: АПР, 2012. С. 11–27.
8. Зборищук Ю.Н., Рымарь В.Т., Чевердин Ю.И. Состояние черноземов обыкновенных Каменной степи. М., 2007. 158 с.
9. Исаев В.А., Овечкин С.В., Козут Б.М., Хитров Н.Б. Влияние временного переувлажнения на гумусовый профиль степных черноземов ЦЧО // Тез. Докл. Всесоюзн. Конфер. “Агропочвоведение и плодородие почв”. Л. 1986. С. 51–52.

10. *Исаев В.А.* Компонентный состав солонцовых комплексов Каменной степи // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 1988. Вып. 46. С. 76–77.
11. *Исаев В.А., Баранова О.Ю.* Почвы засушливой зоны и их изменение под влиянием мелиорации // Научные труды Почвенного института имени В.В. Докучаева. М., 1994. С. 196–201.
12. *Исаев В.А., Иванов А.Л.* Обзор исследований периодически избыточно-увлажненных почв в Каменной Степи // Вестник Российской сельскохозяйственной науки. 2020. № 1. С. 17–23.
13. *Казанцева Т.И., Бобровская Н.И., Пащенко А.И., Тищенко В.В.* Динамика растительности 100-летней степной залежи Каменной степи (Воронежская область) // Ботан. журн. 2008. Т. 93. № 4. С. 620–633.
14. *Казанцева Т.И., Бобровская Н.И., Пащенко А.И., Тищенко В.В.* Особенности динамики и восстановления залежной растительности луговых степей заказника “Каменная степь” // Мат. Всероссийской научной конференции с международным участием “Отечественная геоботаника: основные вехи и перспективы”. СПб, 2011. Т. 2. С. 296–299.
15. *Камышев Н.С.* Флора Каменной и Хреновской степей Воронежской области / Науч. записки Воронежского отд. ВБО. 1971. С. 31–54.
16. *Кутовая О.В., Гребенников А.М., Тхакахова А.К., Исаев В.А., Гармашов В.М., Беспалов В.А., Чевердин Ю.И., Белобров В.П.* Изменение почвенно-биологических процессов и структуры микробного сообщества агрочерноземов при разных способах обработки почвы // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2018. Вып. 92. С. 35–61. DOI: [10.19047/0136-1694-2018-92-35-61](https://doi.org/10.19047/0136-1694-2018-92-35-61).
17. *Лебедева И.И., Базыкина Г.С., Гребенников А.М., Чевердин Ю.И., Беспалов В.А.* Опыт комплексной оценки влияния длительности земледельческого использования на свойства и режимы агрочерноземов Каменной степи // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2016. Вып. 83. С. 77–102. DOI: [10.19047/0136-1694-2016-83-77-102](https://doi.org/10.19047/0136-1694-2016-83-77-102).
18. *Овечкин С.В., Исаев В.А.* Периодически переувлажненные почвы ЦЧР. Генезис, антропогенная эволюция и рациональное использование почв // Науч. тр. Почвенного института им. В.В. Докучаева, М.: 1989, С. 18–26.
19. *Пащенко А.И.* К вопросу изучения динамики растительного покрова залежей Каменной степи // Природные ресурсы Воронежской области и их охрана. 1992. С. 4–13.
20. *Разумова Н.В., Разумов В.В., Молчанов Э.Н.* Переувлажнение и подтопление почв и земель в Центральном регионе России // Бюллетень

Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2016. Вып. 82. С. 3–27.
DOI: [10.19047/0136-1694-2016-82-3-27](https://doi.org/10.19047/0136-1694-2016-82-3-27).

21. Савин И.Ю., Марков М.Л., Овечкин С.В., Исаев В.А. Тренд общей обводненности Европейской части России, выявленный по спутниковым данным GRACE // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2016. Вып. 82. С. 28–41. DOI: [10.19047/0136-1694-2016-82-28-41](https://doi.org/10.19047/0136-1694-2016-82-28-41).

22. Сорокина Н.П. Факторы дифференциации и агрогенной трансформации почвенного покрова распаханых склонов в Каменной Степи. Каменная Степь: проблемы изучения почвенного покрова // Науч. тр. Почв. ин-та им. В.В. Докучаева. 2007. С. 97–120.

23. Хитров Н.Б., Чевердин Ю.И. Распространение сезонно переувлажненных и затопленных почв в Каменной степи (2006) // Каменная степь: проблемы изучения почвенного покрова. Науч. тр. Почв. ин-та им. В.В. Докучаева. 2007а. С. 121–133.

24. Хитров Н.Б., Чевердин Ю.И. Причины возникновения и география временно переувлажненных и затопленных почв Каменной Степи // Бюллетень Почвенного института им. В.В. Докучаева. 2007б. Вып. 59. С. 3–13.

25. Хитров Н.Б. Структура почвенного покрова Каменной степи. Разнообразие почв Каменной Степи // Науч. тр. Почв. ин-та им. В.В. Докучаева. 2009. С. 41–71.

26. 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.

27. Чевердин Ю.И. Изменение свойств почв Юго-Востока Центрального Черноземья под влиянием антропогенного воздействия. Каменная степь. М., Воронеж: РАСХН, ГНУ “Воронежский научно-исследовательский институт сельского хозяйства имени В.В. Докучаева”. 2013. 334 с.

REFERENCES

1. Avrorin N.A., Rastitel'nost' raznovozrastnykh zalezhei Kamennoi stepi (Vegetation of different age deposits of the Kamennaya steppe), *Geobotanika*, 1934, Vol. 3, Series 3, pp. 187–195.

2. Bobrovskaya N.I., Kazantseva T.I., Pashchenko A.I., Tishchenko V.V., *Izmenenie vidovogo sostava lugovostepnoi zalezhi v protsesse ee transformatsii v lesnuyu gruppirovku* (Changes in the species composition of a meadow-steppe fallow during its transformation into a forest group), *Botan. Zhurn.*, 2008, Vol. 4, pp. 620–633.

3. Garmashov V.M., Cheverdin Yu.I., Belobrov V.P., Grebennikov A.M., Isaev V.A., Bepalov V.A., Vliyanie sposobа osnovnoi obrabotki pochv na agrofizicheskie svoystva migratsionno-mitselyarnykh agrochernozemov (The influence of the method of basic soil cultivation on the agrophysical properties of migratory-mycelial agrochernozems), *Vestnik Rossiiskoi sel'skokhozyaistvennoi nauki*, 2017, Vol. 3, pp. 26–29.
4. Grebennikov A.M., Bepalov V.A., Isayev V.A., Belobrov V.P., Yudin S.A., Garmashov V.M., Cheverdin Yu.I., Vliyanie raznykh sposobov obrabotki agrochernozemov na ikh vlazhnostnyi i temperaturnyi rezhim v usloviyakh vysokoi obespechennosti pochv vlagoi (Influence of different methods of processing agrochernozems on their moisture and temperature regime in conditions of high soil moisture supply), *Sovremennoye sostoyaniye chernozemov*, 2018, Vol 1, pp. 376–383.
5. Grebennikov A.M., Isayev V.A., Cheverdin YU.I., Garmashov V.M., Nuzhnaya N.A., Kornilov I.M., Vliyanie sposobа osnovnoi obrabotki pochvy na agrokhimicheskie svoystva migratsionno-mitselyarnykh legkoglinistykh agrochernozemov yugo-vostoka TsChZ (Influence of the method of basic tillage on the agrochemical properties of migratory-mycelial light-clayey agrochernozems of the southeast of the Central Reserves), *Vestnik rossiyskoy sel'skokhozyaystvennoy nauki*, 2019, Vol. 5, pp. 23–26.
6. Dridiger V.K., Nevecherya A.F., Tokarev I.D., Vaytsekhovskaya S.S., Ekonomicheskaya effektivnost' tekhnologii No-till v zasushlivoi zone Stavropol'skogo kraya (The economic efficiency of No-till technology in the arid zone of the Stavropol Territory), *Zemledeliye*, 2017, Vol. 3, pp. 16–19.
7. Zaidelman F.R., Tulipov V.I., Angelov E.N., Degradatsionnye izmeneniya bogarnykh chernozemov lesostepnoi i stepnoi zon Evropeiskoi Rossii v rezul'tate pereuvlazhneniya i meliorativnye meropriyatiya po vosstanovleniyu ikh plodorodiya (Degradation changes of bogarny chernozems of forest-steppe and steppe zones of European Russia as a result of waterlogging and reclamation measures to restore their fertility), In: *Degradatsiya bogarnih i oroshaemih chernozemov pod vliyaniem pereuvlazhneniya i ikh melioratsiya* (Degradation of rain-fed and irrigated chernozems under the influence of waterlogging and their reclamation), Moscow, 2012, pp. 11–27.
8. Zborishchuk Yu.N., Rymar' V.T., Cheverdin Y.I., *Sostoyaniye chernozemov obyknovennykh Kamennoy stepi* (The state of ordinary chernozems of the Kamennaya Steppe), Moscow, 2007, 158 p.
9. Isayev V.A., Ovechkin S.V., Kogut B.M., Khitrov N.B., Vliyaniye vremennogo pereuvlazhneniya na gumusovyy profil' stepnykh chernozemov of the Central Chernozem regions (The effect of temporary waterlogging on the humus profile of the steppe chernozems of the Central Chernozem regions), *Agropochvovedeniye i plodorodiye pochv*, 1986, pp. 51–52.

10. Isayev V.A., Komponentnyi sostav solontsovykh kompleksov Kamennoi stepi (Component composition of solonchic complexes of the Stone Steppe), V.V. *Dokuchayev Soil Bulletin*, Moscow, 1988, pp. 76–77.
11. Isayev V.A., Baranova O.Yu., Pochvy zasushivoy zony I ikh izmeneniye pod vliyaniyem melioratsii (Soils of the arid zone and their change under the influence of land reclamation), *Nauchnye trudy Pochvennogo instituta imeni V.V. Dokuchaeva* (Scientific works of the V.V. Dokuchaev soil Institute), Moscow, 1994, pp. 196–201.
12. Isaev V.A., Ivanov A.L., Obzor issledovaniy periodicheski isbitochno-uvlashnennih pochv v Kamennoy stepi (Review of studies of periodically over-moistened soils in the Kamennaya step), *Vestnik Rossiyskoy sel'skhozozaystvennoy nauki*, 2020, Vol. 1, pp. 17–23.
13. Kazantseva T.I., Bobrovskaya N.I., Pashchenko A.I., Tishchenko V.V., Dinamika rastitel'nosti 100-letney stepnoy zalezhi Kamennoy stepi (Voronezhskaya oblast') (Dynamics of vegetation of the 100-year-old steppe deposit of the Kamennaya Steppe (Voronezh region)), *Botan. Zhurn.*, 2008, Vol. 4, pp. 620–633.
14. Kazantseva T.I., Bobrovskaya N.I., Pashchenko A.I., Tishchenko V.V., Osobennosti dinamiki i vosstanovleniya zalezhnoy rastitel'nosti lugovykh stepey zakaznika "Kamennaya step" (Features of the dynamics and restoration of fallow vegetation of meadow steppes of the Kamennaya Steppe Nature Reserve), *Proc. All-Russian Scien. Conf. with international participation "Domestic geobotany: major milestones and prospects"*, Saint-Petersburg, 2011, pp. 296–299.
15. Kamyshev N.S., Flora Kamennoy i Khrenovskoy stepey Voronezhskoy oblasti (Flora of the Stone and Khrenovo steppes of the Voronezh region), *Nauch. zapiski Voronezhskogo otd. VBO* (Scientific. notes of the Voronezh Dep. UBE), 1971, pp. 31–54.
16. Kutovaya O.V., Grebennikov A.M., Tkachakhova A.K., Isaev V.A., Garmashov V.M., Bepalov V.A., Cheverdin Yu.I., Belobrov V.P., The changes in soil-biological processes and structure of microbial community of agrochernozems in conditions of different ways of soil cultivation, *Dokuchaev Soil Bulletin*, 2018, Vol. 92, pp. 35–61. DOI: [10.19047/0136-1694-2018-92-35-61](https://doi.org/10.19047/0136-1694-2018-92-35-61).
17. Lebedeva I.I., Bazykina G.S., Grebennikov A.M., Cheverdin Yu.I., Bepalov V.A., The experience of the complex assessment of the impact of the length of agricultural use on properties and regimes of agrochernozems of the Stony Steppe, *Dokuchaev Soil Bulletin*, 2016, Vol. 83, pp. 77–102, DOI: [10.19047/0136-1694-2016-83-77-102](https://doi.org/10.19047/0136-1694-2016-83-77-102).
18. Ovechkin S.V., Isayev V.A., Periodicheski pereuvlazhennnye pochvy TsChR. Genezis, antropogennaya evolyutsiya i ratsional'noe ispol'zovanie

pochv (Periodically waterlogged soils of the Central Chernozem Region. Genesis, anthropogenic evolution and rational use of soils), *Nauchnye trudy Pochvennogo instituta imeni V.V. Dokuchaev* (Scientific works of V.V. Dokuchaev Soil Science Institute), 1989, pp. 18–26.

19. Pashchenko A.I., K voprosu izucheniya dinamiki rastitel'nogo pokrova zalezhey Kamennoy stepi (The question of studying the dynamics of the vegetation cover of the Kamennaya Steppe deposits), In: *Prirodnyye resursy Voronezhskoy oblasti i ikh okhrana* (Natural resources of the Voronezh region and their protection), Voronezh, 1992, pp. 4–13.

20. Razumova N.V., Razumov V.V., Molchanov E.N., Surface and underground flooding of soils and lands in central Russia, *Dokuchaev Soil Bulletin*, 2016, Vol. 82, pp. 3–27, DOI: [10.19047/0136-1694-2016-82-3-27](https://doi.org/10.19047/0136-1694-2016-82-3-27).

21. Savin I.Yu., Markov M.L., Ovechkin S.V., Isaev V.A., Trend in total terrestrial water storage at the European Russia detected based on GRACE DATA, *Dokuchaev Soil Bulletin*, 2016, Vol. 82, pp. 28–41, DOI: [10.19047/0136-1694-2016-82-28-41](https://doi.org/10.19047/0136-1694-2016-82-28-41).

22. Sorokina N.P., Faktory differentsiatsii i agrogennoi transformatsii pochvennogo pokrova raspakhannykh sklonov v Kamennoi Step'i. Kamennaya Step': problemy izucheniya pochvennogo pokrova (Factors of differentiation and agrogenic transformation of the soil cover of plowed slopes in the Stone Steppe. Stone Steppe: problems of studying the soil cover), *Nauchnye trudy Pochvennogo instituta imeni V.V. Dokuchaev* (Scientific works of V.V. Dokuchaev Soil Science Institute), 2007, pp. 97–120.

23. Khitrov N.B., Cheverdin Yu.I., Rasprostraneniye sezonno pereuvlazhnennykh I zatoplennykh pochv v Kamennoy stepi (2006). Kamennaya step': problemy izucheniya pochvennogo pokrova (Distribution of seasonally waterlogged and flooded soils in the Kamennaya steppe (2006). Kamennaya steppe: problems of studying the soil cover), *Nauchnye trudy Pochvennogo instituta imeni V.V. Dokuchaev* (Scientific works of V.V. Dokuchaev Soil Science Institute), 2007a, pp. 121–133.

24. Khitrov N.B., Cheverdin Yu.I., Prichiny vzniknoveniya I geografiya vremennopereuvlazhnennykh I zatoplennykh pochv KamennoyStepi (The causes and geography of temporarily waterlogged and flooded soils of the Stone Steppe), *V.V. Dokuchayev Soil Bulletin*, 2007b, Vol. 59, pp. 3–13.

25. Khitrov N.B., Struktura pochvennogo pokrova Kamennoystepi. Raznoobrazie pochv Kamennoy stepi (Structure of the soil cover of the Stone Steppe. Variety of soils of the Stone Steppe), *Nauchnye trudy Pochvennogo instituta imeni V.V. Dokuchaev* (Scientific works of the V.V. Dokuchaev Soil Science Institute), 2009, pp. 41–71.

26. Kholodov V.A., Yaroslavtseva N.V., Lazarev V.I., Frid A.S., Interpretatsiya dannykh agregatnogo sostava tipichnykh chernozemov raznogo

vida ispol'zovaniya metodami klasternogo analiza i glavnykh komponent (Interpretation of the aggregate composition data of typical chernozems of different types of use by cluster analysis methods and principal components), *Pochvovedeniye*, 2016, No. 9, pp. 1093–1100.

27. Cheverdin Yu.I., *Izmenenie svoistv pochv Yugo-Vostoka Tsentral'nogo Chernozem'ya pod vliyaniem antropogennogo vozdeistviya. Kamennaya step' (Change of soil properties in the South-East of the Central Chernozem region under the influence of anthropogenic influence. Kamennaya steppe)*, Moscow, Voronezh: RASKhN, GNU “Voronezhskii nauchno-issledovatel'skii institut sel'skogo khozyaistva imeni V.V. Dokuchaeva”, 2013, 334 p.

УДК 631.4

DOI: 10.19047/0136-1694-2020-104-31-67



Ссылки для цитирования:

Столбовой В.С., Гребенников А.М. Индикаторы качества почв пахотных угодий РФ // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2020. Вып. 104. С. 31-67. DOI: 10.19047/0136-1694-2020-104-31-67

Cite this article as:

Stolbovoy V.S., Grebennikov A.M., Soil quality indicators of arable lands in the Russian Federation, Dokuchaev Soil Bulletin, 2020, V. 104, pp. 31-67, DOI: 10.19047/0136-1694-2020-104-31-67

Индикаторы качества почв пахотных угодий РФ

© 2020 г. В. С. Столбовой*, А. М. Гребенников

ФИЦ “Почвенный институт им. В.В. Докучаева”, Россия,
119017, Москва, Пыжевский пер, 7, стр. 2,
*e-mail: vladimir.stolbovoy@gmail.com.

Поступила в редакцию 16.05.2020, после доработки 27.05.2020,
принята к публикации 11.11.2020

Резюме: Предложены три группы индикаторов качества пахотных почв РФ, включая индикаторы агроклиматических условий, индикаторы свойств почв и индикаторы негативных показателей почв. Выбор индикаторов качества почв соответствует требованиям модели расчета нормативной урожайности сельскохозяйственной культуры. Использование индикаторов в модели расчета нормативной урожайности зерновых культур позволяет ранжировать почвы сельскохозяйственных угодий по их качеству. Показано, что лучшим качеством обладают черноземные почвы с нормативной урожайностью зерновых культур, превышающей 40 ц/га. Доля этих почв в пахотном фонде страны составляет около 10%. При этом пахотные черноземные почвы занимают около 66% пахотных угодий. Более 74% пахотного фонда, представленного черноземами оподзоленными и выщелоченными в северной части и черноземами южными в южной части ареала сельскохозяйственных угодий РФ, характеризуются показателями выше среднего и средним качеством, соответственно, 30–40 ц/га и 20–30 ц/га зерновых культур. Около 10% пахотных угодий, занятых пахотными каштановыми солонцеватыми и засоленными почвами, представляют угодья худшего качества с нормативной урожайностью зерновых культур менее 10 ц/га. Предложенные индикаторы включены в

государственные программы по оценке и мониторингу качества сельскохозяйственных земель. Универсальность индикаторов является основой для разработки нового поколения стандартов защиты и рационального использования почв на основе современных цифровых технологий и ГИС-подходов.

Ключевые слова: охрана и рациональное использование почв, почвы, бонитет почв, здоровье почв.

Soil quality indicators of arable lands in the Russian Federation

V. S. Stolbovoy*, A. M. Grebennikov

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

Received 16.05.2020, Revised 27.05.2020, Accepted 11.11.2020

Abstract: The study presents three groups of Soil Quality Indicators (SQI) of arable lands in the Russian Federation, such as agroclimate conditions, soil parameters and negative soil characteristics. The selection of SQI meets the requirements of the crop growth model for calculating the standard crop yield. The application of SQI in the Grain Equivalent Model allows ranking quality of the soils of agricultural lands in the country. The share of the best quality Chernozems with the standard yield of grain crops exceeding 4 t/ha is about 10%. At the same time, arable Chernozems occupy nearly 66% of total area of agricultural lands. More than 74% of the arable lands including podzolized and leached Chernozems in the northern part and Chernozems southern in the southern part of the agricultural zone are characterized by medium quality with the standard yield of grain crops 2–4 t/ha. About 10% of the arable land occupied by Chestnut solonetzic and saline soils are of poorer quality with the standard yield of grain crops less than 1 t/ha. The proposed indicators are included in the government programs for valuating and monitoring the quality of agricultural lands. The universal validity of indicators is a basis for the development of a new generation of standards for the protection and rational use of soils based on modern digital technologies and GIS approaches.

Keywords: soil conservation and rational use, soil, soil bonitet, soil health.

ВВЕДЕНИЕ

Почвы, наряду с атмосферным воздухом и поверхностными и грунтовыми водами, признаны одним из компонентов, контро-

лирующих качество окружающей среды ([Постановление правительства..., 2019](#)). Качество воды и воздуха определяется главным образом степенью загрязнения, которое непосредственно влияет на потребление и здоровье человека и животных или на природные экосистемы. Подход к оценке качества почв с позиций их загрязнения получил широкое распространение в России ([ГОСТ 17.4.4.01-84](#); DIN EN ISO 11269-2-2013), но может считаться односторонней, упрощенной трактовкой термина.

Понятие “качество почвы” более комплексное в связи со сложностью ее организации как компонента природы и объекта мультифункциональной хозяйственной деятельности. В общем виде понятие “качество почв” рассматривает “пригодность почв к использованию” и “способность почвы функционировать”. То есть *“качество почвы – это способность почвы выполнять функции, необходимые для ее использования”*. Действительно, качество почвы, для сельскохозяйственного использования, оценивается ее способностью обеспечивать производство продовольствия и сырья, в то время как, с точки зрения экологии, качество определяется способностью почв стимулировать рост растений, защищать водосборные бассейны путем регулирования инфильтрации и распределения осадков и предотвращения загрязнения воды и воздуха путем буферизации потенциальных загрязнителей, таких как сельскохозяйственные химикаты, органические отходы и промышленные химикаты. В отечественных подходах понятие качество часто используется в смысле цели использования, например, “...плодородие (качество) почвы рассматривается как совокупный эффект почвенных условий...” ([Кирюшин, 2007](#)). В этом и аналогичных примерах ([Богатырев и др., 2017](#)) термин “плодородие” приводится как синоним понятия “качество” почв. Тем самым последнее понятие упрощается до уровня одной функции – плодородия. Это лишает понятие “качество почв” содержательного полифункционального смысла

В зарубежных источниках качество почв трактуется гораздо шире: как “способность почвы функционировать в пределах границ экосистемы и землепользования для поддержания биологической продуктивности, сохранения качества окружающей среды, обеспечения здорового развития растений и живых организмов,

включая человека” ([Bunemann et al., 2018](#)). При этом сложность понятия “качество почв” объясняется полифазностью почв, включающих твердую, жидкую и газообразную фазы, а также их многофункциональностью, обеспечивающей многочисленные прямые и обратные связи между функциями почв и почвенными экосистемными услугами ([Nortcliff, 2002](#)).

В настоящее время вводятся новые аспекты качества почв, такие как здоровье почв, почвенные услуги/сервисы, почвенные риски. В научных публикациях перечисленные термины часто взаимосвязаны и взаимозаменяемы. Так на сайте Национальной охраны природных ресурсов США приводится такое определение: “Здоровье почвы, также называемое качество почвы, определяется как постоянная способность почвы функционировать как жизненно важная живая экосистема, которая поддерживает растения, животных и людей” ([Soil Health, NSCS USDA](#)). Заметим, что в приведенном определении, так же как и в случае, отмеченном выше, обнаруживается подмена понятий “здоровье почв” и “качество почв”. При этом смысл такой подмены не ясен. Вместе с тем, по мнению зарубежных экспертов, отмеченная выше диверсификация терминов качества почв связана с усилением внимания общества к качеству окружающей среды, включая почвы и развитие рынка почвенных услуг. В этих условиях различные аспекты качества почв позволяют более точно определить ценность их разнообразных услуг в системе “спрос – предложение” ([Bunemann et al., 2018](#)). Подчеркнем, что именно ценность экосистемных услуг почв, таких как регулирование выбросов парниковых газов, качества воды и загрязнения сельскохозяйственными химикатами и пр., контролирует сельскохозяйственное производство в развитых странах, включая требование к снижению продуктивности пахотных угодий, введение ограничений на антропогенные нагрузки на окружающую среду и повышение спроса на экологически чистую продукцию.

Правительство РФ утвердило Постановление о проведении “регуляторной гильотины”, которая предполагает к 1 января 2021 года провести инвентаризацию всех действующих и обязательных норм охраны и использования почв с целью оценить их соответствие современным “реалиям”. Согласно отмеченному выше

Постановлению, ревизия должна учитывать разнообразие природных особенностей территории, а также разрешенный вид ее использования.

Основой пересмотра норм в области охраны и рационального использования почв выступает принятый МСХ РФ в 2014 г. и МПР и Экологии РФ в 2019 г. “Единый государственный реестр почвенных ресурсов России” ([ЕГРПР, 2014](#)). ЕГРПР является официальным почвенным информационным ресурсом страны новой цифровой генерации. Почвенные и другие атрибуты ЕГРПР соединены с полигонами цифровой почвенной карты, что позволяет создать пространственно-распределенные нормативы с учетом региональных особенностей природных условий, категорий использования земель, специфики почв. Очевидно, что одним из направлений обновления существующих стандартов и норм использования и охраны почв является приведение их в соответствие с возможностями современной государственной цифровой почвенной информационной платформы ЕГРПР.

Необходимо подчеркнуть, что обновление действующих и обязательных норм охраны и использования почв в рамках “регуляторной гильотины” должно быть гармонизировано с другими действующими государственными актами в отношении почв с тем, чтобы устранить их дублирование и возможные противоречия. В частности, обновленные нормы должны быть согласованы с практикой государственной кадастровой оценки земель сельскохозяйственного назначения, которая осуществляется на основе ЕГРПР и модели расчета нормативной урожайности сельскохозяйственной культуры (Приказ МЭР РФ № 226 от 12 мая 2017 г.). Обновленные нормы также должны отвечать требованиям мониторинга сельскохозяйственных земель, таким как использование современных информационных технологий, геоинформационных платформ и программных средств ([Концепция..., 2010](#)).

Одним из главных направлений обновления действующих и обязательных норм охраны и использования почв является применение современных информационных технологий. Последние включают цифровые пространственно-распределенные базы данных и разработку индикаторов качества почв, под которыми понимается “мера, отражающая степень того, насколько набор при-

сущих характеристик (результат процесса, процедуры и т. п.) удовлетворяет требованиям” (ISO 15189:2012).

Целью настоящей статьи является описание индикаторов качества почв сельскохозяйственных угодий РФ и демонстрация их использования для территориального ранжирования качества почв и построения карт.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Индикаторы качества пахотных почв сельскохозяйственных земель (ИКПСХ) являются частью новой цифровой базы пространственно-распределенных данных “Почвы сельскохозяйственных угодий РФ” (БД ПСХР). Эта база данных разрабатывается ФИЦ “Почвенный институт им. В.В. Докучаева” и будет зарегистрирована в конце 2020 г. БД ПСХР – это новая генерация интегрированных отраслевых баз данных федерального уровня¹, имеющих цель почвенно-информационного сопровождения государственной политики сельскохозяйственного производства в части рационального использования и охраны почв. Семантическая часть БД ПСХР содержит агрегированные на базе ЕГРПР разнообразные почвенные характеристики, включая данные IV тура крупномасштабных (1 : 10 000 и 1 : 25 000) почвенных обследований ([Методические рекомендации..., 2003](#); [Оценка земель..., 1989](#)) и более поздние данные мониторинга земель сельскохозяйственного назначения (доступные в сети Интернет Государственные (национальные) доклады о состоянии и использовании земель в РФ в 2015–2020 гг.). В дополнение к почвенным данным БД ПСХР интегрирует агроклиматические параметры ([Оглеzneв и др., 2007](#)), данные природно-сельскохозяйственного районирования ([Природно-сельскохозяйственное районирование..., 1983](#)) и статистические данные, характеризующие сельскохозяйственную де-

¹ Согласно пункту 1 статьи 72 Конституции РФ, вопросы владения, пользования и распоряжения землей, недрами, водными и другими природными ресурсами находятся в совместном ведении Российской Федерации и субъектов Российской Федерации. Исполнение этой нормы предполагает наличие двухуровневой системы почвенного обеспечения: федерального и регионального (проектного).

тельность, начиная с уровня административных районов РФ ([Столбовой, 2018](#)). Общее число типологических единиц качества почв (ТЕКП) пахотных угодий РФ составляет около 10 107. Геометрическая часть БД ПСХР состоит из 54 695 картографических единиц качества почв (КЕКП), сгенерированных в среде QGIS.

Выбор ИКПСХ определяется требованиями модели расчета нормативной урожайности сельскохозяйственной культуры (МРНУ) ([Сапожников и др., 2012](#)). МРНУ разработана на основе анализа эмпирических данных сельскохозяйственных опытов, проведенных на Госсортоучастках Краснодарского края. В результате были выявлены статистически значимые характеристики / индикаторы природных условий и показателей почв, контролирующие плодородие почв, выраженное в баллах бонитета, и продуктивность основных сельскохозяйственных культур. Исходные данные и алгоритмы расчетов приводятся в отчетах института РосНИИЗемпроект ([Оценка..., 1989](#)), а также опубликованы в ряде изданий ([Методика..., 2003](#); [Оглезнев, 2007](#)). Рассматриваемая МРНУ ([Сапожников и др., 2012](#)) утверждена Федеральной службой земельного кадастра и рекомендована Министерством экономического развития (Приказ МЭР РФ № 226 от 12 мая 2017 года) для кадастровой оценки земель сельскохозяйственного назначения.

Модель расчета нормативной урожайности (МРНУ) имеет структуру:

$$U_n = [33,2 \times 1,4] \times \left[\left(\frac{АП}{10} \right) \times (K_1 \times K_2 \times K_3) \times (K_4) \right] \quad , [1]$$

где

U_n – нормативная урожайность зерновых культур, ц/га;

$[33,2 \times 1,4]$ – блок пересчета баллов бонитета почв в нормативную урожайность зерновых культур, где

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 зерновых культур при интенсивной технологии возделывания.

$$\left[\left(\frac{АП}{10} \right) \times (K_1 \times K_2 \times K_3) \times (K_4) \right] \quad \text{– модуль расчета бонитета почв, где}$$

$$\left[\frac{АП}{10} \right] \quad \text{– блок расчета агроклиматических показателей, где}$$

АП – величина местного агроклиматического потенциала для зерновых культур;

10,0 – базовое значение величины АП.

$$\left[K_1 \times K_2 \times K_3 \right] \quad \text{– блок расчета свойств почв, где}$$

K_1 – содержание гумуса в пахотном слое;

K_2 – мощность гумусового горизонта;

K_3 – содержание физической глины в пахотном слое.

$$\left[K_4 \right] \quad \text{– блок расчета негативных показателей почв, где}$$

K_4 – блок расчета суммарного влияния негативных показателей почв.

МРНУ рассчитывает урожайность зерновых культур относительно таковой эталонной почвы. В качестве последней выбран чернозем, сформированный на лёссе с содержанием 4% гумуса 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.

В перечень ИКПСХ входят характеристики почв, изменение которых трудно или не регулируется хозяйственной деятельностью.

стью. Агрохимические показатели плодородия почв, такие как содержание элементов питания растений, кислотность, состав поглощенных катионов и пр., обладают значительным пространственным варьированием в пределах отдельных производственных участков. Эти показатели регулируются внесением удобрений и мелиорантов и в перечень индикаторов качества почв не включены. Также не включены свойства, проявление которых препятствует использованию почв в земледелии, например, содержание загрязняющих и радиоактивных веществ в количествах, превышающих допустимые нормы.

В число индикаторов качества почв входят три группы:

I. Индикаторы агроклиматических условий:

1. Агроклиматический потенциал.

II. Индикаторы свойств почв:

2. Содержание гумуса в пахотном слое по методу Тюрина.

3. Мощность гумусового горизонта: в дерново-подзолистых пахотных почвах соответствует мощности горизонта A_1 или $A_{\text{пах}}$; в серых лесных и бурых лесных пахотных почвах соответствует толщине поверхностного слоя, занимаемого горизонтами A_1 и A_1A_2 ; в пахотных черноземах, лугово-черноземных и каштановых почвах включает слой, состоящий из A и B_1 горизонтов.

4. Содержание физической глины в пахотном слое: содержание фракций мелкозема размером менее 0.01 мм в %.

III. Индикаторы негативных показателей почв:

5. Легкий гранулометрический состав: преобладает песчаная фракция (частицы 0.05–1.0 мм).

6. Засоление почвы: содержание легкорастворимых солей.

7. Солонцеватость: содержание обменного натрия в почвенном поглощающем комплексе более 5% от емкости обмена.

8. Переувлажненные минеральные почвы: содержание влаги превышает 85% от предельной полевой влаго-

емкости при тяжелом гранулометрическом составе и 95% при легком гранулометрическом составе.

9. Водная эрозия: вынос, перенос и переотложение почвенной массы.

10. Каменистость и щебнистость: содержание в почве фракций, размер частиц которой превышает 3 мм и 1–3 мм соответственно.

11. Карбонатность: содержание в почве карбоната кальция в количестве, превышающем 2%.

12. Выщелоченность черноземных почв: промытость горизонтов (А + АВ) от карбонатов и других растворимых веществ.

13. Оподзоленность черноземов: наличие осветленной, мучнисто-белесой присыпки, покрывающей структурные отдельности в нижней части горизонта А и в верхней части переходного горизонта В; выщелоченность почвенного профиля от карбонатов (и других растворимых веществ) на глубину, превышающую 1–1.5 м.

14. Уплотнение гумусовых горизонтов в результате движителей сельскохозяйственной техники.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

I. Индикаторы агроклиматических условий

Агроэкологический потенциал (АП)

АП характеризует специфические требования сельскохозяйственной культуры к условиям произрастания. В нашем исследовании мы приводим формулу расчета АП для зерновых культур ([Оглезнев и др., 2007](#)).

АП рассчитывается по формуле:

$$АП = \frac{\sum t > 10^0 \times (KY - P)}{KK + 100}, \text{ где}$$

$\sum t > 10^0$ – сумма температур выше 10^0 , берется из климатических (агроклиматических) справочников;

КУ – коэффициент увлажнения (отношение количества осадков к испаряемости); величины КУ более 1.1 принимаются равными 1.1;

Р – поправка к КУ,

при $KY > 0.76$: $P = 0.20 - 0.6 (1.1 - KY)$;

при $KY = 0.76 - 0.36$: $P = 0$;

при $KY = 0.35 - 0.30$: $P = 0.35 - KY$;

при $KY < 0.30$: $P = 0.05$;

КК – коэффициент континентальности климата рассчитывается по формуле:

$$KK = \frac{360(t^{\circ} \max - t^{\circ} \min)}{\lambda + 10}, \text{ где}$$

$t^{\circ} \max$ – средняя температура самого теплого месяца;

$t^{\circ} \min$ – средняя температура самого холодного месяца;

λ – широта местности – берется с точностью до десятых долей градуса, КК берется в целых числах. Величины КК более 200 принимаются равными 200.

Пространственное размещение индикаторов агроклиматических условий не следует строго полосной зональной картине (рис. 1). Это связано с наложением на зональную картину распределения температурных условий мозаичного рисунка ареалов выпадения атмосферных осадков. В результате формируется пятнистая картина географического распределения увлажнения как отношения количества осадков к испаряемости.

Ареалы индикаторов агроклиматических условий с более высокими (лучшими) баллами (зеленые цвета – более 6 баллов), занимают около 50% площади сельскохозяйственных угодий. Территории заняты широким спектром почв, таких как пахотные серые лесные, пахотные черноземы. Площади с индикаторами агроклиматических условий со средними значениями баллов (оранжевый цвет – 4–6 баллов) занимают почти 39% пахотных угодий. Здесь получили распространение пахотные дерново-подзолистые, пахотные каштановые, пахотные бурые лесные почвы. Ареалы с

индикаторами агроклиматических условий с относительно низкими баллами (красные цвета – менее 4 баллов) занимают около 11% пашни.

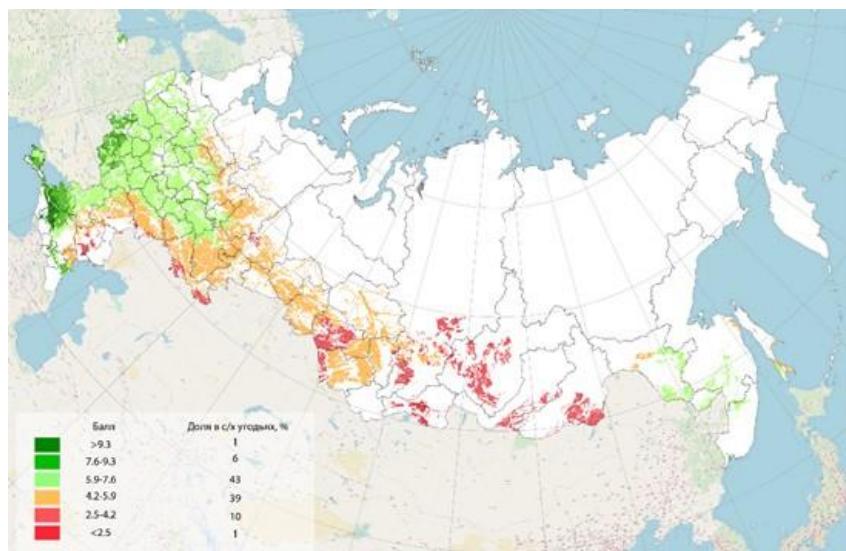


Рис. 1. Индикаторы агроклиматических условий производства зерновых по 10-балльной шкале. 10 баллов соответствует лучшим и 0 баллов – худшим агроклиматическим условиям.

Fig. 1. Indicators of agricultural and climatic conditions of grain crops production on a 10 point scale. 10 points correspond to the best and 0 points – to the worst agro-climatic conditions.

II. Индикаторы свойств почв

Содержание гумуса в пахотном слое

Роль гумуса в почвенном плодородии многогранная и разносторонняя. Трудно указать почвенное свойство, влияющее на плодородие почв, на которое органическое вещество не оказывало бы позитивного влияния. Велика роль гумуса в формировании и улучшении питательного режима культур, физико-механических (структура, плотность, пористость и др.) и физико-химических свойств (емкость поглощения, буферность и др.), биологической

активности (численность, состав почвенных организмов (микро-организмов, мезо- и макрофауны), содержание ферментов), санитарно-защитных функций почв.

Для определения содержания гумуса используется метод Тюрина ([ГОСТ 26213-91](#)).

Мощность гумусового горизонта

Мощность гумусового (пахотного) горизонта отражает эффективное и потенциальное плодородие почв. Этот показатель наряду с глубиной обработки почвы почв имеет большое значение в функционировании агроэкосистемы. При углублении пахотного горизонта создаются более благоприятные условия для развития корневой системы, повышается доступность растениям элементов минерального питания, водо- и воздухопроницаемость, усиливается микробиологическая активность, создается более устойчивый водный режим почвы, повышается эффективность борьбы с сорной растительностью, болезнями и вредителями сельскохозяйственных культур, уменьшается вынос веществ из этого горизонта в окружающую среду.

Мощность гумусового горизонта почв идентифицируется в соответствии с морфологическими признаками генетических горизонтов, которая определяется как среднее значение мощности этого горизонта из не менее чем четырех выработок (разрезов, прикопок). При оценке мощности гумусового горизонта следует иметь в виду, что, как отмечено выше, в генетически разных почвах этот горизонт может включать фрагменты разных генетических горизонтов.

Содержания физической глины в пахотном слое

Содержание физической глины в почве (суммарное процентное содержание фракций мелкозема размером менее 0.01 мм) характеризует гранулометрический состав почв, который оказывает существенное влияние на плодородие почв. При этом негативное влияние на плодородие почв оказывает как низкое (песчаные и супесчаные почвы), так и высокое содержание физической глины в почве (тяжелосуглинистые и глинистые почвы).

Песчаные и супесчаные почвы бесструктурные, бедны гумусом и элементами минерального питания, отличаются невысокой поглотительной способностью и в связи с этим обладают низкой

буферностью, что обуславливает резкое увеличение концентрации почвенного раствора и быстрое его подкисление при внесении физиологически кислых удобрений. Песчаные и супесчаные почвы имеют низкую влагоемкость. По этой причине даже в гумидном климате в жаркое время года растения, произрастающие на таких почвах, испытывают дефицит влаги. Эти почвы считают бедными и сухими.

Глинистые и тяжелосуглинистые почвы характеризуются замедленной фильтрацией и высокой влагоемкостью, что в гумидных условиях ведет к переувлажнению и развитию оглеения. Во влажном состоянии эти почвы вязкие, липкие, при высыхании становятся твердыми и тяжело обрабатываются.

Среднесуглинистые и легкосуглинистые почвы имеют наиболее благоприятные свойства для возделывания сельскохозяйственных культур.

Содержание физической глины в почве предварительно оценивают органолептически методом полевой диагностики и уточняют в лабораторных условиях ([ГОСТ 12536–2014](#)).

Пространственное размещение индикаторов свойств почв носит относительно выраженный зональный характер (рис. 2). Это в значительной степени определяется зональным характером распределения гумусово-аккумулятивных горизонтов дерново-подзолистых, серых лесных, черноземных и каштановых почв. Отмеченная зональная картина поддерживается также достаточно однородным гранулометрическим суглинистым составом пахотных почв. Супесчано-песчаные и глинистые почвы неблагоприятны для земледелия.

Ареалы индикаторов свойств почв, определяющие наименьшие потери урожайности зерновых (зеленые цвета, потери урожая менее 20%), занимают около 44% площади сельскохозяйственных угодий. Территории заняты пахотными черноземными почвами. Площади с индикаторами свойств почв, характеризующими средние значения потери урожайности зерновых культур (желто-розовые цвета, потери урожая в интервале 20–40%) занимают почти 19% пахотных угодий. Здесь получили развитие пахотные серые лесные и каштановые почвы. Территории с индикаторами свойств почв с относительно высокими потерями урожая

(красные цвета, потери урожая более 40%) занимают около 37% пашни. Территории заняты пахотными дерново-подзолистыми, а также пахотными каштановыми солонцеватыми и засоленными почвами.



Рис. 2. Индикаторы свойств почв.

Fig. 2. Soil indicators.

III. Индикаторы негативных показателей почв

Легкий гранулометрический состав

К легкому гранулометрическому составу относятся песчаные, супесчаные почвы, развитые на песках и супесях, а также на двучленных отложениях, в которых верхняя часть профиля почв сложена песками и супесями, а нижняя часть подстилается суглинками и глинами.

Почвы легкого гранулометрического состава обладают рядом негативных свойств, приводящих к снижению их плодородия

и продуктивности сельскохозяйственных культур. Они характеризуются высокой водопроницаемостью, низкой влагоемкостью, следствием чего является слабая водоудерживающая способность этих почв; практическим отсутствием структурных агрегатов, низким содержанием гумуса, низкими величинами емкости катионного обмена и поглощательной способности в целом, слабой обеспеченностью элементами минерального питания.

Предварительные данные о гранулометрическом составе почв, почвообразующих и подстилающих пород получают непосредственно при почвенном обследовании методом полевого определения гранулометрического состава. Окончательный вывод о гранулометрическом составе почв, почвообразующих и подстилающих пород делают на основе результатов определения этого свойства в лаборатории методом пипетки.

Незначительная мощность слоя мелкозема

Незначительная мощность мелкоземистого почвенного слоя, сложенного преимущественно частицами, размер которых составляет менее 1 мм, **также является фактором, ограничивающим** величину нормативной урожайности зерновых культур. Фракция мелкозема обеспечивает распространение корневых систем растений в почве, необходимое для их нормального функционирования и развития. Незначительная мощность мелкоземистого почвенного слоя (не более 30 см) может наблюдаться в остаточно-карбонатных, неполно развитых и других почвах, подстилаемых плотными породами (щебнисто-каменистый элюво-делювий известняков, сланцев и пр.). Негативное влияние на урожайность сельскохозяйственных культур может оказывать и подстиление галечником на глубине 50–100 см.

Наличие в профиле рассматриваемых почв большого количества обломков горной породы уменьшает полезный объем почвы, снижает полевою влагоемкость, препятствует обработке. Влагообеспеченность этих почв очень низкая и даже при достаточном количестве атмосферных осадков растения часто испытывают засуху. Дефицит влаги в мелкоземистом слое может усугубляться условиями его хорошего дренажа за счет высокого содержания скелетной части или относительно высокой водопроницаемости подстилающих пород. Эти почвы часто характеризуются высокой

уплотненностью и непрочной структурой. Следствием маломощности **мелкоземистого слоя** являются низкие запасы питательных веществ в рассматриваемых **почвах**.

Определяется **мощность мелкоземистого почвенного слоя** **прямым измерением его толщи от поверхности до подстилая плотными породами и галечником** как среднее значение мощности этого слоя, установленное не менее, чем в четырех выработках (разрезах, прикопках).

Засоление

Засоление почвы – процесс накопления в ней легкорастворимых солей, которые оказывают токсичное влияние на культурные растения, в результате чего может происходить как снижение их продуктивности, так и полная гибель.

Влияние легкорастворимых солей на растение обусловлено осмотическим связыванием воды и специфическим действием ионов на протоплазму. С повышением концентрации солей влага становится все менее доступной для растений. Такое явление называется физиологической засухой, т. е. при влажной почве вода не может поступать в растения. Кроме того, соли, проникая в клетку, оказывают токсическое воздействие на протоплазму. Избыток солей в почве приводит к нарушению нормального соотношения элементов минерального питания, отрицательному воздействию на свойства почв.

В связи с тем, что разные соли неодинаково токсичны для растений, засоленные почвы различают не только по концентрации, но и по составу солей. Оценка засоления почв проводится по данным анализа водной вытяжки. При этом учитывается содержание анионов (CO_3^{2-} , HCO_3^- , Cl^- , SO_4^{2-}) и катионов (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+) легкорастворимых солей, переходящих в водную вытяжку. Все легкорастворимые соли считаются токсичными для растений.

Содержание легкорастворимых солей в почвах определяют методами, изложенными в [ГОСТ 26423-85](#), [26424-85](#), [26425-85](#), [26426-85](#), [26427-85](#), [26428-85](#). По результатам анализа определяют тип и степень засоления почв.

Необходимо отметить, что, как было установлено в результате обработки данных оценки земель в субъектах РФ, на нормативную урожайность зерновых культур негативное влияние ока-

зывает залегание на глубине 0–80 см почвенных горизонтов, засоленных токсичными солями натрия. Определение количества солей натрия и оценка степени засоления осуществляется в соответствии с вышеизложенными методиками. Следует считать, что негативное влияние солей натрия, залегающих на глубине 0–80 см, на нормативную урожайность зерновых культур проявляется уже при слабой степени засоления.

Солонцеватость

Солонцеватость почв связана с наличием обменного натрия в составе почвенного поглощающего комплекса. По степени солонцеватости почвы условно разделяются на следующие группы в зависимости от содержания обменного натрия:

- 1) при содержании Na^+ меньше 5% от суммы поглощенных оснований – несолонцеватые почвы;
- 2) при содержании Na^+ 5–10% от суммы катионов – слабосолонцеватые почвы;
- 3) при содержании Na^+ 10–20% – солонцеватые почвы;
- 4) при содержании поглощенного Na^+ больше 20% – солонцы.

Обладая высокой щелочностью, солонцы отличаются вместе с тем крайне плохими физическими свойствами: бесструктурностью, заплываемостью, набухаемостью и клейкостью. Во влажном состоянии они слитые, липкие и вязкие, а в сухом – твердые и сильнотрещиноватые. Обработка солонцов очень затруднена: тракторы на влажных солонцах буксуют, на сухих же – почвообрабатывающие орудия скользят по поверхности, а при заглублении в почву ломаются. Свойства солонцов и солонцеватых почв неблагоприятны для развития растений, что приводит к снижению их продуктивности.

По глубине залегания солонцового горизонта (B_1), различают следующие группы солонцов: корковые (< 5 см), мелкие (5–10 см), средние (10–18 см) и глубокие (> 18 см).

Для установления степени солонцеватости почвы (% содержания обменного натрия от суммы катионного обмена) необходимо определить содержание обменного натрия и величину емкости катионного обмена ([ГОСТ 26950-86](#); [ГОСТ 17.4.4.01-84](#)).

Уровень плодородия солонцовых почв во многом зависит от мощности надсолонцового горизонта. Чем ближе к поверхности почвы расположен солонцовый горизонт и чем больше его мощность, тем ниже плодородие солонцов и труднее их освоение. С другой стороны, чем глубже находится солонцовый горизонт, тем легче создать нормальный пахотный слой, поэтому мощность надсолонцового горизонта является важным показателем оценки уровня плодородия этих почв. Определяется **мощность** надсолонцового горизонта **прямым измерением его толщи от поверхности до кровли иллювиального (солонцового) горизонта** как среднее значение этой толщи, установленное не менее чем в четырех выработках (разрезах, прикопках).

Избыточное увлажнение

Избыточное увлажнение является одним из важнейших факторов, ограничивающих использование почв. Этот фактор часто является лимитирующим рост и развитие сельскохозяйственных культур, и на его фоне другие благоприятные свойства почвы утрачивают положительное влияние на растения, делают малоэффективным внесение удобрений.

Согласно ГОСТ 23.001-96 минеральные почвы тяжелого гранулометрического состава считаются переувлажненными, если содержание в них влаги превышает 85% от предельной полевой влагоемкости. Аналогичный предел содержания влаги в почвах легкого гранулометрического состава достигает 95% от предельной полевой влагоемкости ([ГОСТ 28268-89](#)).

Избыточное увлажнение почв в корнеобитаемом слое с длительным заполнением водой не только капиллярных, но и крупных не капиллярных пор, имеющих воздухопроводящее значение, приводит к снижению содержания кислорода в почве и, как следствие, к установлению анаэробных условий. В результате происходит изменение органической и минеральной части почвы, а также образование веществ токсичных для растений. Избыток влаги и недостаточная аэрация подавляет деятельность аэробных микроорганизмов, тормозит разложение растительных остатков, обуславливает преобладание восстановительных процессов над окислительными. Избыток влаги приводит к увеличению плотно-

сти сложения, уменьшению порозности и водопроницаемости за счет разрушения почвенной структуры.

В избыточно увлажненных почвах протекает процесс оглеения (глееобразования). В зависимости от выраженности этого процесса определяется длительность периода избыточного увлажнения почвы. Сильная степень оглеения отмечается в почвах, испытывающих длительное или постоянное переувлажнение. При периодически длительном увлажнении формируются среднеоглеенные (глееватые) почвы, признаки оглеения в которых выражены слабее по сравнению с глеевыми почвами. При кратковременном сезонном переувлажнении (обычно весной и осенью) формируются слабооглеенные (слабоглееватые) почвы. Степень избыточного увлажнения определяют по морфологическим свойствам.

На продуктивность сельскохозяйственных культур существенное влияние оказывает тип и гранулометрический состав избыточно увлажненных почв, а также особенности их переувлажнения.

Водная эрозия

Водная эрозия является фактором разрушения почвенного покрова под действием талых, дождевых или ирригационных вод. Эрозия почв включает в себя вынос, перенос и переотложение почвенной массы. В процессе водной эрозии ухудшаются физические, химические и биологические свойства почвы. Под действием водной эрозии происходит снижение плодородия почвы, повреждение растений и потеря урожая сельскохозяйственных культур.

Диагностику эродированных почв в полевых условиях проводят по изменению морфологических признаков пахотного слоя и почвенного профиля, которые объективно отражают свойства эродированных почв и, следовательно, уровень их плодородия. При диагностике эродированных почв учитывают, какие горизонты почвы снесены при развитии водной эрозии и за счет каких горизонтов образуется пахотный слой. По степени эродированности выделяют слабо-, средне- и сильносмывные почвы. Степень смывности почв достаточно тесно связана с уклоном местности.

Несмывные почвы встречаются на склонах, крутизна которых не превышает 1° , слабосмывные – на склонах крутизной $1-3^\circ$, среднесмывные – $3-5^\circ$, сильносмывные – более 5° .

Наиболее значительно негативное влияние эродированности на плодородие почв и урожай сельскохозяйственных культур проявляется на средне- и сильноосмытых почвах.

Каменистость и щебнистость

Содержание крупных отдельностей (камней и щебня) в почвах существенно влияют на их плодородие. Фракция камней и щебня составляют скелетную часть почв (сумма фракций с размером частиц более 1 мм). При этом размер отдельностей от 1 до 3 мм соответствует щебнистой, а свыше 3 мм – каменистой фракции. Почвы с выраженной скелетной частью в основном приурочены к горным областям, занимающим обширные территории России.

По степени скелетности почвы разделяются на слабо-, средне-, сильно- и очень сильно скелетные, что соответствует содержанию скелетной части в почвах менее 10%, 10–20%, 20–50% и более 50%.

Скелетные почвы характеризуются свойствами, оказывающими в большинстве своем негативное влияние на рост и развитие растений: малой мощностью почвенного профиля и слабой дифференциацией его на генетические горизонты, наличием погребенных гумусовых горизонтов, неоднородностью гранулометрического состава, легким гранулометрическим составом мелкозема, низким содержанием гумуса (в основном менее 1%) и питательных элементов. Скелетные почвы, часто выщелоченные или слабо выщелоченные, характеризуются высоким содержанием первичных минералов, избыточно высокой (вплоть до провальной) фильтрацией, низкой влагоемкостью, высокой уплотненностью и непрочной структурой.

К положительным свойствам щебнистых (каменистых) почв следует отнести тот факт, что камни и щебень, содержащиеся в этих почвах, создают эффект мульчи, предотвращающий развитие процессов водной эрозии и уменьшающий вынос почвенного материала. Эти почвы обладают хорошими тепловыми свойствами и высокой воздухопроницаемостью.

Однако, несмотря на отдельные положительные свойства, в целом скелетные почвы в отношении основных сельскохозяйственных культур являются потенциально мало плодородными,

так как возрастание скелета равносильно снижению мощности корнеобитаемого слоя и, соответственно, снижению плодородия. Особо следует подчеркнуть относительно большую сухость каменистых почв.

Определение каменистости и щебнистости почв проводят в соответствии с методикой определения скелетной части почв ([ГОСТ 12536–2014](#)).

Карбонатность

Карбонатность почв оказывает существенное влияние на урожайность сельскохозяйственных культур. Под этим свойством понимается содержание в почве или почвообразующей породе карбоната кальция (CaCO_3) и обычно не предполагается наличие в почвах других форм карбонатов (Mg_2CO_3 , NaHCO_3 и т. д.).

В полевых условиях для оценки содержания карбонатов в почве используют результаты воздействия 10%-ной HCl на почву. Для этого в почвенных выработках (не менее чем в четырех прикопках или разрезах) определяется глубина вскипания. Если при этом отмечается устойчивое вскипание почвы с поверхности или в пахотном горизонте, то исследуемую почву относят к карбонатным. Окончательное заключение о карбонатности почв принимается на основе результатов определения карбонатов алкалиметрическим методом по Ф.И. Козловскому ([Руководство по лабораторным методам..., 1990](#)).

В зависимости от содержания карбонатов почвы разделяются на 5 градаций: слабокарбонатные (меньше 2% CaCO_3), карбонатные (2–15%), среднекарбонатные (15–25%), сильнокарбонатные (25–30%), очень сильнокарбонатные (более 30%).

Карбонатные почвы распространены как среди зональных типов на территории от подзоны лесостепи и южнее (черноземы карбонатные, каштановые карбонатные и т. д.), так и среди интразональных типов (дерново-карбонатные почвы, среди которых наиболее распространены типичные разновидности).

Дерново-карбонатные почвы гумидной зоны более плодородны по отношению к зональным почвам. Карбонатные почвы лесостепной, степной и пустынной зон в основном уступают по плодородию некарбонатным почвам. Они содержат меньше орга-

нического вещества и доступных для растений форм элементов питания. При этом наличие в почвах карбонатов приводит к уменьшению растворимости соединений фосфора и многих микроэлементов. Минеральное питание растений в присутствии избытка активной извести, обуславливающей щелочную реакцию почв, осуществляется не полностью. Избыток иона кальция затрудняет поглощение других ионов, что объясняется явлением антагонизма.

Избыточная щелочность почвы, являющаяся следствием их карбонатности, отрицательно сказывается на развитии растений и почвенных микроорганизмов, ухудшает физические свойства почв (они становятся плотными, твердыми, менее пористыми и водопроницаемыми). Растения страдают от хлороза. Дерново-карбонатные типичные почвы часто обладают повышенной вязкостью и липкостью во влажном состоянии и глыбистостью в сухом вследствие деградации структуры; характеризуются узким диапазоном активной влажности, что приводит к сжатию сроков обработки почвы.

Выщелоченность черноземов

Выщелоченность является одним из факторов снижения плодородия черноземных почв. Выщелачивание как почвенное явление представляет передвижение и вынос с растворами за пределы отдельного горизонта, почвы и коры выветривания карбоната кальция и других растворимых солей. При этом главным компонентом выщелачивания является бикарбонат кальция, существующий в природе в растворимом состоянии. Растворимость же самого кальцита крайне незначительна и не принимается во внимание. $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ при изменении концентрации раствора и содержании в нем CO_2 легко переходит снова в кальцит. Эта переходная форма кальцита формирует в почвах различного рода карбонатные новообразования, представляющие в той или иной форме карбонатный профиль (распределение карбонатов по генетическим горизонтам почвы).

Черноземы выщелоченные характеризуются совмещением процессов интенсивного накопления гумуса с выносом / выщелачиванием карбонатов из гумусового и подстилающего горизонтов. В профиле диагностируются слабые признаки элю-

виально-иллювиальной дифференциации по илу, физической глине и валовому содержанию R_2O_3 , которая может морфологически проявляться в наличии гумусовых затеков, бурых пленок и корочек по граням структурных отдельностей в горизонте В.

Основным отличительным признаком выщелоченных черноземов является отсутствие карбонатов в гумусовом горизонте и, по крайней мере, в верхней половине переходного горизонта. Морфологически черноземы относят к выщелоченным в случае положения линии вскипая от 10%-ной HCl вблизи нижней границы горизонта АВ. Аналитически глубина выщелоченности гумусового горизонта определяется по присутствию карбонатов алкалиметрическим методом ([Руководство по лабораторным методам..., 1990](#)).

Использование в сельскохозяйственном производстве выщелоченных черноземов часто приводит к негативным изменениям их кислотно-основных свойств (увеличению обменной и гидrolитической кислотности, уменьшению степени насыщенности почв основаниями), что особенно сильно проявляется при внесении физиологически кислых удобрений. Такие тенденции изменения свойств выщелоченных черноземов приводят к снижению уровня их плодородия и продуктивности сельскохозяйственных культур.

Оподзоленность черноземов

Оподзоленность является одним из факторов снижения плодородия черноземов.

Оподзоленные черноземы генетически близки темно-серым лесным почвам. Почвы характеризуются совмещением процесса интенсивного накопления гумуса и слабой элювиально-иллювиальной дифференциацией почвенного профиля под влиянием миграции кислых растворов. Основным отличительным морфологическим признаком оподзоленных черноземов является наличие осветленной, мучнисто-белесой присыпки, покрывающей структурные отдельности в нижней части горизонта А и в верхней части переходного горизонта В, которые могут обособляться в подгоризонты А" и А"В. Оподзоленные черноземы промыты от карбонатов до глубины 1–1.5 м.

При сельскохозяйственном использовании оподзоленных черноземов отмечаются негативные изменения их кислотно-основных свойств (увеличение обменной и гидролитической кислотности, уменьшение степени насыщенности почв основаниями), которые в большинстве случаев выражены сильнее в сравнении с выщелоченными черноземами. К тому же в выщелоченных иллювиальных горизонтах оподзоленных черноземов могут заметно ухудшаться агрофизические свойства.

Уплотнение гумусовых / пахотных горизонтов

Уплотнение гумусовых горизонтов оказывает негативное влияние на рост и развитие сельскохозяйственных культур. Появление уплотненных горизонтов в профиле почв может быть вызвано как в результате образования слитых и остаточно-солонцеватых горизонтов, так и вследствие антропогенного влияния, например, воздействия ходовой части техники на поверхность почвы.

Черноземы, каштановые, серо-бурые и другие почвы степной и пустынной зон могут быть остаточно-солонцеватыми (безнатровыми), то есть характеризоваться морфологическими (намечающаяся слоеватость гумусового горизонта, уплотненность горизонта В и т. п.), физическими и химическими свойствами солонцеватых почв при отсутствии или очень низком содержании (менее 3% ЕКО) обменного натрия, что должно быть подтверждено аналитически результатами определения содержания обменного натрия ([ГОСТ 26950-86](#)) и величин емкости катионного обмена ([ГОСТ 17.4.4.01-84](#)).

В профиле черноземов и лугово-черноземных глинистых почв на глубине ниже 0.3 метра может располагаться исключительно плотный (слитой) иловато-глинистый гумусовый горизонт. Окраска этого горизонта варьирует от черной до оливково-бурой. Он очень плотный, вязкий и пластичный во влажном состоянии, трещиноватый в сухом. Разбит на глыбистые или тумбовидные отдельности, ширина которых превышает 15–20 см. Характеризуется обязательным сочетанием трех показателей: 1) хаотически ориентированные поверхности скольжения относительно небольших размеров (менее 20 см в одном измерении), имеющие угол наклона от 10° до 60° к горизонтали; 2) односторонние и/или дву-

сторонние клиновидные структурные отдельности субгоризонтальной ориентации, верхние и нижние грани которых представлены поверхностями скольжения, сходящимися в виде клина; 3) сравнительно крупные (более 20–30 см в одном направлении) поверхности скольжения.

Переуплотненные почвы диагностируются по наличию пошоисто-глыбистой структуры, спрессованной и практически лишенной внутриагрегатных пор, а также по сильному растрескиванию в сухом состоянии с образованием крупных тумбовидных блоков 30–50 см в диаметре.

Появление переуплотненных почв связано с компрессионным воздействием и сжатием почвы в результате работы движителей тяжелой сельскохозяйственной техники при обработке почв, уходе за посевами, уборке урожая и пр.

Остаточно-солонцеватые, слитые и переуплотненные почвы обладают неудовлетворительным для роста и развития растений водным, воздушным и тепловым режимами, негативными биологическими, агрофизическими свойствами, что обусловлено плотностью сложения, значительно превосходящей оптимальную (более 1.4 г/см^3 , иногда достигающей 1.8 г/см^3).

С целью диагностики переуплотненных почв для определения плотности их сложения используют метод режущего кольца ([ГОСТ 5180-2015](#)).

Пространственное размещение индикаторов негативных свойств почв носит мозаичный характер (рис. 3). Такая картина связана с тем, что развитие негативных свойств обусловлено либо агрогенной деградацией пахотных почв в результате игнорирования почвоохранных норм возделывания сельскохозяйственных культур, либо особенностями литолого-геоморфологических условий. Оба перечисленных фактора не имеют прямой связи с зональными агроклиматическими условиями.

Ареалы индикаторов негативных свойств почв, определяющие наименьшие потери урожайности зерновых (желто-голубые цвета, потери урожая менее 20%), занимают около 76% площади сельскохозяйственных угодий. Территории заняты пахотными дерново-подзолистыми, серыми лесными и черноземными почвами. Площади с индикаторами негативных свойств почв, характе-

ризующими средние значения потери урожайности зерновых культур (зеленовато-голубой и светло-голубой цвета, потери урожая в интервале 20–40%) занимают почти 6% пахотных угодий. Здесь получили развитие пахотные дерново-подзолистые, бурые лесные и серые лесные почвы. Территории с индикаторами негативных свойств почв с относительно высокими потерями урожая (синий цвет, потери урожая более 40%) занимают около 18% пашни. Территории заняты пахотными каштановыми солонцеватыми и засоленными почвами.

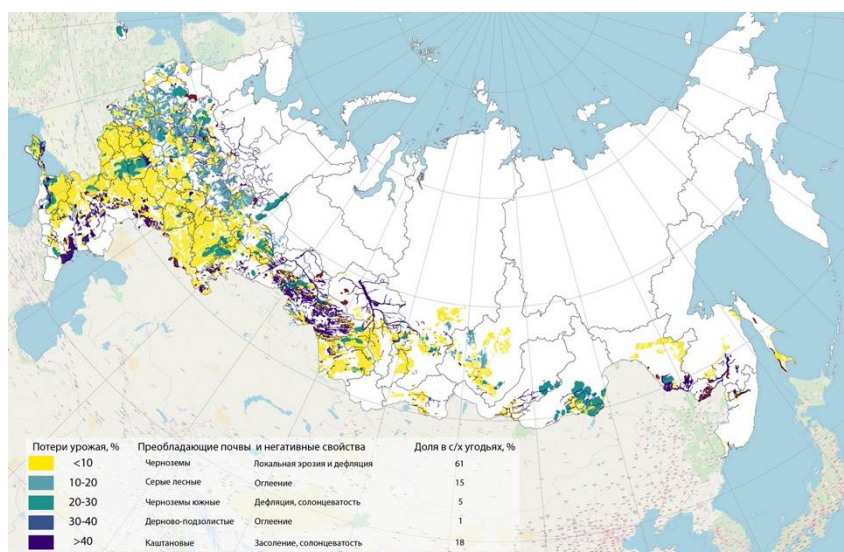


Рис. 3. Индикаторы негативных свойств почв сельскохозяйственных угодий.

Fig. 3. Indicators of unfavourable soil properties in agricultural lands.

Оценка негативных свойств является основной задачей агрономической интерпретации и обобщения данных крупномасштабных почвенных обследований в целях группировки и ранжирования почв по уровню плодородия и снижающим его негативным факторам ([Общесоюзная инструкция..., 1973](#)).

Наименования негативных свойств содержатся, как правило, в названиях почв. Например, из названия почвы “Чернозем южный малогумусный среднемощный среднесолонцеватый тяжело-суглинистый” следует, что почва относится к группе почв с негативным свойством “солонцеватость”.

В случае наличия в почве нескольких индикаторов негативных свойств их совокупное влияние на качество почв определяется произведением всех поправочных коэффициентов.

Качество почв сельскохозяйственных угодий

МРНУ [1] отражает эмпирически установленные взаимосвязи рассмотренных выше индикаторов, позволяя провести ранжирование качества почв сельскохозяйственных угодий РФ, выраженное в номинальной шкале, баллах бонитета или нормативной урожайности зерновых культур (табл. 1). Использование геоинформационной БД ПСХР позволяет построить карту географического размещения качества почв по 54 695 КЕКП (рис. 4).

Анализ карты качества почв сельскохозяйственных угодий (рис. 4) показал, что площадь под черноземными почвами высокого качества, имеющими бонитет более 80 баллов и нормативную урожайность, превышающую 40 ц/га, составляет около 10% площади пахотных земель страны. Более 74% площади пахотных почв, представленных черноземами оподзоленными и выщелоченными в северной части и черноземами южными в южной части ареала сельскохозяйственных угодий РФ, характеризуются качеством “выше среднего” и “средним” (соответственно 40–60 и 20–40 баллов бонитета) для выращивания зерновых или, соответственно, нормативную урожайность 30–40 ц/га и 20–30 ц/га.

Площади почв из категории “ниже среднего”, включающих в северной части дерново-подзолистые и светло-серые почвы, а также каштановые почвы в южной части ареала пахотных земель РФ, имеющих 40–60 баллов бонитета и нормативную урожайность зерновых 10–20 ц/га, составляют около 14%. Почвы низкого качества, имеющие бонитет менее 20 баллов и нормативную урожайность меньше 10 ц/га, занимают около 10% площади пашни страны.

Таблица 1. Эквивалентность категорий качества почв земель сельскохозяйственного назначения

Table 1. Equivalence of soil quality categories of agricultural lands

Индекс качества почв	Бонитет почв, балл	Нормативная урожайность зерновых, ц/га
Высокий	> 80	> 40
Выше среднего	60–80	30–40
Средний	40–60	20–30
Ниже среднего	20–40	10–20
Низкий	< 20	< 10

Анализ вклада (относительной значимости) отдельных индикаторов в географическое размещение земельных угодий по качеству почв в значительной мере контролируется негативными свойствами почв, которые могут быть улучшены при более строгом соблюдении почвоохранных технологий возделывания культур или проведении мелиоративных мероприятий. Определенное влияние на снижение качества пахотных почв оказывают и неудовлетворительные агроклиматические условия – низкая теплообеспеченность северных регионов и дефицит увлажнения южных районов.

Подход к оценке качества почв на основе выбора индикаторов, включая параметры, используемые в модели расчета качества (МРНУ), соответствует методам, применяемым в США, Канаде, Китае и др. Перечень предложенных в статье индикаторов содержит параметры, входящие в обсуждаемую новую почвенную стратегию Европейского Союза “Здоровые почвы”, такие как поддержание плодородия, борьба с эрозией, увеличение содержания органического вещества, определение индикаторов “хорошего экологического состояния почв” и др. ([Healthy soils..., 2020](#)).

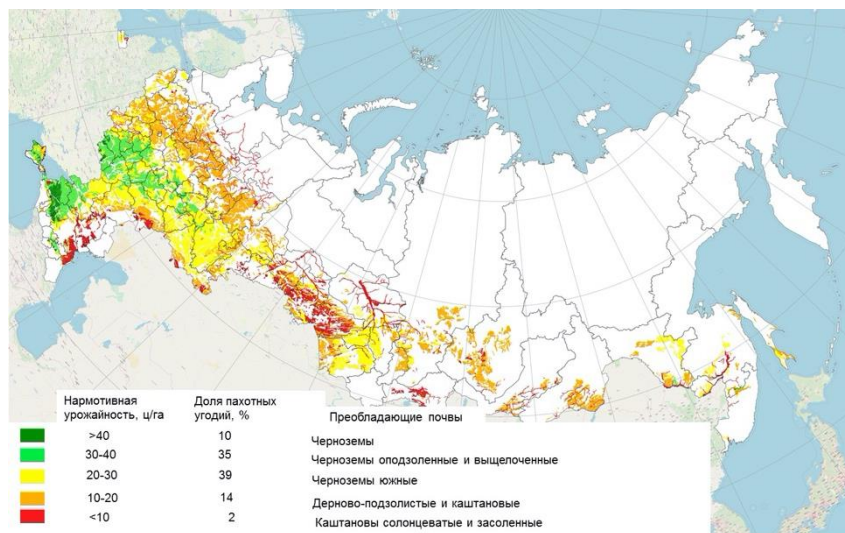


Рис. 4. Качество почв сельскохозяйственных угодий (нормативная урожайность зерновых культур).

Fig. 4. Soil quality in agricultural lands (standard grain yield).

Близкий по сути подход применяется в ФАО “Глобальное агроэкологическое зонирование” ([IIASA/FAO, 2012](#)). В основе обсуждаемого метода определения качества почв на базе МРНУ, так же как и в зарубежных моделях, построенных на принципах оценки земель (land evaluation), лежит использование специфических для каждой культуры зависимостей (рейтингов) “фактор / свойство / урожай” и их агрегация по принципу какого-либо интегрирующего алгоритма. Этот вывод важен для понимания того, что представленный в статье подход находится в ряду современных методов оценки качества сельскохозяйственных почв, используемых в мире. При этом необходимо подчеркнуть, что использованный в нашей работе подход к оценке качества почв сельскохозяйственных угодий РФ имеет неоспоримое достоинство, поскольку базируется на огромном научно-практическом отечественном опыте фундаментальных почвенных исследований, земельно-устроительных и земельно-оценочных кадастровых работ, исторически накопленных полевых и экспериментальных

данных Госкомзема, Гипроводхоза и др. Трансляция этого опыта в цифровой формат не только позволяет сохранить накопленные знания, но также открывает возможности их использования в разработке современных информационных технологий для охраны и рационального использования почвенных ресурсов страны.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представлено три группы индикаторов качества почв сельскохозяйственных угодий РФ (ИКПСХ), включая индикаторы агроклиматических условий, индикаторы свойств почв и индикаторы негативных свойств почв. Выбор индикаторов качества почв соответствует требованиям модели расчета нормативной урожайности сельскохозяйственной культуры (МРНУ). Модель оперирует на основе 10 107 ТЕКП, связанных с ними 54 695 КЕПК геоинформационной базы данных “Почвы сельскохозяйственных угодий РФ”.

МРНУ отражает эмпирически установленные взаимосвязи рассмотренных выше индикаторов с урожаем сельскохозяйственных культур, позволяя провести ранжирование качества почв сельскохозяйственных угодий и построить карту географического размещения качества почв.

Показано, что площадь черноземных почв высшего качества, имеющих бонитет более 80 баллов и нормативную урожайность зерновых культур, превышающую 40 ц/га, составляет около 10% ареала пахотных почв, при том что доля площади черноземных почв в пахотном фонде страны составляет 66% ([Столбовой, 2018](#)). Более 74% массива пахотных почв, представленных черноземами оподзоленными и выщелоченными в северной части земледельческой зоны и черноземами южными в южной части ареала сельскохозяйственных угодий РФ, по качеству относятся к категориям “выше среднего” и “средние”, имеющим бонитет соответственно 60–80 и 40–60 баллов, обеспечивая урожайность зерновых 30–40 ц/га и 20–30 ц/га соответственно. Площади почв из категории “ниже среднего”, включающих в северной части дерново-подзолистые и светло-серые почвы, а также каштановые почвы в южной части ареала пахотных земель РФ, имеющих 40–60 баллов бонитета и нормативную урожайность зерновых 10–20 ц/га, со-

ставляют около 14%. Почвы низкого качества, имеющие бонитет менее 20 баллов и нормативную урожайность меньше 10 ц/га, занимают около 10% площади пашни страны.

Предложенные индикаторы обладают универсальностью, отвечая требованиям оценки качества почв сельскохозяйственных угодий, государственного мониторинга сельскохозяйственных земель и кадастровой оценки земель сельскохозяйственного назначения. Отмеченная универсальность позволяет рекомендовать использование индикаторов качества почв для разработки нормативов по охране и рациональному использованию почв в рамках “регуляторной гильотины” новой генерации, включая внедрение современных цифровых технологий и ГИС-подходов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Богатырев Л.Г., Маслов М.Н., Бенедиктова А.И., Макаров М.И. Оценка почв и земель (основные показатели и критерии) / Науч. ред. Г.С. Куст. М.: МАКС Пресс, 2017. 192 с.
2. ГОСТ 26213-91. Почвы. Методы определения органического вещества.
3. ГОСТ 12536-2014. Грунты. Методы лабораторного определения гранулометрического (зернового) и микроагрегатного состава.
4. ГОСТ 26423-85. Почвы. Методы определения удельной электрической проводимости, pH и плотного остатка водной вытяжки.
5. ГОСТ 26424-85. Почвы. Метод определения ионов карбоната и бикарбоната в водной вытяжке.
6. ГОСТ 26425-85. Почвы. Методы определения иона хлорида в водной вытяжке.
7. ГОСТ 26426-85. Почвы. Методы определения иона сульфата в водной вытяжке.
8. ГОСТ 26427-85. Почвы. Метод определения натрия и калия в водной вытяжке.
9. ГОСТ 26428-85. Почвы. Методы определения кальция и магния в водной вытяжке.
10. ГОСТ 26950-86. Почвы. Метод определения обменного натрия.
11. ГОСТ 17.4.4.01-84. Охрана природы. Почвы. Методы определения емкости катионного обмена.
12. ГОСТ 28268-89. Межгосударственный стандарт. Почвы. Методы определения влажности, максимальной гигроскопической влажности и влажности устойчивого завядания растений.

13. ГОСТ 5180-2015. Грунты. Методы лабораторного определения физических характеристик.
14. Единый государственный реестр почвенных ресурсов России. Версия 1.0. М.: Почвенный институт им. В.В. Докучаева, 2014. 768 с.
15. Качество почв сельскохозяйственных угодий Российской Федерации (для кадастровой оценки сельскохозяйственных земель). Версия 1.0 / А.Л. Иванов (гл. ред.). М.: Почвенный институт им. В.В. Докучаева, 2020. 681 с. (в печати).
16. Качество почвы. Определение воздействия загрязняющих веществ на флору почвы. Часть 2. Воздействие загрязненной почвы на всхожесть и ранний рост высших растений. URL:
<http://www.gostinfo.ru/catalog/Details/?id=5307547>.
17. Кирюшин В.И. Оценка качества земель и плодородия почв для формирования систем земледелия и агротехнологий. Почвоведение. 2007. № 7. С. 873–880.
18. Концепция 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. Распоряжение Правительства Российской Федерации от 30.07.2010 № 1292-р.
19. Методические рекомендации по оценке качества и классификации земель по их пригодности для использования в сельском хозяйстве. Утверждены Федеральной службой земельного кадастра России. М. 2003. 169 с.
20. Методические указания о проведении государственной кадастровой оценки. Приказ МЭР РФ № 226 от 12 мая 2017 года.
21. Общесоюзная инструкция по почвенным обследованиям и составлению крупномасштабных почвенных карт землепользования. М.: Колос, 1973. 48 с.
22. Оглезнев А.К. и др. Справочник агроклиматического оценочного зонирования субъектов Российской Федерации. М.: Маросейка, 2010, 208 с.
23. Оглезнев А.К. и др. Оценка качества и классификация земель по их пригодности для использования в сельском хозяйстве (практическое пособие). М. 2007. 131 с.
24. Оценка земель Краснодарского края. Отчет Кубаньгипрозем. Т. 2. Кн. 1. Оценочные шкалы почв по продуктивности. Краснодар, 1989.
25. Постановление Правительства РФ от 13 февраля 2019 г. № 149 “О разработке, установлении и пересмотре нормативов качества окружающей среды для химических и физических показателей состояния

окружающей среды, а также об утверждении нормативных документов в области охраны окружающей среды, устанавливающих технологические показатели наилучших доступных технологий”

26. Природно-сельскохозяйственное районирование земельного фонда СССР. М.: Колос, 1983. 336 с.

27. Сапожников П.М., Носов С.И. Государственная кадастровая оценка земель сельскохозяйственного назначения Российской Федерации. М.: ООО “НИПКЦ ВОСХОД–А”, 2012. 160 с.

28. Столбовой В.С. Почвенные ресурсы России – современные вызовы. Материалы по изучению русских почв. Сб. науч. докл. Вып. 11 (38). СПб. 2018. С. 24–41.

29. Хитров Н.Б., Понизовский А.А. Руководство по лабораторным методам исследования ионно-солевого состава нейтральных и щелочных минеральных почв. М., 1990, 238 с.

30. Bunemann E.K., Bongiorno G., Bai Z.G., Creamer R.E., De Deyn G., de Goede R. et al. Soil quality – a critical review // Soil Biol. Biochem. 2018. No. 120. P. 105–125. DOI: [10.1016/j.soilbio.2018.01.030](https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2018.01.030).

31. Global Agroecological Zones (GAEZ v 3.0). IIASA, Laxenburg, Austria and FAO, Rome, Italy. 2012.

32. Healthy soils – new EU soil strategy. URL: <https://ec.europa.eu/info/law/better-regulation/have-your-say/initiatives/12634-New-EU-Soil-Strategy-healthy-soil-for-a-healthy-life>.

33. Nortcliff S. Standardization of soil quality attributes // Agriculture Ecosystems & Environment. 2002. Vol. 88. Iss. 2. P. 161–168.

34. Soil Health. USDA, National Resources Conservation Service. URL: <http://www.nrcs.usda.gov/wps/portal/nrcs/main/soils/health/>.

REFERENCES

1. Bogatyrev L.G., Maslov M.N., Benediktova A.I., Makarov M.I., Kust G.S. (Ed.), *Otsenka pochv i zemel' (osnovnye pokazateli i kriterii)* (Assessment of soils and lands (main indicators and criteria)), Moscow: MAKSS Press, 2017, 192 p.

2. GOST 26213-91. *Pochvy. Metody opredeleniya organicheskogo veshchestva* (Soils. Methods for the determination of organic matter).

3. GOST 12536-2014. *Grunty. Metody laboratornogo opredeleniya granulometricheskogo (zernovogo) i mikroagregatnogo sostava* (Soils. Methods for laboratory determination of particle size distribution and micro-aggregate composition.).

4. GOST 26423-85. *Pochvy. Metody opredeleniya udel'noi elektricheskoi provodimosti, rN i plotnogo ostatka vodnoi vytyazhki* (Soils. Methods for de-

termining the specific electrical conductivity, pH and solid residue of the aqueous extract).

5. GOST 26424-85. *Pochvy. Metod opredeleniya ionov karbonata i bikarbonata v vodnoi vytyazhke* (Soils. Method for determination of carbonate and bicarbonate ions in an aqueous extract).

6. GOST 26425-85. *Pochvy. Metody opredeleniya iona khlorida v vodnoi vytyazhke* (Soils. Methods for determination of chloride ion in aqueous extract).

7. GOST 26426-85. *Pochvy. Metody opredeleniya iona sul'fata v vodnoi vytyazhke* (Soils. Methods for the determination of sulfate ion in aqueous extract).

8. GOST 26427-85. *Pochvy. Metod opredeleniya natriya i kaliya v vodnoi vytyazhke* (Soils. Method for the determination of sodium and potassium in an aqueous extract).

9. GOST 26428-85. *Pochvy. Metody opredeleniya kal'tsiya i magniya v vodnoi vytyazhke* (Soils. Methods for the determination of calcium and magnesium in an aqueous extract).

10. GOST 26950-86. *Pochvy. Metod opredeleniya obmennogo natriya* (Soils. Method for the determination of exchangeable sodium).

11. GOST 17.4.4.01-84. *Okhrana prirody. Pochvy. Metody opredeleniya emkosti kationnogo obmena* (Protection of Nature. Soils. Methods for determining the capacity of cation exchange).

12. GOST 28268-89. *Mezghosudarstvennyi standart. Pochvy. Metody opredeleniya vlazhnosti, maksimal'noi gigroskopicheskoi vlazhnosti i vlazhnosti ustoichivogo zavyadaniya rastenii* (Interstate standard. Soils. Methods for determination of moisture content, maximum hygroscopic moisture content and moisture content of sustainable plant wilting).

13. GOST 5180-2015. *Grunty. Metody laboratornogo opredeleniya fizicheskikh kharakteristik* (Soils. Methods for laboratory determination of physical characteristics).

14. *Edinyi gosudarstvennyi reestr pochvennykh resursov Rossii. Versiya 1.0.* (Unified State Register of Soil Resources of Russia. Version 1.0.), Moscow: V.V. Dokuchaev Soil Science Institute, 2014, 768 p.

15. Ivanov A.L. (Ed.), *Kachestvo pochv sel'skokhozyaistvennykh ugodii Rossiiskoi Federatsii (dlya kadaстровой otsenki sel'skokhozyaistvennykh zemel')*. Versiya 1.0 (Soil quality of agricultural land in the Russian Federation (for cadastral valuation of agricultural land). Version 1.0), Moscow: V.V. Dokuchaev Soil Science Institute, 2020, 681 p. (in print).

16. Soil quality – Determination of the effects of pollutants on soil flora – Part 2: Effects of contaminated soil on the emergence and early growth of higher

plants (ISO 11269-2:2012); German version EN ISO 11269-2:2013. URL:
<http://www.gostinfo.ru/catalog/Details/?id=5307547>.

17. Kiryushin V.I., Otsenka kachestva zemel' i plodorodiya pochv dlya formirovaniya sistem zemledeliya i agrotekhnologii (Assessment of land quality and soil fertility for the formation of farming systems and agricultural technologies), *Pochvovedenie*, 2007, No. 7, pp. 873–880.

18. Kontseptsiya razvitiya gosudarstvennogo monitoringa zemel' sel'skokhozyaistvennogo naznacheniya i zemel', ispol'zuemykh dlya vedeniya sel'skogo khozyaistva v sostave zemel' inykh kategorii, i formirovaniya gosudarstvennykh informatsionnykh resursov ob etikh zemlyakh na period do 2020 g. *Rasporyazhenie Pravitel'stva Rossiiskoi Federatsii ot 30.07.2010 № 1292-p*. (The concept for the development of state monitoring of agricultural land and land used for agriculture as part of land of other categories, and the formation of state information resources about these lands for the period until 2020. Order of the Government of the Russian Federation of 30.07.2010 No. 1292-r.)

19. *Metodicheskie rekomendatsii po otsenke kachestva i klassifikatsii zemel' po ikh prigodnosti dlya ispol'zovaniya v sel'skom khozyaistve. Uтверждены Федеральными службами земельного кадастра России* (Methodical recommendations for assessing the quality and classification of lands according to their suitability for use in agriculture. Approved by the Federal Land Cadastre Service of Russia), Moscow, 2003, 169 p.

20. *Metodicheskie ukazaniya o provedenii gosudarstvennoi kadaastrovoi otsenki. Prikaz MER RF № 226 ot 12 maya 2017 goda* (Guidelines for conducting state cadastral valuation. Order of the Ministry of Economic Development of the Russian Federation No. 226 dated May 12, 2017).

21. *Obshchесоюзная инструкция по почвенным обследованиям и составлению крупномасштабных почвенных карт землепользования* (All-Union instruction on soil surveys and compilation of large-scale soil land use maps), Moscow: Kolos, 1973, 48 p.

22. Ogleznev A.K. et al., *Spravochnik agroklimaticheskogo otsenochного зонирования субъектов Российской Федерации* (Directory of agroclimatic assessment zoning of the subjects of the Russian Federation), Moscow: Maroseika, 2010, 208 p.

23. Ogleznev A.K. et al., *Otsenka kachestva i klassifikatsiya zemel' po ikh prigodnosti dlya ispol'zovaniya v sel'skom khozyaistve (prakticheskoe posobie)* (Assessment of the quality and classification of lands according to their suitability for use in agriculture (practical guide)), Moscow, 2007, 131 p.

24. *Otsenka zemel' Krasnodarskogo kraya. Otchet Kuban'giprozem. T. 2. Kn. 1. Otsenochnye shkaly pochv po produktivnosti* (Assessment of the lands of the Krasnodar Territory. Kubangiprozem report. T. 2. Book. 1. Evaluation scales of soil productivity), Krasnodar, 1989.

25. *Postanovlenie Pravitel'stva RF ot 13 fevralya 2019 g. № 149 "O razrabotke, ustanovlenii i peresmotre normativov kachestva okruzhayushchei sredy dlya khimicheskikh i fizicheskikh pokazatelei sostoyaniya okruzhayushchei sredy, a takzhe ob utverzhdenii normativnykh dokumentov v oblasti okhrany okruzhayushchei sredy, ustanavlivayushchikh tekhnologicheskie pokazateli nailuchshikh dostupnykh tekhnologii"* (Decree of the Government of the Russian Federation of February 13, 2019 No. 149 "On the development, establishment and revision of environmental quality standards for chemical and physical indicators of the state of the environment, as well as on the approval of regulatory documents in the field of environmental protection, establishing technological indicators of the best available technologies").
26. *Prirodno-sel'skokhozyaistvennoe raionirovanie zemel'nogo fonda SSSR* (Natural and agricultural zoning of the land fund of the USSR), Moscow: Kolos, 1983, 336 p.
27. Sapozhnikov P.M., Nosov S.I., *Gosudarstvennaya kadastravaya otsenka zemel' sel'skokhozyaistvennogo naznacheniya Rossiiskoi Federatsii* (State cadastral valuation of agricultural land in the Russian Federation), Moscow: OOO "NIPKTS VOSKhOD-A", 2012, 160 p.
28. Stolbovoi V.S., *Pochvennye resursy Rossii – sovremennye vyzovy. Materialy po izucheniyu russkikh pochv* (Soil resources of Russia – modern challenges. Materials for the study of Russian soils), *Sb. nauch. dokl.* (Collection of scientific reports), Iss. 11 (38), St-Petersburg, 2018, pp. 24–41.
29. Khitrov N.B., Ponizovsky A.A., *Guidance on laboratory methods for studying the ion and salt composition of neutral and alkaline mineral soils*, Moscow, 1990, 238 p.
30. Bunemann E.K., Bongiorno G., Bai Z.G., Creamer R.E., De Deyn G., de Goede R. et al., Soil quality – a critical review, *Soil Biol. Biochem.*, 2018, No. 120, pp. 105–125, DOI: [10.1016/j.soilbio.2018.01.030](https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2018.01.030).
31. Global Agroecological Zones (GAEZ v3.0), IIASA, Laxenburg, Austria and FAO, Rome, Italy. 2012.
32. *Healthy soils – new EU soil strategy*, URL: <https://ec.europa.eu/info/law/better-regulation/have-your-say/initiatives/12634-New-EU-Soil-Strategy-healthy-soil-for-a-healthy-life>.
33. Nortcliff S., Standardization of soil quality attributes, *Agriculture Ecosystems & Environment*, 2002, Vol. 88, Iss. 2, pp. 161–168.
34. Soil Health, USDA, National Resources Conservation Service, URL: <http://www.nrcs.usda.gov/wps/portal/nrcs/main/soils/health/>.

УДК 631.4:631.67

DOI: 10.19047/0136-1694-2020-104-68-109



Ссылки для цитирования:

Зинченко Е.В., Горохова И.Н., Круглякова Н.Г., Хитров Н.Б. Современное состояние орошаемых почв юга Приволжской возвышенности // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2020. Вып. 104. С. 68-109. DOI: 10.19047/0136-1694-2020-104-68-109

Cite this article as:

Zinchenko E.V., Gorokhova I.N., Kruglyakova N.G., Khitrov N.B., Modern state of irrigated soils at the south of the Volga upland, Dokuchaev Soil Bulletin, 2020, V. 104, pp. 68-109, DOI: 10.19047/0136-1694-2020-104-68-109

Современное состояние орошаемых почв юга Приволжской возвышенности

© 2020 г. Е. В. Зинченко^{1*}, И. Н. Горохова²,
Н. Г. Круглякова¹, Н. Б. Хитров^{2**}

¹ФГБНУ Всероссийский научно-исследовательский институт
орошаемого земледелия, Россия,
400002, Волгоград, ул. им. Тимирязева, 9,

*<https://orcid.org/0000-0002-9953-2319>, e-mail: zinchenko_ev@vniioz.ru.

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

**<https://orcid.org/0000-0001-5151-5109>, e-mail: khitrovnbg@gmail.com.

Поступила в редакцию 17.05.2020, после доработки 07.09.2020,
принята к публикации 11.11.2020

Резюме: Цель – оценить влияние 50-летнего орошения дождеванием на почвенные процессы, происходящие в светло-каштановых почвах (Luvic Kastanozem (Loamic, Aric, Protosodic, Bathysalic)) южных склонов Приволжской возвышенности Волго-Донского междуречья (ФГУП “Орошаемое” Волгоградской области) при глубоких грунтовых водах. Вода для полива подается из Варваровского водохранилища системы Волго-Донского канала. Она имеет минерализацию около 1 г/л, гидрокарбонатно-хлоридно-сульфатный состав с повышенным содержанием натрия. Представлено подробное морфологическое описание почвенных профилей, гранулометрический состав, содержание

легкорастворимых солей в почвах и грунтах зоны аэрации до глубины 3.5 м, динамика солей в слое 0–50 см за 2011–2019 гг. До осени 2015 г. исследуемые почвы были глубокосолончаковатыми, являясь незасоленными в слое 0–100 см. В последние годы в слое 0–50 см отмечается слабая степень засоления содово-хлоридного натриевого химизма в результате постепенного накопления солей поливной воды при орошении, основанном на данных по водопотреблению сельскохозяйственных культур. Орошаемые почвы приобрели комплекс признаков вторичной солонцеватости: (1) наличие светлых скоплений песчаных и пылеватых зерен минералов в пахотном горизонте как результат разрушающего воздействия капель оросительной воды при дождевании; (2) токсичную щелочность, связанную с натрием, по данным водной вытяжки, в горизонтах от 10–20 до 60–100 см; (3) обильные гумусово-глинистые кутаны на боковых гранях призматических структурных отдельностей в ненарушенной части почвенного профиля от 30 до 100 см.

Ключевые слова: деградация почвы, вторичное осолонцевание почв, засоление почв, мониторинг засоления, гумусово-глинистые кутаны, светло-каштановые почвы.

Modern state of irrigated soils at the south of the Volga upland

E. V. Zinchenko^{1*}, I. N. Gorokhova²,
N. G. Kruglyakova¹, N.B. Khitrov^{2**}

¹FSBSI All-Russian research Institute of irrigated agriculture
9 Timiryazeva Str., Volgograd 400002, Russian Federation,

*<https://orcid.org/0000-0002-9953-2319>, e-mail: zinchenko_ev@vniioz.ru.

²Federal Research Centre “V.V. Dokuchaev Soil Science Institute”,
7 Bld. 2 Pyzhevskiy per., Moscow 119017, Russian Federation,

**<https://orcid.org/0000-0001-5151-5109>, e-mail: khitrovn@gmail.com.

Received 17.05.2020, Revised 07.09.2020, Accepted 11.11.2020

Abstract: The goal is to assess the impact of 50-year irrigation by sprinkling on soil processes occurring in the light-chestnut soils (Luvic Kastanozem (Loamic, Aric, Protosodic, Bathysalic)) of the southern slopes of the Volga upland at the Volga-Don interfluvium (FSUE “Oroshaemoe”, the Volgograd region) with deep ground water. Water for irrigation is supplied from the Varvarovsky reservoir of the Volga-Don Canal system. It is characterized by a total dissolved salts of about 1 g/l, a bicarbonate-chloride-sulfate composition

with an increased sodium content. Detailed morphological description of soil profiles, granulometric composition, content of soluble salts in soils and sediments of the vadoze zone up to the depth of 3.5 m, dynamics of salts in the layer of 0–50 cm for 2011–2019 are presented. Until the autumn of 2015, the studied soils were deep saline, being no saline in the layer of 0–100 cm. In recent years, a weak salinity degree of soda-chloride sodium chemistry has been observed in the 0–50 cm layer as a result of gradual accumulation of irrigation water salts during irrigation organized according to water consumption of agricultural crops. Irrigated soils have acquired a complex of signs of secondary salinity: (1) the presence of light accumulations of sandy and silt mineral grains in the arable horizon, resulting from the destructive effect of irrigation water drops during sprinkling; (2) toxic alkalinity associated with sodium (residual sodium carbonate), according to water extraction 1 : 5 (soil : water), in the horizons from the depth of 10–20 to 60–100 cm; (3) abundant humus-clay cutans on the lateral side faces of prismatic structural units in the undisturbed part of the soil profile from 30 to 100 cm.

Keywords: soil degradation, secondary soil alkalization, soil salinity, salinity monitoring, humus-clay cutans, Kastanozems.

ВВЕДЕНИЕ

Волгоградская область является одним из главных регионов орошаемого земледелия в России. Максимум ирригационного освоения отмечался в 1989 г. – 345 тыс. га, что составляло 4.6% от площади сельскохозяйственных угодий ([Панкова, Новикова, 2004](#)).

Широкомасштабное развитие орошения с интенсивным промывным режимом в последней четверти XX века привело к тому, что практически на всех орошаемых массивах, за исключением земель, расположенных на высоких отметках и хорошо дренированных, автоморфный режим трансформировался в ирригационно-гидроморфный или полугидроморфный. Это обусловило в значительной степени резкое ухудшение почвенно-мелиоративных условий в результате активизации процессов засоления, осолонцевания, ощелачивания, дезагрегации, преувлажнения, заболачивания ([Зимовец, 1991](#); [Панкова, Новикова, 2004](#); [Кирпо, 2015](#)). Для устранения деградационных процессов потребовалось строительство дренажа, сброс дренажных вод в речную сеть, что привело к ухудшению состояния природной среды, поч-

венных и водных ресурсов.

Барановской и Азовцевым ([Барановская, Азовцев, 1972](#)) был выявлен процесс ирригационного окарбоначивания почв в сухостепной зоне в России, заключающийся в уменьшении водопроницаемости за счет накопления в поверхностных горизонтах карбонатов кальция независимо от глубины залегания грунтовых вод и даже на фоне промывки легкорастворимых солей на значительную глубину. Похожие процессы отмечались в работах Сиземской (2013), Любимовой и Новиковой ([2016](#)). Считается, что возможно поступление карбонатов с поливной водой ([Барановская, Азовцев, 1972](#); [Wu et al., 2008](#)), хотя в зависимости от карбонатно-кальциевого равновесия возможно и выщелачивание карбонатов в процессе орошения ([de Soto et al., 2017](#)).

В Волгоградской области широко распространены естественные засоленные почвы, большая часть которых представлена солонцовыми комплексами ([Новикова, Морозова, 2003](#)). При орошении их солевое состояние менялось в зависимости от условий. При подъеме уровня грунтовых вод отмечалось вторичное засоление, при сохранении глубокого положения грунтовых вод и в условиях хорошего дренажа – рассоление верхних горизонтов с появлением соды ([Зимовец, 1991](#); [Новикова, Морозова, 2003](#); [Кирпо, 2015](#)). Последовательное рассоление солонцов наблюдали при целенаправленной их комплексной мелиорации в условиях орошения ([Зимовец, 1991](#); [Кружилин, Казакова, 2003](#); [Кружилин и др., 1991](#)).

Изменение экономической ситуации в стране в 1990-х – 2000-х годах вызвало сокращение площади орошаемых земель, прежде всего, за счет вывода из оборота вторично засоленных почв ([Панкова, Новикова, 2004](#)), с одной стороны, и постепенный переход на более прогрессивные технологии и режимы орошения ([Дубенок и др., 2018](#)), с другой.

По данным Государственного (Национального) доклада о состоянии и использовании земель ([Государственный..., 2019](#)) в Волгоградской области на 01.01.2018 г. орошалось 180.7 тыс. га, из них в неудовлетворительном состоянии (по засолению и солонцеватости почв, уровню грунтовых вод) находилось 23.8 тыс. га, или 13% орошаемого фонда. В настоящее время крайне важно

провести оценку современного состояния почвенного покрова при реконструкции орошаемых систем, находящихся в различных природных районах.

В предыдущих статьях ([Горохова и др., 2018, 2019](#); [Кра-вченко и др., 2018](#); [Хитров и др., 2019](#)) представлены результаты исследований почв разных участков Светлоярской оросительной системы, находящихся на Сарпинской низменной равнине и в Сарпинской ложбине, входящих в состав Прикаспийской низменности, а также на северных склонах возвышенности Ергени. Настоящая статья посвящена почвам оросительной системы Волго-Донского канала, расположенной на Приволжской возвышенности.

На территории агроландшафта в опытно-производственном хозяйстве Всероссийского научно-исследовательского института орошаемого земледелия (ВНИИОЗ) более 50 лет ведутся исследования с целью разработки адаптивно-ландшафтной системы орошаемого земледелия, обеспечивающие устойчивую урожайность и рациональное использование природных, биологических и техногенных ресурсов. Обоснованы оросительные нормы в зависимости от продуктивности севооборота ([Дубенок и др., 2018](#)), система норм и нормативов водопотребления для получения программируемой урожайности на уровне 8...12 т/га зерна и 60...100 т/га зеленой массы кукурузы ([Иванов, Даниленко, 2010](#)), 800...900 кг/га семян и 60...120 т/га зеленой массы люцерны 40...100 т/га зеленой массы клевера лугового и козлятника восточного ([Дронова и др., 2017](#)), 30...60 т/га клубней картофеля, 4...5 т/га зерна риса ([Кружилин и др., 2009, 2015](#)), 3...4 т/га зерна сои, 80...100 т/га зеленой массы сорго ([Иванов, Даниленко, 2010](#); [Мелихов и др., 2011](#)). Предложены приемы комплексной мелиорации содово-сульфатных солонцов ([Кружилин, Казакова, 2003](#)).

Большая часть почв агроландшафта считалась солончаковыми средне и сильнозасоленными ([Новикова, Морозова, 2003](#)).

По неопубликованным данным Л.А. Казаковой² орошение почв в 1990-х годах сопровождалось постепенным уменьшением содержания легкорастворимых солей до средней и слабой степени, хотя почвы оставались солончаковатыми, поскольку первые от поверхности засоленные горизонты начинались с глубины 0.6–0.8 м.

Важным фактором, влияющим на мелиоративное состояние орошаемых почв, является состав и минерализация поливных вод, которые, в свою очередь, определяются особенностями формирования водных источников, используемых для орошения ([Безднина, 1997](#); [Зимовец, Хитров, 1993](#)). Минерализация речных вод обычно постепенно увеличивается за счет возрастания роли испарения с поверхности водохранилищ, увеличения доли дренажных и возвратных вод, сброса в реки городских и промышленных стоков. Аналогичное явление наблюдается по мере прохождения воды по магистральному каналу, имеющему участки с земляным руслом ([Кадаева, 2013](#)). Одновременно в воде меняется соотношение ионов в сторону увеличения доли натрия и магния относительно кальция, роста концентрации сульфатов и хлоридов в результате растворения солей из засоленных пород ([Дедова, 2018](#)). Подобные явления характерны и для Волго-Донского канала с Варваровским и Береславским водохранилищами, а также Волгоградского и Цимлянского водохранилищ ([Болотин и др., 2018](#)).

В современной мировой литературе обсуждаются способы мелиорации засоленных и щелочных почв применительно к местным условиям ([Zaman et al., 2018](#)), картографирования засоленных почв на основе дистанционной информации ([Yahiajui et al., 2015](#); [Fourati et al., 2017](#)), вопросы биологического дренажа древесными культурами ([Zhang, 2014](#); [Dagar, Minhas, 2019](#)), создания солеустойчивых растений для производства продуктов и волокон, которые можно с успехом выращивать на засоленных почвах ([Kumar](#)

²Казакова Л.А. Комплексная мелиорация орошаемых солонцовых и засоленных почв Нижнего Поволжья. Дисс. ... доктора с.-х. наук. Волгоград, 2007, Волгоградская ГСХА. 319 с.
(<https://www.dissercat.com/content/kompleksnaya-melioratsiya-oroshaemykh-solontsovykh-i-zasolennykh-pochv-nizhnego-povolzhya>).

[et al., 2019](#)), развития вторичного засоления ([Moharana et al., 2019](#)). В связи с дефицитом пресных вод исследуются возможности использования для орошения минерализованных вод ([Suarez, 2013](#); [Swarup, 2013](#); [Rodrigues et al., 2020](#)), очищенных сточных вод ([Jahany et al., 2020](#)). Ведется поиск направлений уменьшения засоленности почв и грунтовых вод после активного засоления песчаных почв приморской равнины за счет избыточной откачки грунтовых вод для орошения, приведшей к интрузии морских вод в прибрежные водоносные горизонты ([Ahmed et al., 2013](#)). Приводится обоснование возможности мелиорации сильнозасоленных почв на основе частичной промывки водами более низкой минерализации, по сравнению с почвенными растворами, при выращивании риса ([Murtaza et al., 2012](#)).

Цель статьи – представить оценку современного состояния почв на динамической площадке ДП-2, орошаемой дождеванием с 1970-х годов на южных склонах Приволжской возвышенности в междуречье Волги и Дона Волгоградской области (землепользование ФГУП “Орошаемое”) водами с повышенной долей натрия.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Объектом исследования являются орошаемые светло-каштановые почвы участка, расположенного на землях ФГУП “Орошаемое” Волгоградской области, являющегося опытно-производственным хозяйством ФГБНУ Всероссийский научно-исследовательский институт орошаемого земледелия (ВНИИОЗ).

Территория находится на юге Приволжской возвышенности, которая в плиоцене была полностью перекрыта ергенинскими отложениями, а затем в конце плиоцена и в четвертичном периоде подверглась денудации. К настоящему времени сохранился покров ергенинских осадков мощностью до 30–40 м и не утрачены черты плиоценовой аккумуляции. Водоразделы сложены ергенинскими песками, к югу – красно-бурыми скифскими глинами и лёссовидными суглинками. Грунтовые воды залегают глубоко, как правило, они слабominерализованы и имеют гидрокарбонатно-натриевый состав. Почвенный покров представлен каштановыми солонцовыми комплексами, в составе которых преобладают суглинистые каштановые солонцеватые почвы с небольшой долей

солонцов ([Дегтярева, Жулидова, 1970](#)).

Земли ФГУП “Орошаемое” входят в состав оросительной системы Волго-Донского канала. Орошение проводится с 1967 г. дождеванием. В 2006 г. на орошаемом массиве В.Б. Михайловским были заложены 10 динамических площадок от водораздельной части склона к долине балки Песчаная для исследований изменения почв, происходящих в результате орошения. Ландшафтно-геоморфологический профиль (трансект-катена) выбран с учетом геоморфологических позиций и вида землепользования. В статье представлены результаты исследований на динамической площадке 2 (ДП-2) (рис. 1).

Поле, на котором расположена ДП-2, площадью 54 га ([Тихонова, 2014](#)), орошается дождевальными машинами (ДМ) кругового действия “Фрегат” № 9.

Орошаемый участок, на котором перепад высот составляет около 4–6 м, был спроектирован для функционирования ДМ “Фрегат”. Планировка орошаемого поля не требовалась. В отличие от орошаемых полей на Светлоярской ([Горохова, 2018](#)) и Кисловской оросительных системах ([Зимовец, 1991](#)), на которых первоначально полив осуществлялся поверхностным способом и проводилась планировка.

В 2012–2019 гг. оросительная норма составляла от 1200 до 2500 м³/га в зависимости от обеспеченности атмосферными осадками. Поливная норма обычно равна 500 м³/га, редко 700 м³/га. В 2019 г. было проведено 5 поливов оросительной нормой 2500 м³/га. Источником орошения является вода из Варваровского водохранилища системы Волго-Донского канала, расположенного в седловине между Приволжской возвышенностью и возвышенностью Ергени, разделяющих водосборные бассейны Волги и Дона. Минерализация оросительных вод варьирует в диапазоне 0.72–0.84 г/л, рН – от 7.9 до 8.2, концентрация ионов натрия – 5.0–5.4 ммоль/л (40–55% от суммы катионов), SAR – от 2.6 до 3.8, гидрокарбонатно-хлоридно-сульфатный состав по анионам. По данным Казаковой (2007), минерализация воды Варваровского водохранилища за период 1980–2005 гг. колебалась в пределах 0.71 до 1.08 г/л, а состав воды в отдельные годы изменялся с гидрокарбонатно-кальциевого в гидрокарбонатно-натриевый. В хозяйстве возделыва-

вают озимую пшеницу, суданскую траву и кукурузу на силос. Ряд соседних полей является залежью.

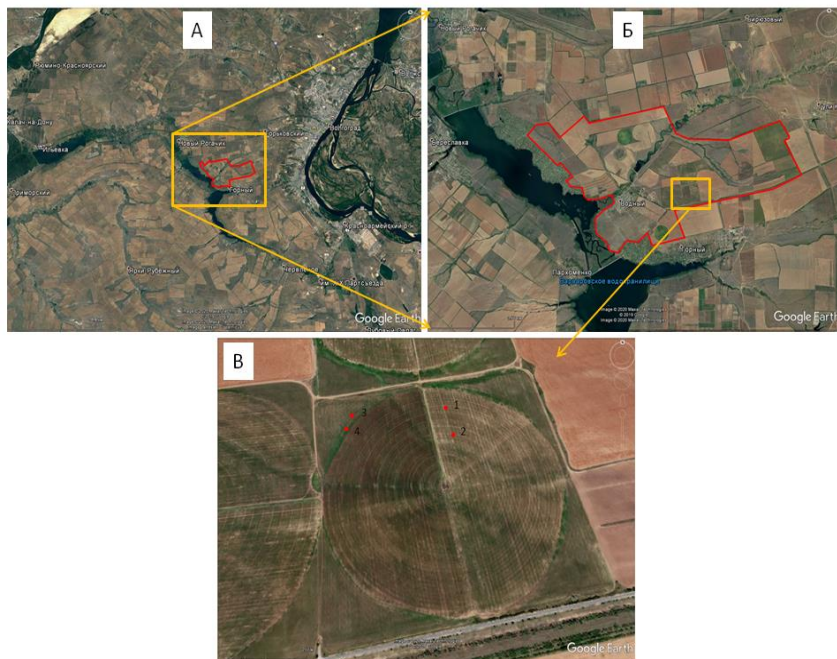


Рис. 1. Положение объектов исследования западнее г. Волгограда на космических снимках портала Google Earth: **А, Б** – земли ФГУП “Орошаемый” в разных масштабах; **В** – почвенные разрезы: 1 – ДП-2-1; 2 – ДП-2-2; 3 – ДП-2-3; 4 – ДП-2-4.

Fig. 1. The position of research objects to the west from Volgograd on satellite images of the Google Earth portal: **А, Б** – lands of FSUE “Oroshaemoe” at different scales; **В** – soil pits: 1 – DP-2-1; 2 – DP-2-2; 3 – DP-2-3; 4 – DP-2-4.

Исследования, проводимые на динамической площадке ДП-2, включали анализ содержания легкорастворимых солей по слоям 0–10, 10–20, 20–30 и 30–50 см весной (конец апреля) и осенью (конец сентября) ежегодно с 2011 по 2019 гг. в смешанных образцах из трех пространственных повторностей. Для более полной характеристики почв участка в 2019 г выполнено подробное мор-

фологическое описание почвенных разрезов на ДП-2, анализ профильного распределения гранулометрического состава (38 образцов) и состава легкорастворимых солей в почвах и зоне аэрации до глубины 3.5 м (62 образца). Гранулометрический состав почв определяли методом Качинского ([Вадюнина, Корчагина, 1986](#)), состав легкорастворимых солей – в стандартной водной вытяжке 1 : 5 методом ЦИНАО³.

Названия почв даны по трем классификациям в соответствии с диагностическими критериями, принятыми в каждой из них, не используя процедуру корреляции: (1) классификации почв СССР ([1977](#)), далее К-1977; (2) классификации почв России ([2004](#)) и ее более поздней версии (Полевой определитель почв России, [2008](#)), далее РК-2004 (8); (3) международной классификации почв WRB-2014 с дополнением и исправлениями в 2015 г. ([IUSS, 2015](#); русская версия: [Мировая..., 2017](#)), далее WRB-2014 (update 2015).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На территории массива ФГУП “Орошаемое” в сентябре 2019 г. на поле с динамической площадкой ДП-2 были заложены 4 разреза. Разрезы ДП-2-1 и ДП-2-2 характеризуют орошаемые почвы на склоне и водоразделе, ДП-2-3 и ДП-2-4 – неорошаемые почвы на одном из углов поля за пределами кругов от полива ДМ “Фрегат”. Мезорельеф поля с динамической площадкой ДП-2 выровнено-наклонный, имеет относительный перепад высот не менее 4–6 м и представлен водораздельной поверхностью, двумя ложбинами, наклонным водоразделом между ними и склоном к третьей широкой ложбине. Ниже представлено подробное морфологическое описание разреза ДП-2-1 и общее строение остальных почвенных разрезов с указанием их особенностей.

Разрез ДП-2-1 (ДП – динамическая площадка) заложен в Волгоградской области, в 12 км западнее г. Волгограда, 4 сентября 2019 г., координаты: 48°36'14.8" с. ш., 44°12'51.0" в. д., высота 102 м над уровнем моря.

Орошаемое поле расположено на водораздельном пространстве, рассеченном верховьями нескольких ложбин, впадающих

³ГОСТ 26423-85 - ГОСТ 26428-85

ниже по течению в балку Песчаная. Разрез ДП-2-1 заложен в середине склона широкой ложбины. Склон северной экспозиции, ровный в продольном и поперечном направлениях, уклон около 3°. В 2019 г. на поле выращивали кукурузу на силос, в момент закладки разреза культура была убрана, поле еще не обрабатывали. В рядках сохранились пенки стеблей кукурузы высотой 10–12 см. Поверхность поля имела микрорельеф в виде низких (менее 5 см) узких (до 30 см) гряд в рядках кукурузы и более широких слабо-вогнутых междурядий.

Морфологическое строение почвенного профиля:

P1 – 0–7 (8) см – верхняя часть агрогумусового (пахотного) горизонта. Серовато-бурый, сухой, рыхлый, сыпучий, среднесуглинистый, на поверхности тонкая (около 1 мм) полигональная корочка намытого с водораздела материала, размеры полигональных фрагментов от 3 до 6–7 см, разделены узкими трещинками, заканчивающиеся на глубине 1–2 мм (рис. 2), в рядке с кукурузой структура горизонта представлена непрочными глыбистыми агрегатами 2–3 см, комковатыми агрегатами 5–10 мм, копролитами и очень мелкими (< 0.5 мм) агрегатами, много тонких (~0.5 мм) корней кукурузы (рис. 3А), в междурядьях мощность горизонта сокращается до 3–4 см, не вскипает от HCl, переход заметный по структуре и плотности, граница слабоволнистая.

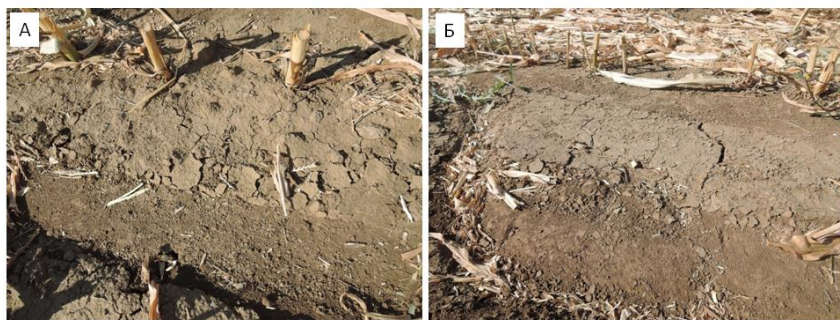


Рис. 2. Корочка на поверхности почвы (разр. ДП-2-1).

Fig. 2. Crust on the soil surface (pit DP-2-1).

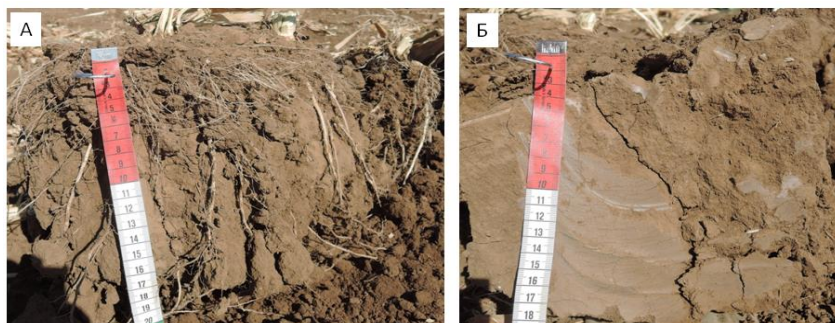


Рис. 3. Варианты структурного состояния пахотного горизонта P: **А** – рыхлая часть горизонта в рядке с кукурузой, **Б** – плотные глыбы в междурядьях (разр. ДП-2-1).

Fig. 3. Variants of the structural state of the arable horizon P: **A** – loose part of the horizon in a row of corn, **B** – dense blocks in the row spacing of corn (pit DP-2-1).

P2ad – 7 (8)–22 (24) см – средняя часть агрогумусового (пахотного) горизонта с агрогенным переуплотнением (признак ad). Серовато-бурый, свежий, глыбистый, в рядках с кукурузой отдельные глыбки от 4 до 7 см, пронизанные корнями, встречаются копролиты, пористый, много светлых и темных морфонов, в междурядьях монолитные глыбы до 20 см в длину (не имеют внутри более мелких агрегатов) (рис. 3). Светлые морфоны⁴ в виде пятен 5–8 мм в диаметре, внутри скопления песчаных частиц после разрушения агрегатов (рис. 4); в более темных морфонах стенки корневых ходов гладкие, частично покрыты тонкими кутанами. Переход заметный по структуре, граница слабоволнистая.

P3 – 22 (24)–33 (35) см – нижняя часть агрогумусового (пахотного) горизонта, обрабатываемая раз в 5–7 лет. Серовато-бурый, свежий. Похож на предыдущий гор. P2ad, отличается меньшей плотностью и присутствием припаханных фрагментов нижележащего гор. ВМК, корни растений. Переход ясный по цвету, граница ровная.

⁴ Термин, предложенный Э.А. Корнблюмом, 1975.

ВМКth – 33 (35)–38 см – ксерометаморфический горизонт с почечными гумусовыми кутанами (признак th). Бурый, светлее пахотного, влажноватый, среднесуглинистый, структура призматическая с тонкими темными гумусово-глинистыми пленками (кутанами) на боковых гранях (рис. 5А), не вскипает от HCl, переход ясный по вскипанию, граница относительно ровная.

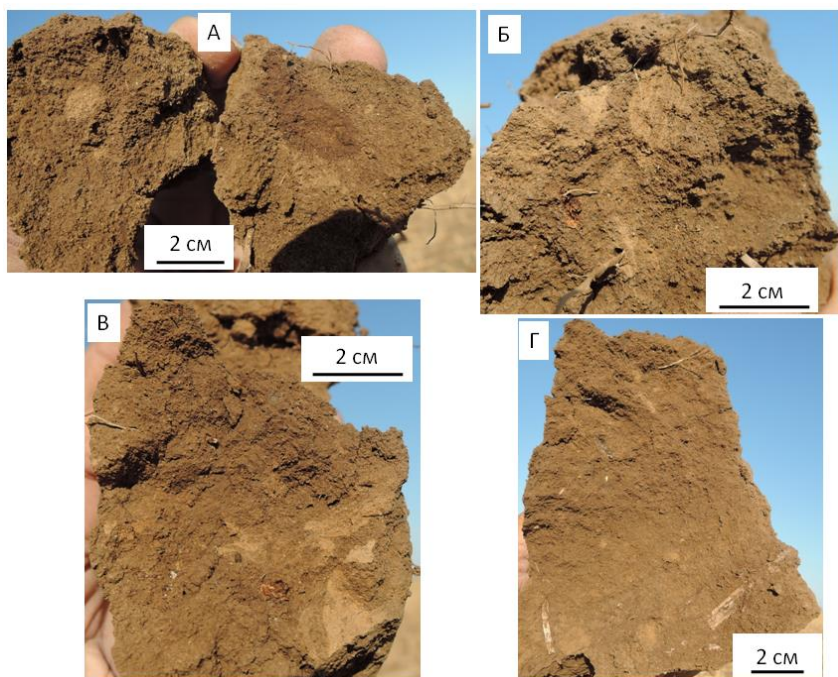


Рис. 4. Светлые и темные пятна в пахотном горизонте – следы разрушения агрегатов: светлые пятна – скопления песчаных и пылеватых частиц; темные пятна – гумусовая пропитка или кутаны (разр. ДП-2-1).

Fig. 4. Light and dark spots in the arable horizon – traces of aggregate destruction: light spots – accumulations of sand and silt particles; dark spots – humus impregnation or cutans (pit DP-2-1).

BCA1nc,th – 38–46 см – верхняя часть аккумулятивно-карбонатного горизонта с карбонатными сегрегациями (признак пс). Светло-бурый, влажноватый, среднесуглинистый, призматическая структура (рис. 5Б – нижние призмы на фото) с большим количеством педотубул внутри них; призмы размером 4–7 см, на боковых гранях гумусово-глинистые кутаны; педотубулы (бывшие ходы жуков или других беспозвоночных, заканчивающиеся полусферой, которые сейчас заполнены почвенной массой) цилиндрической и округлой формы диаметром 1–1.5 см; бурно вскипает от HCl, много белых рыхлых карбонатных выделений в виде размытой белоглазки диаметром 1–1.5 см, часто белоглазка приурочена к педотубулам (рис. 6А, 6Б). Переход постепенный по облику белоглазки, граница ровная.

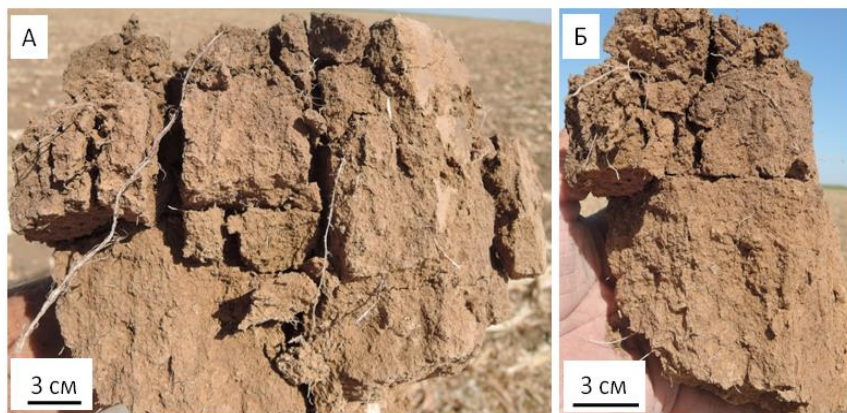


Рис. 5. А – гор. BMKth (верхние призмы до горизонтальной трещины); Б – BCA1nc,th (нижняя призма), разр. ДП-2-1.

Fig. 5. А – horizon BMKth (upper prisms up to the horizontal crack); Б – BCA1nc, th (lower prism), pit DP-2-1.

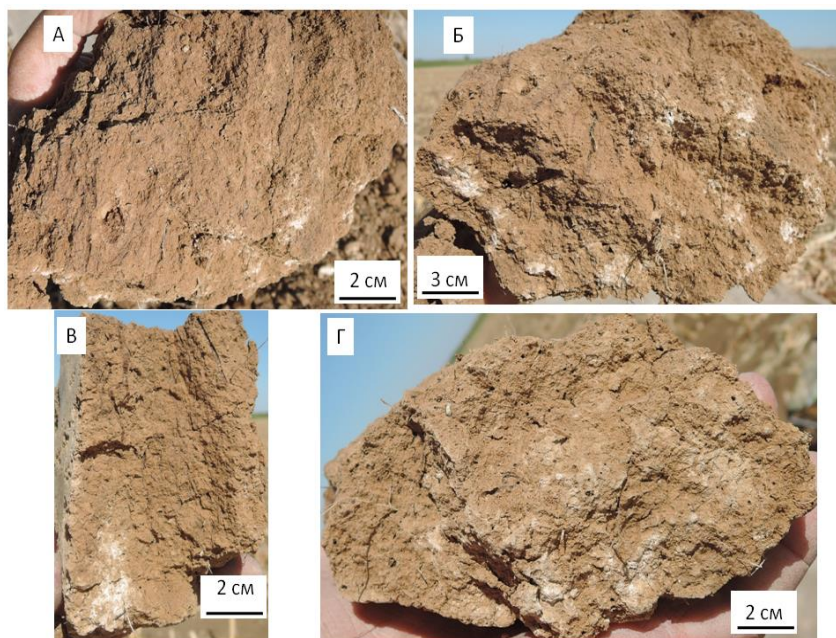


Рис. 6. Аккумулятивно-карбонатный гор. BCAnc,th с белыми размытыми пятнами белоглазки: **А, В** – вид сбоку; **Б, Г** – вид снизу (разр. ДП-2-1).

Fig. 6. Accumulative-carbonate horizon BCAnc,th with white blurred spots of “white eyes” (carbonate concretions): **А, В** – side view; **Б, Г** – bottom view (pit DP-2-1).

BCA2nc,th – 46–96 (100) см – основная часть аккумулятивно-карбонатного горизонта с карбонатными сегрегациями. Аналогичен предыдущему. Отличается более концентрированным выделением карбонатов в виде белоглазки (рис. 7А, 7Б), ходы корней растений. На боковых гранях хорошо выражены глинистые пленки (кутаны), (рис. 8). Переход заметный по появлению гипса.

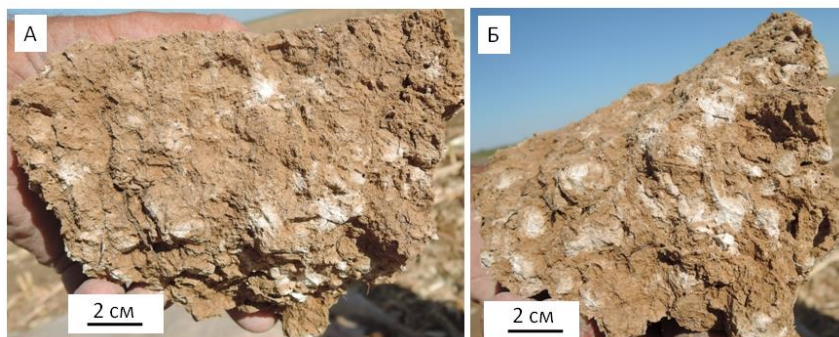


Рис. 7. Аккумулятивно-карбонатный гор. BCA2nc,th с белыми концентрированными пятнами белоглазки: **А** – вид сбоку; **Б** – вид снизу, видны округлые цилиндрические формы – педотубулы (разр. ДП-2-1).

Fig. 7. Accumulative-carbonate horizon BCA2nc,th with white concentrated spots of “white eyes”: **A** – side view; **B** – bottom view, round cylindrical forms – pedotubules (pit DP-2-1) are visible.

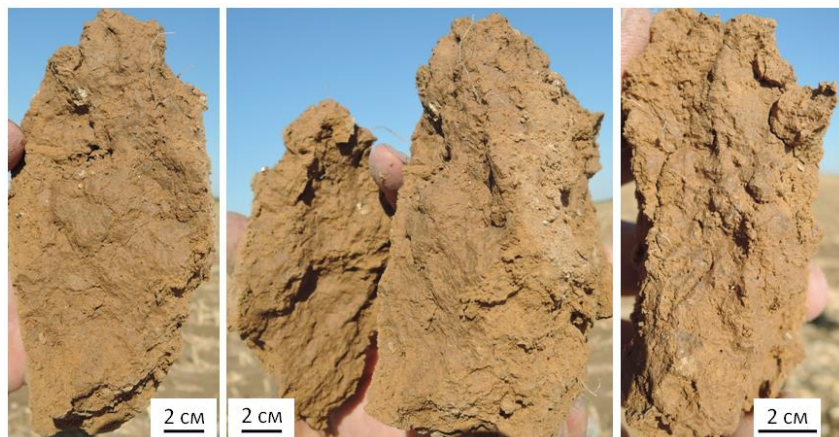


Рис. 8. Глинистые кутаны (гладкие, более темные поверхности на боковых гранях агрегатов) в нижней части гор. BCA2nc,th (разр. ДП-2-1).

Fig. 8. Clay cutans (smooth, darker surfaces on the side faces of aggregates) in the lower part of the horizon BCA2nc,th (pit DP-2-1).

BCca,cs,q,th – 100–115 см – переходный к почвообразующей породе горизонт с дисперсными карбонатами (индекс – ca), гипсом (индекс – cs), квазиглееватостью (признак q) и кутанами (th). Светло-бурый, влажноватый, среднесуглинистый, неясная призматическая структура, бурное вскипание от HCl при отсутствии карбонатных выделений, со 100 см скопления мелкокристаллического гипса, со 110 см дополнительно по стенкам магистральных трещин довольно крупных блоков образовались гипсаны – тонкие покрытия из кристаллов гипса (рис. 9).

Общий вид почвенного профиля представлен на рисунке 10.

C1ca,cs,q – 115–220 см – (описание этого и ниже расположенных горизонтов сделано по данным ручного бурения) – светло-бурый средний суглинок со сплошным бурным вскипанием от HCl и обильными скоплениями мелкокристаллического гипса.

C2ca,cs – 220–275 см – аналогичен C1ca,cs,q с заметно менее обильными скоплениями гипса.

D1 – 275–285 см – прослой крупнозернистого песка без вскипания от HCl.

D2ca – 285–300 см – суглинистый слой с мелкими линзами песка и редкими скоплениями гипса, вскипает от HCl.

D3ca – 300–350 см – светло-бурый средний суглинок со сплошным бурным вскипанием от HCl.

Название почвы:

K-1977 – Светло-каштановая орошаемая вторично-солонцеватая среднемощная глубокосолончаковатая среднесуглинистая на желто-бурых опесчаненных суглинках.

PK-2004 (8) – Агрокаштановая сегрегационная солонцеватая глубокосолончаковатая глубоко гипс-содержащая среднесуглинистая на желто-бурых опесчаненных суглинках.

WRB-2014 (update 2015) – Luvis Kastanozem (Loamic, Aric, Protosodic, Bathysalic).

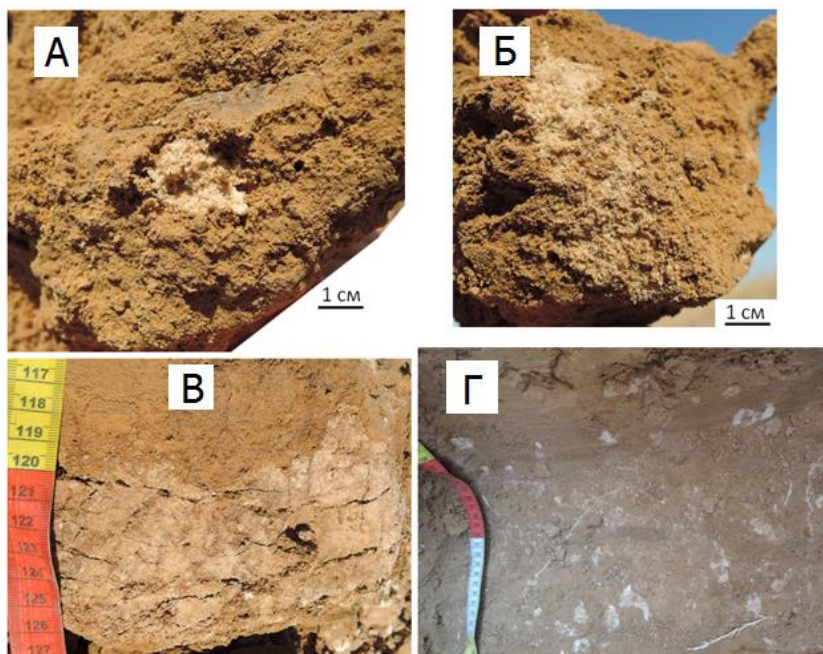


Рис. 9. Выделения гипса в гор. BCca,cs,q,th: **А, Б** – светлые скопления мелкокристаллического гипса; **А** – выше скопления гипса видна более темная гумусово-глинистая пленка (кутана); **Б** – гипсана (белесая тонкая пленка из мелких кристаллов гипса) на вертикальных гранях призматических блоков (на фото от 121 до 127 см); **Г** – часть вертикальной стенки с округлыми белыми скоплениями гипса и горизонтальная площадка дна разреза с рисунком белых линий от гипсан и скоплений гипса разной формы и размера (разр. ДП-2-2).

Fig. 9. Gypsum accumulations in horizon BCca,cs,q,th: **A, Б** – bright clusters of fine-crystalline gypsum; **A** – the darker humus-clay film (cutan) is above gypsum accumulation; **Б** – gypsum coating (whitish thin film of gypsum small crystals) on vertical faces of prism-like blocks (in the photo from 121 to 127 cm); **Г** – part of a vertical wall with white rounded clusters and a horizontal area of the cut bottom with a pattern of white lines from gypsum coatings and clusters of gypsum of different shapes and sizes (pit DP-2-2).

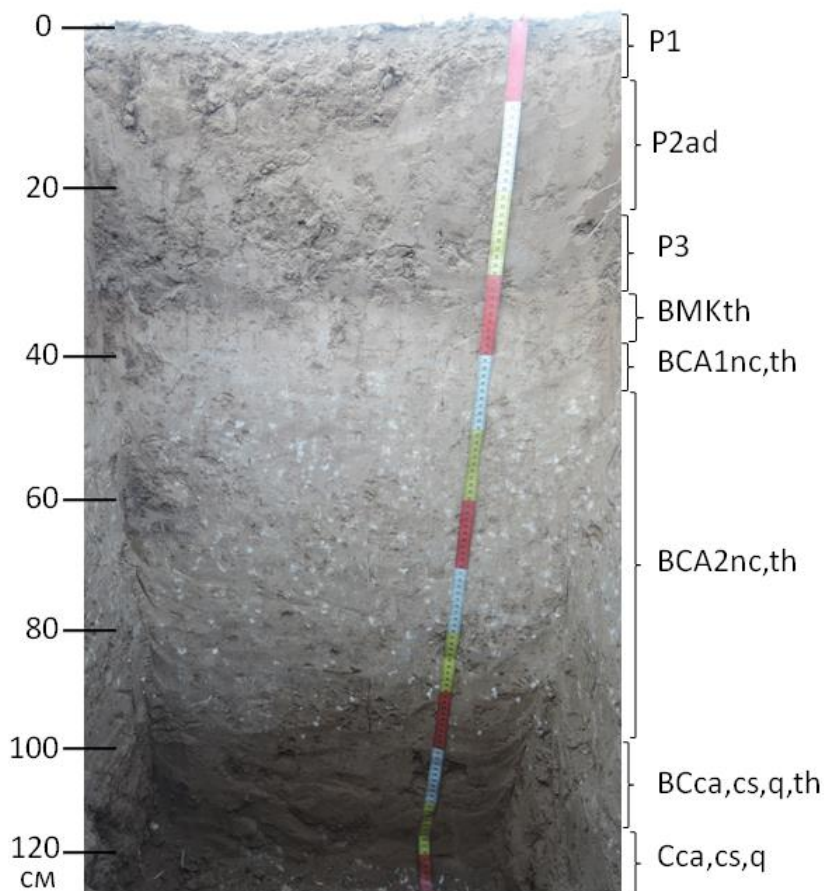


Рис. 10. Почвенный профиль, разрез ДП-2-1.

Fig. 10. Soil profile, pit DP-2-1.

Разрез ДП-2-2 заложен на сравнительно узком (30–35 м) водоразделе между верховьями двух ложбин на том же поле в 70 м к югу от разр. ДП-2-1 ближе к центру вращения ДМ “Фрегат”. Координаты: 48°36'11.4" с. ш., 44°11'52.4" в. д., высота 104 м над ур. м. Почва имеет слабое сплошное вскипание от HCl с поверхности. Отмечены процессы припахивания карбонатного горизонта. Почвенный профиль: P1ca (0–9 (10) см) – P2ca (10–22) – P3ca (22–

33 (35)) – BCA1nc,th (33–50) – BCA2nc,th (50–75) – BCA3nc,th (75–90) – BCca,th (90–100) – BCca,cs (100–115) – Cca,cs,q (115–310) – C2ca,cs (310–350 см+и). Название почвы: К-1977 – светло-каштановая орошаемая карбонатная среднесуглинистая на желто-бурых опесчаненных суглинках; РК-2004(8) – агрозем аккумулятивно-карбонатный сегрегационный солонцеватый солончаковатый глубоко гипс-содержащий среднесуглинистый; WRB-2014 – Luvic Kastanozem (Loamic, Aric, Protosodic, Bathysalic).

Разрез ДП-2-3 характеризует неорошаемую почву на части поля между кругами поливных участков от ДМ “Фрегат”, в 15 м от края поливного круга. Он заложен в середине склона в широкую ложбину. Склон северной экспозиции, уклон около 2.5°. Координаты: 48°36'13.8" с. ш., 44°12'34.9" в. д., высота 99 м над ур. м. Пашня, скошенная суданская трава. Почвенный профиль: P1 (0–10) – P2ad (10–22) – P3ad (22–30 (33)) – BMsn (20 (33) – 34 (36)) – BCA1nc,th (36–50) – BCA2nc,th (50–85) – BCA3nc,th (85–95 (96)) – BCca,th (95 (96) –107) – Cca,cs (107–160) – D1 (160–180) – D2ca,cs (180–220) – D3ca,cs (220–340 см+). Индексом D1 в этом и следующем разрезе обозначен слой крупнозернистого песка, не вскипающего от HCl. Все горизонты выше этого слоя и грунты D2 и D3 имеют среднесуглинистый состав с заметной долей фракции песка.

Разрез ДП-2-4 также характеризует неорошаемую почву на части поля между кругами поливных участков от ДМ "Фрегат", в 15 м от края поливного круга. Он заложен в верхней приводораздельной части склона в широкую ложбину, уклон около 0.5°. Координаты: 48°36'13.8" с. ш., 44°12'34.9" в. д., высота 103 м над ур. м. Пашня, скошенная суданская трава. Почвенный профиль: P1 (0–5) – P2ad (5–22) – P3ad (22–29 (37)) – BMsn (29 (33)–32 (36)) – BCA1nc,th (32 (36)–50) – BCA2nc,th (50–83) – BCA3nc (83–92) – BCca (92–100) – Cca,cs (100–195) – D1 (195–210) – D2ca,cs (210–270) – D3ca (270–290 см+). Название почвы в обоих разрезах ДП-2-3 и ДП-2-4: К-1977 – светло-каштановая солонцеватая пахотная глубокосолончаковатая среднесуглинистая на желто-бурых опесчаненных суглинках; РК-2004(8) – агрозем аккумулятивно-карбонатный сегрегационный солонцеватый глубокосолончаковатый глубоко гипс-содержащий среднесуглинистый на желто-

бурых опесчаненных суглинках; WRB-2014 (update 2015) – Luvic Kastanozem (Loamic, Aric, Protosodic, Bathysalic).

Таким образом, все четыре разреза характеризуют бывшие светло-каштановые почвы, гумусовый горизонт которых преобразован в трехслойный агрогумусовый (пахотный) горизонт под влиянием ежегодной вспашки. Разделение гор. Р на три подгоризонта возникло как результат используемых приемов обработки почвы в зерно-кормовом севообороте. Верхняя часть до глубины 5–10 см чаще подвергается рыхлению в процессе боронования и культивации. Средняя часть пахотного горизонта (P2ad) от 8–10 до 22–24 см испытывает однократное ежегодное перемешивание во время основной вспашки с оборотом пласта и последующее уплотнение ходовыми частями машин при поверхностных обработках. В результате подгоризонт P2ad приобретает глыбистоблочную структуру (признак ad – агрогенное переуплотнение). Третий подгоризонт на глубине от 22–24 до 29–33 см подвержен более редкой вспашке с почвоуглублением под пропашные культуры.

Отличия богарных и орошаемых пахотных горизонтов небольшие. Они сводятся к наличию светлых скоплений песчаных и пылеватых зерен минералов в орошаемых почвах, возникших в результате разрушения агрегатов под воздействием капель воды при поливе дождеванием.

Исследованные четыре разреза имеют признаки солонцеватости в виде темных гумусово-глинистых пленок (кутан) на боковых гранях призмовидных отдельностей (признак th) в аккумулятивно-карбонатном BC_{Anc},th и переходном BC_{Ca},th горизонтах. Вместе с тем в обоих богарных разрезах ДП-2-3 и ДП-2-4 количество кутан небольшое, тогда как в орошаемых почвах кутаны толще, их больше, и проникают они даже в верхнюю часть горизонта со скоплениями гипса на глубине 100–115 см. Иллювиирование гумусово-глинистого вещества по трещинам можно рассматривать как признак вторичного осолонцевания почв, орошаемых водой с SAR от 2.6 до 3.8.

Гранулометрический состав. Изучаемые почвы являются средне- и тяжелосуглинистыми с доминирующими фракциями в

порядке убывания их доли: мелкого песка (0.05–0.25 мм), ила (< 0.001 мм) и крупной пыли (0.01–0.05 мм) (табл. 1). Самую большую долю составляет фракция мелкого песка – от 23 до 49%, преимущественно 30–40%. Содержание илистой фракции изменяется в пределах 20–28%. На долю крупной пыли приходится от 12 до 32%, чаще 15–25%.

Хотя по внешнему виду суглинистые отложения, послужившие почвообразующей породой для исследуемых почв, похожи на лёссовидные суглинки, они имеют особенности гранулометрического состава, не характерные для последних. Главное отличие – повышенное содержание песчаных фракций, включая фракции среднего и крупного песка, и пониженное содержание крупной пыли. В исследуемых почвах песчаные зерна размером 0.25–1 мм отчетливо видны невооруженным глазом при морфологическом описании большинства горизонтов, а в пахотном горизонте встречаются их скопления, возникшие в результате разрушения агрегатов дождевыми каплями при орошении. Как отмечалось выше, фракция мелкого песка является преобладающей (чаще всего 25–35%). Содержание среднего и крупного песка варьирует в разных горизонтах от 4–6 до 19–22%, отражая литологическую неоднородность почвообразующих желто-бурых суглинков.

В лёссовидных суглинках Восточно-Европейской равнины, наоборот, преобладает фракция крупной пыли, доля которой обычно составляет 35–60% ([Афанасьева, 1966](#); [Лёссовые породы СССР, 1966](#); [Веклич, 1968](#); [Величко и др., 1997](#)), при содержании мелкого песка не более 2–7% и практически полном отсутствии среднего и крупного песка. Только в лёссовидных глинах доля крупной пыли уменьшается до 20–30%, поскольку содержание частиц < 0.01 мм составляет 60–80%.

Наличие значительного количества песка и крупной пыли в исследуемых почвах способствует формированию глыбистых отдельностей в пахотном горизонте вместо водоустойчивых агрегатов агрономически ценного размера, а воздействие капель от полива ДМ “Фрегат” вызывает дополнительное разрушение агрегатов в поверхностном слое с образованием корки.

Таблица 1. Гранулометрический состав почв

Table 1. Particle size distribution of the studied soils

Глубина, см	Фракции, %, размерами мм						
	1.00–0.25	0.25–0.05	0.05–0.01	0.01–0.005	0.005–0.001	Менее 0.001	Менее 0.01
Почвенный разрез ДП-2-1							
0–6	4.9	31.5	21.4	7.4	11.4	23.5	42.3
6–22	6.0	23.2	26.4	8.5	9.2	26.8	44.4
22–33	4.1	31.6	24.0	6.9	9.2	24.3	40.3
33–38	3.6	27.0	25.6	4.9	11.1	27.8	43.8
38–47	4.7	34.9	19.0	5.8	11.3	24.4	41.5
47–70	8.1	32.8	17.7	9.5	8.3	23.6	41.4
70–90	20.2	31.1	16.4	2.9	7.7	21.7	32.3
90–100	4.8	29.7	22.5	5.0	9.3	28.7	43.0
100–110	4.5	29.9	19.9	6.4	11.4	28.0	45.8
120–140	7.5	31.6	25.5	4.6	8.6	22.2	35.5
180–200	12.1	31.1	20.7	4.0	8.8	23.3	36.2
240–260	3.9	27.8	24.9	4.5	12.2	26.7	43.4
320–340	19.3	35.4	13.6	3.8	7.9	20.1	31.8
Почвенный разрез ДП-2-2							
0–10	12.0	33.4	19.4	6.2	5.7	23.4	35.2
10–22	10.5	32.1	20.8	1.0	11.8	23.8	36.7
22–34	10.0	49.7	7.4	3.3	7.8	21.9	33.0
34–50	10.5	31.5	16.2	6.7	9.4	25.8	41.9

50–75	16.2	31.0	14.3	3.2	10.0	25.2	38.5
75–90	11.5	38.6	14.2	3.1	8.4	24.2	35.7
90–102	8.1	41.4	13.6	3.6	7.5	25.8	36.9
115–130	16.8	28.6	19.7	4.2	8.9	21.8	34.9
130–150	10.4	29.4	25.1	5.8	8.9	20.4	35.1
190–210	1.5	33.1	26.7	3.8	8.6	26.2	38.6
250–270	8.7	36.2	20.1	4.7	7.0	23.3	35.0
290–310	4.7	36.1	18.2	6.7	8.2	26.0	41.0
Почвенный разрез ДП-2-3							
0–9	6.3	25.2	26.9	5.6	8.6	27.4	41.6
9–22	6.0	22.6	28.4	5.4	10.5	27.1	43.0
22–33	6.1	22.1	28.7	4.7	9.7	28.8	43.1
33–34	9.4	35.2	17.0	4.3	6.3	27.8	38.4
34–50	11.3	39.6	12.1	3.8	8.9	24.4	37.0
50–85	9.5	36.4	15.7	2.2	8.5	27.6	38.2
85–95	7.0	40.3	16.0	2.6	8.4	25.6	36.6
95–107	0.8	36.6	23.0	2.8	1.6	25.2	39.6
107–118	2.9	33.6	32.4	2.5	1.6	27.0	31.1
160–180	21.6	33.1	19.0	0.5	8.6	17.1	26.2
180–200	17.5	29.1	19.4	4.1	5.8	24.1	34.0
200–220	15.8	38.5	12.3	4.0	5.5	24.0	33.5
280–300	22.4	27.3	17.6	3.0	8.0	21.7	32.8

В зависимости от геоморфологического положения исследуемые почвы отличаются по профильному распределению гранулометрического состава. На водоразделе (разр. ДП-2-2) почвы имеют более легкий состав, по сравнению с почвами склона к ложбине, и являются среднесуглинистыми.

Содержание физической глины (частиц < 0.01 мм) изменяется в сравнительно узких пределах 33.0–38.6%, исключая гор. ВСА1nc,th (41.9%). Здесь отмечается низкое содержание крупной пыли (8–16%, в отдельных горизонтах до 20%) и наиболее высокое содержание песчаных фракций. На склоне ложбины верхняя часть обоих разрезов ДП-2-1 и ДП-2-3 является тяжелосуглинистой до глубины 100 и 30 см соответственно, глубже – среднесуглинистой.

Важной особенностью разрезов на склоне является слой крупного песка мощностью 10–25 см на варьирующей глубине от 160–180 до 275–285 см в разных разрезах, разделяющий суглинистые отложения. На водоразделе (разр. ДП-2-2) такой слой не обнаружен до глубины 3.5 м.

Солевое состояние почв и грунтов зоны аэрации оценено в трех разрезах по данным водной вытяжки 1 : 5 (рис. 11). Все разрезы имеют похожее общее распределение солей по профилю.

В почвенном профиле до глубины 100 см наблюдается более или менее одинаковое низкое содержание общей суммы солей (0.08–0.11%) и суммы токсичных солей (0.04–0.10%), которое в большинстве случаев соответствует незасоленному горизонту, хотя в разр. ДП-2-2 на глубине 10–22 и 34–75 см отмечается слабая степень засоления хлоридно-содового натриевого типа химизма. В почвенных горизонтах характерно присутствие токсичной щелочности (положительные значения разницы между общей щелочностью и содержанием кальция) (рис. 11В, 11Е, 11И).

Все горизонты от 100 до 300–350 см имеют слабую степень засоления при хлоридно-сульфатном магниевом-натриевом или магниевом химизме с гипсом или среднюю степень засоления при сульфатном магниевом химизме с гипсом. Сумма токсичных солей колеблется в интервале 0.14–0.28% при слабой и 0.30–0.41% при средней степени. Более высокие значения общей суммы солей (0.5–1.3%) обусловлены растворением в водной вытяжке гипса,

разное количество которого в почве обеспечивает пилообразный профиль общей суммы солей.

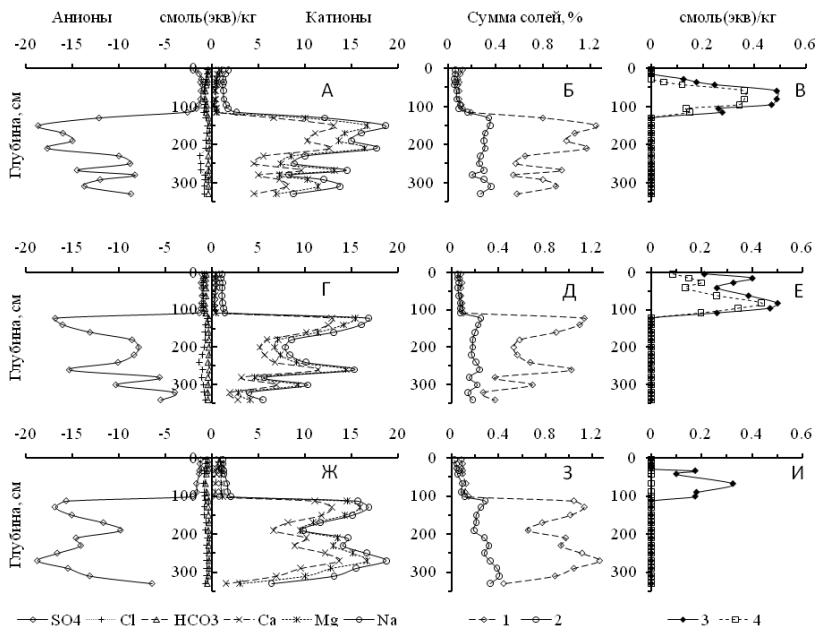


Рис. 11. Распределение солей по профилю почв (данные водной вытяжки 1 : 5). Разрезы: А, Б, В – ДП-2-1; Г, Д, Е – ДП-2-2; Ж, З, И – ДП-2-3. Обозначения: А, Г, Ж – двусторонний солевой график; Б, Д, З – содержание общей суммы (1) и суммы токсичных солей (2); В, Е, И – содержание общей токсичной щелочности (3) и токсичной щелочности, связанной с натрием (4).

Fig. 11. The salt distribution in the soil profile (data of water extract 1 : 5). Pits: А, Б, В – DP-2-1; Г, Д, Е – DP-2-2; Ж, З, И – DP-2-3. Denotations: А, Г, Ж – two-sided salt graph; Б, Д, З – the total amount (1) and the amount of toxic salts (2); В, Е, И – the content of total toxic alkalinity (3) and toxic alkalinity associated with sodium (residual sodium bicarbonate) (4).

На рисунке 11 отчетливо выделяются максимумы сульфатов растворившегося гипса на глубинах 100–150 и 250–300 см с относительным минимумом между ними, что отмечалось и при мор-

фологическом описании образцов при бурении.

Главное отличие орошаемых почв (разр. ДП-2-1 и ДП-2-2) от богарных (разр. ДП-2-3) – наличие токсичной щелочности, связанной с натрием (рис. 11, линия 4), которую оценивают по положительной разнице общей щелочности с суммой кальция и магния. В богарной почве она отсутствует. Имеется только токсичная щелочность, связанная с магнием. В орошаемых почвах токсичная щелочность, связанная с натрием, составляет 0.1–0.4 смоль(экв)/кг с максимумом на глубине 50–100 см в аккумулятивно-карбонатном горизонте, где наблюдаются отчетливые гумусово-глинистые кутаны на боковых гранях структурных отдельностей.

Динамика солей на площадке ДП-2.

Ежегодное наблюдение весной и осенью солевого состояния верхней части почвенного профиля показало, во-первых, сравнительно узкий диапазон варьирования абсолютных значений показателей состава водной вытяжки 1 : 5 в течение всего периода 2011–2019 гг.; во-вторых, заметное различие коэффициентов вариации от 17 до 71% для разных показателей (табл. 2); в-третьих, циклическое нерегулярное колебание значений показателей (рис. 12). Нами была проведена статистическая обработка данных по слоям, однако она различий не выявила. Поэтому в таблице 2 представлено общее варьирование данных по всем четырем слоям вместе за весь изучаемый период.

На качественном уровне с 2011 по 2014 гг. все оценки содержания солей квалифицировались как “незасоленные”. В 2015 и 2016 гг. осенью отмечалась слабая степень засоления в слое 30–50 см (гор. ВСА1nc,th) при содово-хлоридном типе химизма. Пахотный горизонт оставался незасоленным. В 2018 г. в двух из четырех анализируемых слоев и весной, и осенью отмечалась слабая степень засоления. А в 2019 г. в оба срока наблюдений все анализируемые слои до глубины 50 см имели слабое содово-хлоридное натриевое засоление.

В течение наблюдаемого периода отсутствовала статистическая связь между значениями показателей водной вытяжки и количеством осадков за год, за холодный и теплый периоды (рис. 13).

Таблица 2. Общее варьирование показателей состава водной вытяжки в слоях 0–10, 10–20, 20–30 и 30–50 см на площадке ДП-2 с 2011 по 2019 гг.

Table 2. General variation of water extract composition indicators in layers 0–10, 10–20, 20–30 and 30–50 cm at the DP-2 site from 2011 to 2019

Показатель водной вытяжки	n	min	Q1	med	Q3	max	M	s	V, %
pH	68	7.2	7.8	8	8.1	8.4	7.9	0.3	4
HCO ₃ ⁻ общ., смоль(экв)/кг	72	0.30	0.48	0.50	0.55	0.80	0.52	0.09	17
Cl ⁻ , смоль(экв)/кг	72	0.05	0.15	0.30	0.40	0.55	0.28	0.13	46
SO ₄ ²⁻ , смоль(экв)/кг	72	0.15	0.34	0.48	0.64	0.93	0.49	0.19	39
Ca ²⁺ , смоль(экв)/кг	72	0.13	0.25	0.38	0.39	0.88	0.37	0.16	43
Mg ²⁺ , смоль(экв)/кг	72	0.06	0.13	0.13	0.25	0.50	0.20	0.10	50
Na ⁺ , смоль(экв)/кг	72	0.43	0.59	0.69	0.79	1.13	0.71	0.14	20
K ⁺ , смоль(экв)/кг	72	0.01	0.01	0.02	0.02	0.06	0.02	0.01	50
S общ., %	72	0.07	0.08	0.09	0.10	0.13	0.09	0.02	22
S токс., %	72	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.06	0.01	17
NaHCO ₃ , смоль(экв)/кг	72	0	0	0	0.08	0.48	0.05	0.09	180
Mg(HCO ₃) ₂ , смоль(экв)/кг	72	0	0.06	0.13	0.16	0.33	0.12	0.08	67
HCO ₃ ⁻ токс, смоль(экв)/кг	72	0	0.07	0.18	0.25	0.6	0.17	0.12	71

Примечание. Статистические показатели: n – объем выборки; min – минимум; Q1 – нижний квартиль; med – медиана; Q3 – верхний квартиль; max – максимум; M – среднее арифметическое; s – среднеквадратическое отклонение; V – коэффициент вариации.

Расчет возможного поступления ионов натрия с поливной водой (средняя концентрация ионов натрия 5.24 ммоль(экв)/л; оросительная норма 2500 м³/га; расчетный слой 0–60 см) показал, что при условии непромывного водного режима и расхода поливной воды исключительно на водопотребление культуры за год в почве потенциально может накопиться 0.163 смоль(экв)/кг натрия.

Сравнивая со статистическими значениями содержания натрия в водной вытяжке (табл. 2), при отсутствии промывки слоя 0–60 см за счет поступления натрия с поливной водой за три года потенциально может быть достигнут современный минимум натрия в почве, за 4.5 года – среднее значение, а за 7 лет — максимальное значение. Известно, что почва поливается водой приблизительно такого качества уже более 50 лет, поэтому можно заключить, что часть натрия поливной воды промывалась глубже 60 см атмосферными осадками и более редкими поливными нормами до 700 м³/га. По величине суммы осадков за холодный период, варьировавшей в 2011–2019 гг. от 42 до 215 мм со средним 115 мм, и запасам влаги при наименьшей влагоемкости и влажности завядания в метровом слое можно утверждать, что в большинстве лет весной почва увлажняется до глубины 80–100 см, иногда глубже, обеспечивая частичную естественную промывку верхних горизонтов от избытка накапливающихся легкорастворимых солей.

На основе этих расчетов следует, что накапливающиеся в поверхностных почвенных горизонтах соли натрия, поступающие с поливной водой, при общем уровне содержания солей натрия в почве, колеблющемся возле формальной границы “незасоленной” и “слабой степени засоления”, в условиях недостаточной промывки этих горизонтов атмосферными осадками и самими поливными водами могут приводить к возникновению периодов слабого засоления даже пахотного горизонта, т. е. хотя бы временно переводить орошаемые почвы из вида глубокосолончаковатые в солончаковатые, или даже солончаковые слабозасоленные.

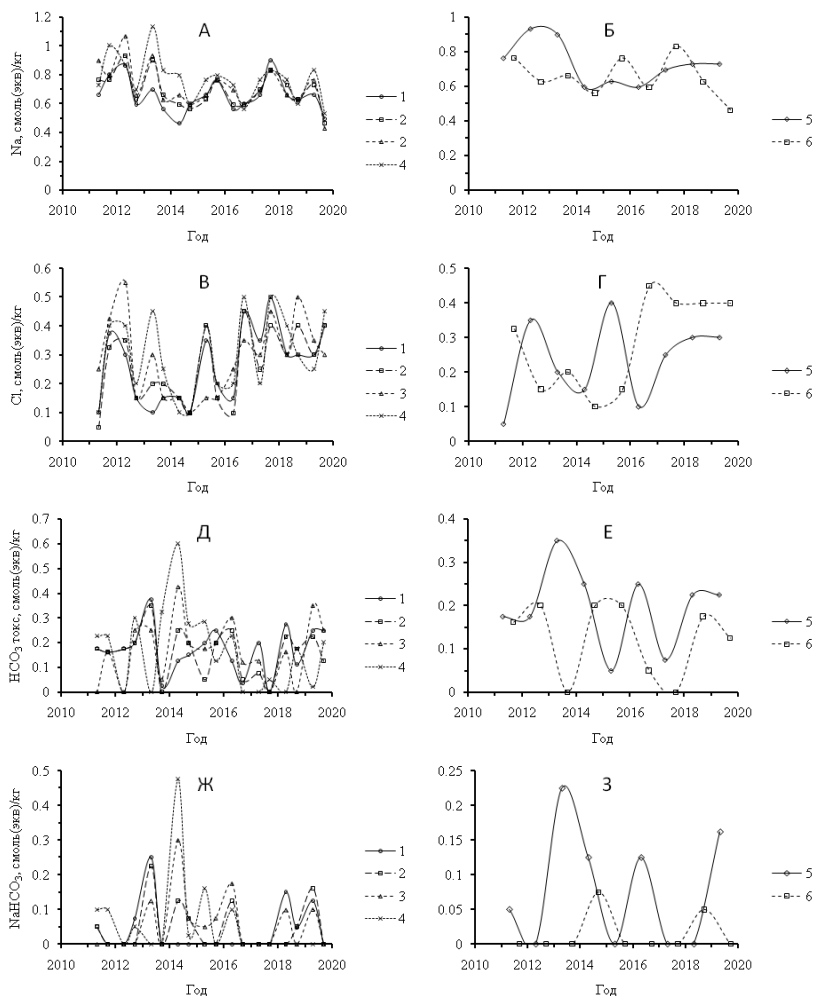


Рис. 12. Динамика показателей состава водной вытяжки 1 : 5 на площадке ДП-2: А, Б – натрий; В, Г – хлориды; Д, Е – общая токсичная щелочность (HCO_3 токс.); Ж, З – токсичная щелочность, связанная с натрием (NaHCO_3); А, В, Д, Ж – динамика показателей в общей последовательности сезонов в разные годы, слой: 1 – P1, 0–10 см; 2 – P2, 10–20 см; 3 – P3, 20–30 см; 4 – BSA1nc,th, 30–50 см; Б, Г, Е, З – отдельные графики динамики весной (5) и осенью (6) в слое P2, 10–20 см.

Fig. 12. Dynamics of water extract 1 : 5 composition indicators at the DP-2: А, Б – sodium; В, Г – chlorides; Д, Е – total toxic alkalinity (HCO_3 токс.); Ж, З – toxic alkalinity associated with sodium (NaHCO_3); А, В, Д, Ж – indicator dynamics in the general sequence of seasons in different years, layer: 1 – P1, 0–10 cm; 2 – P2, 10–20 cm; 3 – P3, 20–30 cm; 4 – BCA1nc,th, 30–50 cm; Б, Г, Е, З – separate graphs of dynamics in spring (5) and autumn (6) in the P2 layer, 10–20 cm.

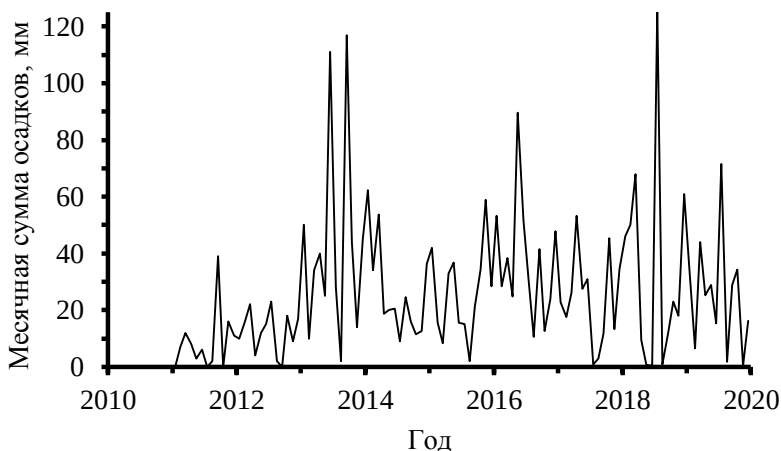


Рис. 13. Динамика месячных сумм осадков (мм) в 2011–2019 гг. в г. Волгограде (по данным сайта Volgograd.nuipogoda.ru).

Fig. 13. Dynamics of monthly precipitation amounts (mm) in 2011–2019 in Volgograd (according to the website Volgograd.nuipogoda.ru).

Выявленные процессы деградации орошаемых земель требуют дальнейшего изучения с целью разработки систем мероприятий по стабилизации экологической устойчивости и увеличения продуктивного долголетия орошаемых агроландшафтов. Предварительными рекомендациями для решения данной проблемы могут быть замена поливной воды с контролем ее качества, применение периодической (раз в несколько лет) влагозарядковой весенней промывки слоя 0–70 см для оттеснения накопившихся солей в зону аэрации, гипсование для обеспечения вытеснения об-

менного натрия, подавления щелочности и удаления водорастворимого натрия в нижележащие горизонты за пределы корнеобитаемого слоя (в зону аэрации), использование капельного полива, увеличение доли многолетних бобовых и злаковых культур в структуре посевных площадей.

ВЫВОДЫ

1. Комплексный анализ современного состояния морфологического строения, гранулометрического и солевого составов орошаемых в течение полувека светло-каштановых почв южных склонов Приволжской возвышенности Волго-Донского междуречья (ФГУП “Орошаемое” Волгоградской области) на динамической площадке ДП-2 выявил следующие деградационные процессы: вторичное осолонцевание, слабое засоление почв, разрушение почвенных агрегатов в пахотном горизонте.

2. Орошаемые почвы приобрели комплекс признаков вторичной солонцеватости: (1) наличие светлых скоплений песчаных и пылеватых зерен минералов в пахотном горизонте как результат разрушающего воздействия капель оросительной воды при дождевании; (2) токсичную щелочность, связанную с натрием, по данным водной вытяжки, в горизонтах от 10–20 до 60–100 см; (3) обильные гумусово-глинистые кутаны на боковых гранях призмовидных структурных отдельностей в ненарушенной части почвенного профиля от 30 до 100 см. Наиболее вероятная причина – повышенная доля натрия в составе катионов поливной воды, SAR от 2.6 до 3.8 при минерализации около 1 г/л.

3. В слое 0–50 см в течение периода с 2011 по 2019 гг. наблюдалось циклическое нерегулярное колебание значений показателей состава водной вытяжки на фоне сравнительно узкого общего диапазона их варьирования возле нижней границы между градами “незасоленный” и “слабая степень засоления”. На качественном уровне до 2014 г. все оценки квалифицировались как “незасоленные”. С 2015 по 2019 гг. постепенно увеличивалась мощность слоя в пределах верхних горизонтов до глубины 50 см со слабой степенью засоления при содово-хлоридном типе химизма. Возможная причина – накопление солей натрия, поступивших

в почву с поливной водой при орошении, рассчитанном по водопотреблению сельскохозяйственных культур, и недостаточная их промывка атмосферными осадками.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Афанасьева Е.А.* Черноземы Средне-Русской возвышенности. М.: Наука, 1966. 224 с.
2. *Барановская В.А., Азовцев В.И.* CaCO_3 и его миграция в орошаемых почвах Заволжья // Совершенствование методов оценки засоленных почв, прогнозирование и предупреждение вторичного засоления. Тезисы всесоюзного совещания. М.: Минсельхоз. 1972. С. 75–76.
3. *Безднина С.Я.* Качество воды для орошения: Принципы и методы оценки. М.: Изд. РОМА, 1997. 185 с.
4. *Болотин Д.А., Дубенок Н.Н., Болотин А.Г., Фомин С.Д., Тихонова М.К.* Водные ресурсы Волгоградской области и проблемы их использования // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: наука и высшее профессиональное образование. 2018. № 4 (52). С. 191–197. DOI: [10.32786/2071-9485-2018-04-27](https://doi.org/10.32786/2071-9485-2018-04-27).
5. *Вадюнина А.Ф., Корчагина З.А.* Методы исследования физических свойств почв. М.: Агропромиздат, 1986. 416 с.
6. *Веклич М.Ф.* Стратиграфия лёссовой формации Украины и соседних стран. Киев: “Наукова Думка”, 1968. 238 с.
7. *Величко А.А., Грибченко Ю.Н., Губонина З.П., Дренова А.Н., Зеликсон Э.М., Маркова А.К., Морозова Т.Д., Ночаев В.П., Орешкин Д.Б., Певзнер М.А., Светлицкая Т.В., Сычева С.А., Тимирева С.Н., Ударцев В.П., Фаустова М.А., Халчева Т.А., Цацкин А.И., Чеплыга А.Л., Чиколени Н.И.* Лёссово-почвенная формация Восточно-Европейской равнины. Палеогеография и стратиграфия. М.: Институт географии РАН, 1997. 144 с.
8. ГОСТ 17.1.2.03-90. Охрана природы. Гидросфера. Критерии и показатели качества воды для орошения. М.: ИПК Издательство стандартов, 2012. 8 с.
9. *Горохова И.Н., Хитров Н.Б., Прокопьева К.О., Харланов В.А.* Почвенный покров Светлоярской оросительной системы через полвека мелиоративных воздействий // Почвоведение. 2018. № 8. С. 1–12. DOI: [10.1134/S0032180X18080130](https://doi.org/10.1134/S0032180X18080130).
10. *Горохова И.Н., Авдеева Т.Н., Панкова Е.И., Прокопьева К.О.* Почвенно-агрохимическая характеристика Светлоярского орошаемого участка в Волгоградской области // Аридные экосистемы. 2019. Т. 25. № 1. С. 48–59. DOI: [10.24411/1993-3916-2019-10044](https://doi.org/10.24411/1993-3916-2019-10044).

11. Государственный (Национальный) доклад о состоянии и использовании земель в Российской Федерации в 2018 г. / Министерство экономического развития РФ, Федеральная служба государственной регистрации и картографии. М., 2019. 196 с.
12. Дегтярева Е.Т., Жулидова А.Н. Почвы Волгоградской области. Волгоград: Нижне-Волжское книжное изд-во, 1970. 319 с.
13. Дедова Э.Б. Зональная шкала оценки качества поливных вод республика Калмыкия // Синергия. 2018. №1. С. 88–95. URL: <https://vepi.ru/wp-content/uploads/2018/10/Sinergiya-2018-1.pdf>.
14. Доскач А.Г. Природное районирование Прикаспийской полупустыни. М.: Наука, 1979. 142 с.
15. Дронова Т.Н., Бурцева Н.И., Молоканцева Е.И. Научные результаты исследований по многолетним травам // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: наука и высшее профессиональное образование. 2017. № 3 (47). С. 46–56.
16. Дубенок Н.Н., Болотин Д.А., Новиков А.А., Болотин А.Г. Эффективность использования водных ресурсов в орошаемом земледелии // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: наука и высшее профессиональное образование. 2018. № 3 (51). С. 83–90.
17. Зимовец Б.А. Экология и мелиорация почв сухостепной зоны. М.: Почвенный институт им. В.В. Докучаева, 1991. 248 с.
18. Зимовец Б.А., Хитров Н.Б. Экологическая оценка пригодности воды для орошения почв // Доклады РАСХН, 1993, № 4. С. 41–48.
19. Иванов В.М., Даниленко Ю.П. Зерновое сорго и кукуруза при орошении в Нижнем Поволжье. Волгоград: ИПК ФГОУ ВПО ВГСХА “Нива”, 2010. 240 с.
20. Кадаева А.Г. К вопросу о качестве оросительных вод в Калмыкии // Вестник Калмыцкого института гуманитарных исследований РАН. 2013. № 1. С. 160–162.
21. Кирпо Н.И. Водный, солевой режим орошаемых почв, заболачивание и вторичное их засоление в условиях Нижнего Поволжья. Приемы их мелиорации. Волгоград: ФГБОУ ВО Волгоградский ГАУ, 2015. 320 с.
22. Классификация и диагностика почв России. Смоленск: Ойкумена, 2004. 342 с.
23. Классификация и диагностика почв СССР. М.: Колос, 1977. 223 с.
24. Корнблум Э.А. Почва как иерархическая система морфологических элементов // Почвоведение. 1975. № 9. С. 36–48.
25. Кравченко Е.И., Хитров Н.Б., Горихова И.Н. Двумерное распределение засоления орошаемых почв рядом с оросительным каналом на участке “Червленое” Светлоярской оросительной системы //

Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2018. Вып. 94.
С. 19–37. DOI: [10.19047/0136-1694-2018-94-19-37](https://doi.org/10.19047/0136-1694-2018-94-19-37).

26. *Кружилин И.П., Болотин А.Г., Бекмаматов А.А.* Плодородие светло - каштановых почв при водосберегающем орошении // Плодородие. 2009. № 6 (51). С. 34–35.

27. *Кружилин И.П., Ганиев М.А., Мелихов В.В., Болотин А.Г., Родин К.А.* Режим орошения и дозы внесения удобрений на посевах риса с периодическими поливами в Нижнем Поволжье // Доклады РАСХН. 2015. № 5. С. 43–46.

28. *Кружилин И.П., Казакова Л.А.* Комплексная мелиорация солонцов на орошаемых землях Волго-Донского междуречья // Почвоведение. 2003. № 5. С. 623–629.

29. *Кружилин И.П., Морозова А.С., Казакова Л.А.* Динамика почвенных процессов в солонцах при орошении // Почвоведение. 1991. № 10. С. 100–111.

30. Лёссовые породы СССР. Под ред. И.В. Попова и В.С. Быкова. М.: изд-во “Наука”, 1966. 256 с.

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

32. *Мелихов В.В., Даниленко Ю.П., Болотин А.Г.* Программированное возделывание кукурузы на орошаемых землях Нижнего Поволжья // Земледелие. 2011. № 2. С. 9–11.

33. Мировая реферативная база почвенных ресурсов 2014. Международная система почвенной классификации для диагностики и создания легенд почвенных карт. Исправленная и дополненная версия 2015. Научные ред. перевода М.И. Герасимова, П.В. Красильников, Переводчик: И.А. Спиридонова. Доклады о мировых почвенных ресурсах 106. ФАО, МГУ им. М.В. Ломоносова, 2017. 203 с.

34. *Новикова А.Ф., Морозова А.С.* Засоленные почвы Волгоградской области // Почвоведение. 2003. № 9. С. 1061–1074.

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

36. Полевой определитель почв России. М.: Почвенный институт им. В.В. Докучаева, 2008. 182 с.

37. *Тихонова М.К.* Мониторинг водных нагрузок в орошаемых агроландшафтах // Орошаемое земледелие. 2014. № 4. С. 9–10.

38. *Хитров Н.Б., Горохова И.Н., Кравченко Е.И.* Комбинация засоленных почв северного склона возвышенности Ергени после прекращения

- орошения // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2019. Вып. 97. С. 52–90. DOI: [10.19047/0136-1694-2019-97-52-90](https://doi.org/10.19047/0136-1694-2019-97-52-90).
39. *Ahmed M., Hussain N., Al-Rawahy S.A.* Management of Saline Lands in Oman: Learning to Live with Salinity // *Developments in Soil Salinity Assessment and Reclamation: Innovative Thinking and Use of Marginal Soil and Water Resources in Irrigated Agriculture*. 2013. P. 265–281. DOI: [10.1007/978-94-007-5684-7_17](https://doi.org/10.1007/978-94-007-5684-7_17).
40. *Dagar J.C., Minhas P.S.* Agroforestry for the Management of Waterlogged Saline Soils and Poor-quality Waters. *Advances in Agroforestry*. Springer New Delhi Heidelberg New York Dordrecht London. Springer India. 2016. 210 p. DOI: [10.1007/978-81-322-2659-8](https://doi.org/10.1007/978-81-322-2659-8).
41. *de Soto I.S., Virto I., Barre P., Fernandez-Ugalde O., Anton R., Martinez I., Chaduteau C., Enrique A., Bescansa P.* A model for field-based evidences of the impact of irrigation on carbonates in the tilled layer of semi-arid Mediterranean soils. *Geoderma*. 2017. Vol. 297. P. 48–60. DOI: [10.1016/j.geoderma.2017.03.005](https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.03.005).
42. *Fourati H.-t., Bouaziz S., Benzina M., Bouaziz M.* Detection of terrain indices related to soil salinity and mapping salt-affected soils using remote sensing and geostatistical techniques // *Environmental Monitoring and Assessment*. 2017. 189:177. DOI: [10.1007/S10661-017-5877-7](https://doi.org/10.1007/S10661-017-5877-7).
43. IUSS Working Group WRB. 2015. World Reference Base for Soil Resources 2014, update 2015. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. World Soil Resources Reports No. 106. FAO, Rome. 192 p.
44. *Kumar M., Etesami H., Kumar V.* Saline Soil-based Agriculture by Halotolerant Microorganisms. Springer Nature Singapore Pte Ltd. 2019. 253 p. DOI: [10.1007/978-981-13-8335-9](https://doi.org/10.1007/978-981-13-8335-9).
45. *Moharana P.C., Singh R.S., Singh S.K., Tailor B.L., Jena R.K., Meena M.D.* Development of secondary salinity and salt migration in the irrigated landscape of hot arid India // *Environmental Earth Sciences*. 2019. Vol. 78:454. P. 1–11. DOI: [10.1007/s12665-019-8460-4](https://doi.org/10.1007/s12665-019-8460-4).
46. *Murtaza G., Ghafoor A., Zia-ur-Rehman M., and Qadir M.* Chapter 19. Marginal-Quality Water Use as an Ameliorant for Tile-Drained Saline-Sodic Soils in a Rice-Wheat Production System // *Developments in Soil Salinity Assessment and Reclamation: Innovative Thinking and Use of Marginal Soil and Water Resources in Irrigated Agriculture*. 2012. P. 295–311. DOI: [10.1007/978-94-007-5684-7_19](https://doi.org/10.1007/978-94-007-5684-7_19).
47. *Suarez D.L.* Use of Marginal-Quality Waters for Sustainable Crop Production // *Developments in Soil Salinity Assessment and Reclamation: Innovative Thinking and Use of Marginal Soil and Water Resources in*

- Irrigated Agriculture. 2013. P. 367–381. DOI: [10.1007/978-94-007-5684-7_25](https://doi.org/10.1007/978-94-007-5684-7_25).
48. Swarup A. Sustainable Management of Salt-Affected Soils and Poor-Quality Ground Waters for Enhancing Crop Production // Developments in Soil Salinity Assessment and Reclamation: Innovative Thinking and Use of Marginal Soil and Water Resources in Irrigated Agriculture. 2013. P. 327–334. DOI: [10.1007/978-94-007-5684-7_21](https://doi.org/10.1007/978-94-007-5684-7_21).
49. Wu L.S., Wood Y., Jiang P.P., Li L., Pan G., Lu L.Q., Pan G.X., Lu J.H., Chang A.C., Enloe H.A. Carbon sequestration and dynamics of two irrigated agricultural soils in California // Soil Science Society of America Journal. 2008. Vol. 72. P. 808–814. DOI: [10.2136/sssaj2007.0074](https://doi.org/10.2136/sssaj2007.0074).
50. Yahiaoui I., Douaoui A., Zhang Q., Ziane A. Soil salinity prediction in the Lower Cheliff plain (Algeria) based on remote sensing and topographic feature analysis // Arid Land. 2015. Vol. 7 (6). P. 794–805. DOI: [10.1007/s40333-015-0053-9](https://doi.org/10.1007/s40333-015-0053-9).
51. Zaman M., Shahid S.A., Heng L. Guideline for Salinity Assessment, Mitigation and Adaptation Using Nuclear and Related Techniques. International Atomic Energy Agency, Springer Nature Switzerland AG. 2018. 164 p. DOI: [10.1007/978-3-319-96190-3](https://doi.org/10.1007/978-3-319-96190-3).
52. Zhang J. Coastal Saline Soil Rehabilitation and Utilization Based on Forestry Approaches in China. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 2014. 182 p. DOI: [10.1007/978-3-642-39915-2](https://doi.org/10.1007/978-3-642-39915-2).

REFERENCES

1. Afanas'eva E.A., *Chernozemy Sredne-Russkoj vozvyshennosti* (Chernozems of the Central Russian Upland), Moscow, Nauka, 1966, 224 p.
2. Baranovskaya V.A., Azovcev V.I., CaCO_3 i ego migraciya v oroshaemyh pochvah Zavolzh'ya (CaCO_3 and its migration in irrigated soils of the Trans-Volga region), *Sovershenstvovanie metodov ocenki zasolennyh pochv, prognozirovanie i preduprezhdenie vtorichnogo zasoleniya*, Tezisy vsesoyuznogo soveshchaniya (Improvement of methods for assessing saline soils, forecasting and preventing secondary salinization, Theses of the All-Union Meeting.), Moscow: Minsel'hoz, 1972, pp. 75–76.
3. Bezdina S.Ya., *Kachestvo vody dlya orosheniya: Principy i metody ocenki* (Irrigation water quality: Principles and methods of assessment), Moscow: ROMA, 1997, 185 p.
4. Bolotin D.A., Dubenok N.N., Bolotin A.G., Fomin S.D., Tihonova M.K., *Vodnye resursy Volgogradskoj oblasti i problemy ih ispol'zovaniya* (Water resources of the Volgograd region and problems of their use), *Izvestiya Nizhnevolzhskogo agrouniversitetskogo kompleksa: nauka i vysshee*

- professional'noe obrazovanie*, 2018, No. 4 (52), pp. 191–197. DOI: [10.32786/2071-9485-2018-04-27](https://doi.org/10.32786/2071-9485-2018-04-27).
5. Vadyunina A.F., Korchagina Z.A., *Metody issledovaniya fizicheskikh svoystv pochv* (Methods for studying the physical properties of soils), Moscow: Agropromizdat, 1986, 416 p.
6. Veklich M.F., *Stratigrafiya lyossovoj formacii Ukrainy i sosednih stran* (Stratigraphy of the loess formation in Ukraine and neighboring countries), Kiev: “Naukova Dumka”, 1968, 238 p.
7. Velichko A.A., Gribchenko Yu.N., Gubonina Z.P., Drenova A.N., Zelikson E.M., Markova A.K., Morozova T.D., Nochaev V.P., Oreshkin D.B., Pevzner M.A., Svetlickaya T.V., Sycheva S.A., Timireva S.N., Udarcev V.P., Faustova M.A., Halcheva T.A., Cackin A.I., Cheplyga A.L., Chikolini N.I., *Lyossovo-pochvennaya formaciya Vostochno-Evropejskoj ravniny. Paleogeografiya i stratigrafiya* (Loess-soil formation of the East European Plain. Paleogeography and stratigraphy), Moscow: Institut geografii RAN, 1997, 144 p.
8. GOST 17.1.2.03-90. Protection of Nature. Hydrosphere. Criteria and indicators of water quality for irrigation, Moscow: IPK Izdatel'stvo standartov, 2012, 8 p.
9. Gorokhova I.N., Khitrov N.B., Prokopeva K.O., Kharlanov V.A., Soil Cover of the Svetloyarsk Irrigation System after 50 Years of Reclamation Practices, *Eurasian Soil Science*, 2018, Vol. 51, No. 8, pp. 1–11,. DOI: [10.1134/S1064229318060078](https://doi.org/10.1134/S1064229318060078).
10. Gorokhova I.N., Avdeeva T.N., Pankova E.I., Prokopyeva K.O., Soil and Agrochemical Characteristics of the Svetloyar Irrigated Site in Volgograd Oblast, *Arid Ecosystems*, 2019, Vol. 9, No. 1, pp. 41–50, DOI: [10.1134/S2079096119010074](https://doi.org/10.1134/S2079096119010074).
11. State (National) report on the state and use of land in the Russian Federation in 2018, Ministry of Economic Development of the Russian Federation, Federal Service for State Registration and Cartography, Moscow, 2019, 196 p.
12. Degtyareva E.T., Zhulidova A.N., *Pochvy Volgogradskoj oblasti* (Soils of the Volgograd region), Volgograd: Nizhne-Volzhskoe knizhnoe izd., 1970, 319 p.
13. Dedova E.B., Zonal'naya shkala ocenki kachestva polivnyh vod respublika Kalmykiya (Zonal scale for assessing the quality of irrigation water in the Republic of Kalmykia), *Sinergiya*, 2018, No 1, pp. 88–95, URL: <https://vepi.ru/wp-content/uploads/2018/10/Sinergiya-2018-1.pdf>.
14. Dorskach A. G. *Prirodnoe rajonirovanie Prikaspijskoj polupustyni* (Natural zoning of the Caspian semi-desert), Moscow: Nauka, 1979, 142 p.

15. Dronova T.N., Burceva N.I., Molokanceva E.I., Nauchnye rezultaty issledovaniy po mnogoletnim travam (Scientific results of research on perennial herbs), *Izvestiya Nizhnevolzhskogo agrouniversitetskogo kompleksa: nauka i vysshee professional'noe obrazovanie*, 2017, No. 3 (47), pp. 46–56.
16. Dubenok N.N., Bolotin D.A., Novikov A.A., Bolotin A.G., Effektivnost' ispol'zovaniya vodnykh resursov v oroshaemom zemledelii (Efficiency of use of water resources in irrigated agriculture), *Izvestiya Nizhnevolzhskogo agrouniversitetskogo kompleksa: nauka i vysshee professional'noe obrazovanie*, 2018, No. 3 (51), pp. 83–90.
17. Zimovec B.A., *Ekologiya i melioratsiya pochv suhostepnoj zony* (Ecology and land reclamation of the dry steppe zone), Moscow: Pochvennyy institut im. V.V. Dokuchaeva, 1991, 248 p.
18. Zimovec B.A., Khitrov N.B., Ekologicheskaya ocenka prigodnosti vody dlya orosheniya pochv (Ecological assessment of the suitability of water for soil irrigation), *Doklady Rossijskoj akademii s.-kh. nauk*, 1993, No. 4, pp. 41–48.
19. Ivanov V.M., Danilenko Yu.P., *Zernovoe sorgo i kukuruza pri oroshenii v Nizhnem Povolzh'e* (Grain sorghum and corn under irrigation in the Lower Volga region), Volgograd: IPK FGOU VPO VGSKHA “Niva”, 2010, 240 p.
20. Kadaeva A.G., K voprosu o kachestve orositel'nykh vod v Kalmykii (On the issue of the quality of irrigation water in Kalmykia), *Vestnik Kalmyckogo instituta gumanitarnykh issledovaniy RAN*, 2013, No. 1, pp. 160–162.
21. Kirpo N.I., *Vodnyi, solevoi rezhim oroshaemykh pochv, zabolachivanie i vtorichnoe ikh zasolenie v usloviyakh Nizhnego Povolzh'ya. Priemy ikh melioratsii*. Volgograd: FGBOU VO Volgogradskii GAU, 2015. 320 vtorichnoe ikh zasolenie v usloviyakh Nizhnego Povolzh'ya. Priemy ikh melioratsii (Water, salt regime of irrigated soils, waterlogging and their secondary salinization in the conditions of the Lower Volga region. Techniques for their reclamation), Volgograd: FGBOU VO Volgogradskij GAU, 2015, 320 p.
22. *Klassifikatsiya i diagnostika pochv Rossii* (Classification and diagnostics of soils in Russia), Smolensk: Oykumena, 2004, 342 p.
23. *Klassifikatsiya i diagnostika pochv SSSR* (Classification and diagnostics of soils in the USSR), Moscow: Kolos, 1977, 223 p.
24. Kornblyum E.A., *Pochva kak ierarhicheskaya sistema morfologicheskikh elementov* (Soil as a hierarchical system of morphological elements), *Pochvovedenie*, 1975, No. 9, pp. 36–48.
25. Kravchenko E.I., Khitrov N.B., Gorokhova I.N., Two-dimensional distribution of salinity in irrigated soils near the irrigation channel at the plot “Chervlenoe” of the Svetloyar irrigation system, *Dokuchaev Soil Bulletin*, 2018, Vol. 94, pp. 19–38, DOI: [10.19047/0136-1694-2018-94-19-37](https://doi.org/10.19047/0136-1694-2018-94-19-37).

26. Kruzhilin I.P., Bolotin A.G., Bekmametov A.A., Plodorodie svetlo-kashtanovykh pochv pri vodosberegayushchem oroshenii (Fertility of light chestnut soils with water-saving irrigation), *Plodorodie*, 2009, No. 6 (51), pp. 34–35.
27. Kruzhilin I.P., Ganiev M.A., Melihov V.V., Bolotin A.G., Rodin K.A., Rezhim orosheniya i dozy vneseniya udobrenij na posevah risa s periodicheskimi polivami v Nizhnem Povolzh'e (Irrigation regime and doses of fertilizers on rice crops with periodic irrigation in the Lower Volga region), *Doklady Rossijskoj Akademii Sel'skohozyajstvennykh Nauk*, 2015, No. 5, pp. 43–46.
28. Kruzhilin I.P., Kazakova L.A., Kompleksnaya melioraciya soloncov na oroshaemykh zemlyakh Volgo-Donskogo mezhdurech'ya (Complex reclamation of solonchets on irrigated lands of the Volga-Don interfluve), *Pochvovedenie*, 2003, No. 5, pp. 623–629.
29. Kruzhilin I.P., Morozova A.S., Kazakova L.A., Dinamika pochvennykh processov v solonchakh pri oroshenii (Dynamics of soil processes in solonchets during irrigation), *Pochvovedenie*, 1991, No. 10, pp. 100–111.
30. Popov I.V., Bykov V.S. (Eds), *Lyossovyje porody SSSR* (Loess breeds of the USSR), Moscow: "Nauka", 1966, 256 p.
31. Lyubimova I.N., Novikova A.F., Changes in the Properties of Solonchetic Soil Complexes in the Dry Steppe Zone under Anthropogenic Impacts, *Eurasian Soil Science*, 2016, Vol. 49, No. 5, pp. 581–590, DOI: [10.1134/S1064229316050112](https://doi.org/10.1134/S1064229316050112).
32. Melihov V.V., Danilenko YU.P., Bolotin A.G., Programmirovannoe vozdeystvie kukuruzy na oroshaemykh zemlyakh Nizhnego Povolzh'ya (Programmed corn cultivation on irrigated lands in the Lower Volga region), *Zemledelie*, 2011, No. 2, pp. 9–11.
33. Gerasimova M.I., Krasilnikov P.V. (Eds), *World abstract database of soil resources 2014. International system of soil classification for diagnostics and creation of soil map legends*. Revised and updated version 2015. Reports on world soil resources 106. FAO, Moscow: MGU im. M.V. Lomonosova, 201, 203 p.
34. Novikova A.F., Morozova A.S., Salt-Affected Soils of Volgograd Oblast, *Eurasian Soil Science*, 2003, Vol. 36, No. 9, pp. 936–958.
35. Pankova E.I., Novikova A.F., Ameliorative Status and Secondary Salinization of Irrigated Soils in Volgo-grad Oblast, *Eurasian Soil Science*, 2004, Vol. 37, No. 6, pp. 634–645.
36. *Polevoj opredelitel pochv Rossii* (Field guide to Russian soils.), Moscow: Pochvennyj institut im. V.V. Dokuchaeva, 2008, 182 p.

37. Tikhonova M.K., Monitoring vodnyh nagruzok v oroshaemyh agrolandshaftah (Monitoring of water loads in irrigated agricultural landscapes), *Oroshaemoe zemledelie*, 2014, No. 4, pp. 9–10.
38. Khitrov N.B., Gorokhova I.N., Kravchenko E.I., Combination of saline soils of the Northern slope of the Ergeni upland after irrigation cessation, *Dokuchaev Soil Bulletin*, 2019, Vol. 97, pp. 52–90, DOI: [10.19047/0136-1694-2019-97-52-90](https://doi.org/10.19047/0136-1694-2019-97-52-90).
39. Ahmed M., Hussain N., Al-Rawahy S.A., Management of Saline Lands in Oman: Learning to Live with Salinity, *Developments in Soil Salinity Assessment and Reclamation: Innovative Thinking and Use of Marginal Soil and Water Resources in Irrigated Agriculture*, 2013, pp. 265–281, DOI: [10.1007/978-94-007-5684-7_17](https://doi.org/10.1007/978-94-007-5684-7_17).
40. Dagar J.C., Minhas P.S., Agroforestry for the Management of Waterlogged Saline Soils and Poor-quality Waters, *Advances in Agroforestry*, 2016, 210 p., DOI: [10.1007/978-81-322-2659-8](https://doi.org/10.1007/978-81-322-2659-8).
41. de Soto IS., Virto I., Barre P., Fernandez-Ugalde O., Anton R., Martinez I., Chaduteau C., Enrique A., Bescansa P., A model for field-based evidences of the impact of irrigation on carbonates in the tilled layer of semi-arid Mediterranean soils, *Geoderma*, 2017, Vol. 297, pp. 48–60, DOI: [10.1016/j.geoderma.2017.03.005](https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.03.005).
42. Fourati H.-t., Bouaziz S., Benzina M., Bouaziz M. Detection of terrain indices related to soil salinity and mapping salt-affected soils using remote sensing and geostatistical techniques, *Environmental Monitoring and Assessment*, 2017, 189:177, DOI: [10.1007/S10661-017-5877-7](https://doi.org/10.1007/S10661-017-5877-7).
43. IUSS Working Group WRB. 2015. World Reference Base for Soil Resources 2014, update 2015. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps, *World Soil Resources Reports*, FAO, Rome, No. 106, 192 p.
44. Kumar M., Etesami H., Kumar V., (Eds), *Saline Soil-based Agriculture by Halotolerant Microorganisms*, 2019, 253 p. DOI: [10.1007/978-981-13-8335-9](https://doi.org/10.1007/978-981-13-8335-9).
45. Moharana P.C., Singh R.S., Singh S.K., Tailor B.L., Jena R.K., Meena M.D., Development of secondary salinity and salt migration in the irrigated landscape of hot arid India, *Environmental Earth Sciences*, 2019, Vol. 78:454, pp. 1–11, DOI: [10.1007/s12665-019-8460-4](https://doi.org/10.1007/s12665-019-8460-4).
46. Murtaza G., Ghafoor A., Zia-ur-Rehman M., Qadir M., Chapter 19. Marginal-Quality Water Use as an Ameliorant for Tile-Drained Saline-Sodic Soils in a Rice-Wheat Production System, *Developments in Soil Salinity Assessment and Reclamation: Innovative Thinking and Use of Marginal Soil and Water Resources in Irrigated Agriculture*, 2013, pp. 295–311, DOI: [10.1007/978-94-007-5684-7_19](https://doi.org/10.1007/978-94-007-5684-7_19).

47. Suarez D.L., Use of Marginal-Quality Waters for Sustainable Crop Production, *Developments in Soil Salinity Assessment and Reclamation: Innovative Thinking and Use of Marginal Soil and Water Resources in Irrigated Agriculture*, 2013, pp. 367–381, DOI: [10.1007/978-94-007-5684-7_25](https://doi.org/10.1007/978-94-007-5684-7_25).
48. Swarup A., Sustainable Management of Salt-Affected Soils and Poor-Quality Ground Waters for Enhancing Crop Production, *Developments in Soil Salinity Assessment and Reclamation: Innovative Thinking and Use of Marginal Soil and Water Resources in Irrigated Agriculture*, 2013, pp. 327–334, DOI: [10.1007/978-94-007-5684-7_21](https://doi.org/10.1007/978-94-007-5684-7_21).
49. Wu L.S., Wood Y., Jiang P.P., Li L., Pan G., Lu L.Q., Pan G.X., Lu J.H., Chang A.C., Enloe H.A., Carbon sequestration and dynamics of two irrigated agricultural soils in California, *Soil Science Society of America Journal*, 2008, Vol. 72, pp. 808–814, DOI: [10.2136/sssaj2007.0074](https://doi.org/10.2136/sssaj2007.0074).
50. Yahiajui I., Douaoui A., Zhang Q., Ziane A., Soil salinity prediction in the Lower Cheliff plain (Algeria) based on remote sensing and topographic feature analysis, *Arid Land*, 2015, Vol. 7 (6), pp. 794–805, DOI: [10.1007/s40333-015-0053-9](https://doi.org/10.1007/s40333-015-0053-9).
51. Zaman M., Shahid S.A., Heng L., *Guideline for Salinity Assessment, Mitigation and Adaptation Using Nuclear and Related Techniques*. International Atomic Energy Agency, 2018, 164 p., DOI: [10.1007/978-3-319-96190-3](https://doi.org/10.1007/978-3-319-96190-3).
52. Zhang J., *Coastal Saline Soil Rehabilitation and Utilization Based on Forestry Approaches in China*, 2014, 182 p., DOI: [10.1007/978-3-642-39915-2](https://doi.org/10.1007/978-3-642-39915-2).

УДК 631.474

DOI: 10.19047/0136-1694-2020-104-110-157



Ссылки для цитирования:

Романовская А.Ю., Савин И.Ю. Современные методы мониторинга ветровой эрозии почв // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2020. Вып. 104. С. 110-157. DOI: 10.19047/0136-1694-2020-104-110-157

Cite this article as:

Romanovskaya A.Yu., Savin I.Yu., Modern techniques for monitoring wind soil erosion, Dokuchaev Soil Bulletin, 2020, V. 104, pp. 110-157, DOI: 10.19047/0136-1694-2020-104-110-157

Благодарность:

Исследования проведены при поддержке гранта РФФИ № 19-05-50063 и гранта РНФ № 20-67-46017.

Acknowledgments:

The studies were carried out with the financial support of the Russian Foundation for Basic Research (RFBR) in the framework of the scientific project No. 19-05-50063 and of the Russian Science Foundation project No. 20-67-46017.

Современные методы мониторинга ветровой эрозии почв

© 2020 г. А. О. Романовская^{1*}, И. Ю. Савин^{1,2**}

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

*e-mail: burmistrovaann13@mail.ru,

**<https://orcid.org/0000-0002-8739-5441>, e-mail: savigory@gmail.com.

²Белгородский государственный национальный
исследовательский университет, Россия,
308015, Белгород, ул. Победы, 85.

Поступила в редакцию 03.08.2020, принята к публикации 11.11.2020

Резюме: В статье приведен обзор научной литературы в области существующих методов мониторинга ветровой эрозии почв: визуальной оценки, микролирирования, фотограмметрического, Cs^{137} и дистанционных методов с последующим моделированием. Приводится краткая характеристика каждого метода, преимущества и недостатки, а также условия и ограничения их применения. При выборе метода

необходимо учитывать условия проведения мониторинга, площадь рассматриваемой территории и масштаб проведения исследований, временные рамки, финансовые и трудовые ресурсы. Установлено, что наиболее актуальными, экономически оправданными и перспективными, особенно на больших территориях, являются методы дистанционного зондирования, позволяющие проводить мониторинг в различных масштабах, и не только оценивать эрозионную активность, но и прогнозировать ее, таким образом, предоставляя информацию для принятия верных, оперативных и своевременных хозяйственно-экономических решений, направленных как на борьбу с ветровой эрозией и устранение последствий, так и на организацию превентивных мер. Для повышения эффективности этих методов также необходимо создавать базы данных, расширять и накапливать почвенную информацию, которая позволяет верифицировать, уточнять, обрабатывать и калибровать полученные спутниковые данные. В литературе в подавляющем большинстве случаев речь идет о дешифрировании ветровой эрозии в пустынных и полупустынных зонах. Также практически отсутствуют исследования о переносе химических веществ с микрочастицами в результате ветровой эрозии. Как в России, так и за рубежом предпринимаются попытки моделирования эрозии почв, но качество моделей сильно ограничено недостатком полевых данных, необходимых для их калибровки и верификации, которые можно получить наземными методами, пречисленными выше. Выявление эродированных почв в стране до сих пор осуществляется наземными методами. Однако полевые исследования могут проводиться только на очень ограниченной территории, на немногих ключевых участках, и их проведение затруднительно на активно используемых сельскохозяйственных землях.

Ключевые слова: дефляция почв, спутниковый мониторинг, деградация почв, методы исследования почв.

Modern techniques for monitoring wind soil erosion

A. Yu. Romanovskaya^{1*}, I. Yu. Savin^{1,2**}

¹*Federal Research Centre “V.V. Dokuchaev Soil Science Institute”,
7 Bld. 2 Pyzhevskiy per., Moscow 119017, Russian Federation,*

**e-mail: burmistrovaann13@mail.ru,*

***<https://orcid.org/0000-0002-8739-5441>, e-mail: savigory@gmail.com.*

²*Belgorod State University,
85 Pobedy Str., Belgorod 308015, Russian Federation.*

Received 03.08.2020, Accepted 11.11.2020

Abstract: The article presents a scientific literature review in the field of modern methods of monitoring wind erosion of soils such as: visual indicators of erosion, erosion bridge, close-range photogrammetry, cesium-137 and remote sensing cover. The brief description of each method, advantages and disadvantages, conditions and limitations of their applicability are given. When choosing the method, it is necessary to take into account the monitoring conditions, the area of the territory under consideration and the scale of research, time frames, financial and labor resources. It has been established that the most relevant, economically justified and promising, especially on large territories, are the remote sensing methods, which allow monitoring on different scales, and not only estimating the erosion activity, but also predicting it, thus providing the parties concerned with the necessary information for making right, prompt and timely economic decisions, aimed both at combating wind erosion and elimination of its consequences, and for organizing preventive measures as well. To improve the effectiveness of these methods it is also necessary to create databases, expand and accumulate soil information that can help verify, refine, process and calibrate the satellite data obtained. In order to understand aeolian processes and dust particle transport mechanisms one should create integrated methods that include remote sensing data, meteorological data, on the basis of which the improved models and maps would be developed, and erosion processes would be predicted. The scientific literature is mostly devoted to the interpretation of wind erosion in arid and semi-arid zones. The possibility of satellite monitoring of soil erosion in arable fields remains poorly studied. There are also practically no research results available on the transport of chemicals with micro-particles due to wind erosion. Both in Russia and abroad the attempts are made in soil erosion modelling, but the quality of the models is very limited by the lack of field data required for their calibration and verification. Eroded soils in the country are still identified using ground-based methods. However, field studies can only be conducted in a very limited area, in a few key points, and as a matter of fact it is quite complicated to conduct field studies on actively used agricultural lands.

Keywords: soil deflation, satellite monitoring, soil degradation, soil research methods.

ВВЕДЕНИЕ

Под эрозией почвы в настоящее время понимают совокупность взаимосвязанных процессов отрыва, переноса и отложения почвы поверхностным стоком временных водных потоков и вет-

ром. Явление ветровой эрозии почвы зарождается на границе твердой и газообразной сред (почвы и воздуха), развивается в прилегающем к Земле слое атмосферы и завершается на земной, водной или почвенной поверхности ([Гендугов, Глазунов, 2007](#); [Duniway et al., 2019](#)).

Изучение эрозии почв, ее причин и следствий, а также мероприятий по ее ликвидации имеет большое народнохозяйственное и научное значение. Эрозия почв – это постоянные, нередко разрушительные процессы, которые существенно усиливаются в результате деятельности человека и приносят большой ущерб народному хозяйству ([Кузнецов, Глазунов, 2020](#)).

Прежде всего затраты связаны со снижением объемов получаемой продукции и сырья, с восполнением потерь питательных веществ путем внесения повышенных доз удобрений, с увеличением стоимости содержания дорог, дамб и другой инфраструктуры, со снижением водоудерживающей способности почвы, что, в свою очередь, приводит к повышению оросительных норм, и, следовательно, сопутствующих издержек, и, наконец, существенных затрат требуют и сами противозерозионные мероприятия. Кроме того, ветровая эрозия снижает рекреационный потенциал территории вследствие ухудшения качества воды и воздуха, сведения мест обитания диких животных. Несмотря на то, что эрозия – это важный естественный процесс, когда он дополнительно усиливается деятельностью человека, то может оказывать существенное влияние на продуктивность и характер использования земель ([Гендугов, Глазунов, 2007](#); [Ypsilantis, 2011](#); [Duniway et al., 2019](#); [Webb et al., 2020](#)). В наибольшей степени эрозии подвержены почвы наиболее густонаселенных регионов. Это свидетельствует в пользу общепринятого представления о том, что в местах обитания человека эрозия имеет в основном антропогенный характер.

Механизмы влияния ветровой эрозии на почву весьма многообразны. Это и снижение плодородия эродированных почв, и уменьшение площади пашни в результате надвигания песков, и загрязнение почв сельскохозяйственных угодий вредными веществами, в том числе токсичными солями, приносимыми ветром с поверхности солончаков и отвалов горных пород, а также снижение фотосинтеза в результате загрязнения листовой поверхности

посевов пылью. Кроме того, ветровая эрозия почвы является главной причиной наполнения воздуха пылью, причем масштабы поступления почвенной пыли столь велики, что она начинает влиять на тепловой баланс планеты ([Гендугов, Глазунов, 2007](#)).

Эрозия приводит к потере углерода почвой, во-первых, в результате механического удаления из эродируемой почвы, во-вторых, в ходе ускоренной минерализации, вызванной эрозией, как в эродированной почве, так и в наносной. Процессы, приводящие к этому, требуют углубленного изучения, но уже теперь не подлежит сомнению, что одним из немногих возможных способов изъятия избытка углерода из атмосферы является запасание его в виде специфического органического вещества почвы ([Minasny et al., 2017](#)).

Почва – основа среды обитания человека, и эрозия приводит к нарушению этой функции почв. В частности, обыкновенная почвенная пыль, поднимаемая ветром, вызывает увеличение заболеваемости астмой. При большом содержании почвенной пыли в воздухе может быть полностью парализована жизнь огромного мегаполиса. Ситуация столь серьезна, что во многих странах законодательно вводятся пределы допустимого содержания пыли в атмосфере.

Кроме того, пыль может служить причиной возникновения эпидемий, так как содержит повышенное количество спорозоных аэробных бактерий. Еще большую опасность несет радиоактивная пыль, источниками которой являются эродируемые ветром почвы загрязненных территорий, а также золоотвалы теплоэлектростанций, работающих на углях, содержащих радиоактивные элементы и тяжелые металлы.

Частота и масштабы проявления ветровой эрозии почвы, которые стали глобальными, а также темпы и тенденции ее распространения имеют угрожающий характер. Об этом свидетельствуют многочисленные материалы последних международных форумов ученых и общественности, организованных Докучаевским обществом почвоведов, Международным обществом почвоведов (ISSS), Международной организацией мелиорации почв (ISCO), Европейским обществом охраны почв (ESSC), Организацией охраны почв и вод (SWCO).

Эрозии в мире подвержены почвы на площади в 1.643 млрд га, из них в чрезмерной степени – на площади в 250 млн га. Водная эрозия распространена на площади в 1 094 млн га, а ветровая – на площади в 549 млн га (GLASOD, 1990) (<https://www.isric.org/projects/global-assessment-human-induced-soil-degradation-glasod>). Ареалы почв, пораженных этими двумя видами эрозии, совпадают лишь частично. Согласно прямым измерениям со спутника, пыльные бури, как крайнее проявление ветровой эрозии почвы, возникают во всех почвенно-климатических поясах, в том числе в арктическом, но наиболее часто и устойчиво они повторяются в Северном полушарии, в так называемом пыльном поясе, протянувшемся от западных окраин Северной Африки, через Ближний и Средний Восток, Центральную и Южную Азию в Китай.

Согласно расчетам, в течение двух последних веков эрозия уничтожила в мире почти 2 млрд га пашни. Для сравнения – сейчас сельскохозяйственные земли обрабатываются на площади 1.5 млрд га (<https://agrovesti.net/lib/tech/reclamation-tech/eroziya-pochv-prichiny-vidy-posledstviya-metody-predotvrashcheniya.html>).

Ветровая эрозия может нанести непоправимый вред, как за длительное время, так и всего за несколько часов. Пыльные (черные) бури довольно быстро уничтожают верхний слой почвы, унося его порой за многие сотни километров. Порой такая пыль, оседая, засыпает целые водоемы. Можно привести пример из 50-х годов прошлого века. Тогда во время освоения целины в степях Казахстана и западной части Алтайского края была использованная отвальный вспашка земли. После посева началась засуха, а затем на территорию с Запада пришел сильный ветер. Он унес значительную часть плодородного слоя. Пыль казахстанских и алтайских степей оседала даже в Красноярском крае (<https://agrovesti.net/lib/tech/reclamation-tech/eroziya-pochv-prichiny-vidy-posledstviya-metody-predotvrashcheniya.html>).

В России ветровая эрозия проявляется в основном в определенных границах. По северу – это неправильной формы линия от Воронежа в направлении на Восток. Граница идет через Самару, Челябинск, Петрозаводск, Омск. Далее – к Новосибирску и затем в Восточную Сибирь, через Хакасию, Бурятию, Туву, Читинскую

область. Из-за этого на землях сельскохозяйственного назначения, расположенных южнее, применяются меры для защиты от ветровой эрозии. Высокие риски для ветровой эрозии присутствуют в Поволжье, на Северном Кавказе, на Урале, в Сибири. В зоне риска находится площадь, превышающая 45 млн га, в том числе 38.7 млн га – это пашня (<https://agrovesti.net/lib/tech/reclamation-tech/eroziya-pochv-prichiny-vidy-posledstviya-metody-predotvrashcheniya.html>). Таким образом, основными дефляционно опасными очагами в стране являются степные и полупустынные зоны, особенно в регионах с высокой долей пахотных земель ([Ларионов, 1993](#)).

Ежегодно с пахотных склонов страны из-за водной и ветровой эрозии сносится свыше 500 млн т плодородной части почв. В результате этих процессов недобор зерна по стране оценивается в 15.8 млн т в год. Общий ущерб от водной и ветровой эрозии в России составляет ежегодно более 9.7 млрд. долларов ([Иванов и др., 2016](#)).

Поэтому мониторинг эродированных почв России представляет собой важную и неотложную общегосударственную проблему. С научной точки зрения процесс ветрового массопереноса с пахотных земель до сих пор очень слабо изучен. География этих явлений определена лишь в самом общем виде, а перенос химических веществ с микрочастицами с полей и их влияние на плодородие почв зон оседания частиц и их экологическое состояние практически не изучены ([Научные основы..., 2013](#)).

В последние десятилетия появились новые технические возможности для исследования ветровой эрозии. Так, при регистрации и отслеживании пыли, поднятой в воздух во время обработки почвы или в результате эрозии, стали применять лидары, солнечные фотометры, счетчики фотонов; при изучении переноса почвы ветром в приземном слое – пьезо- и мембранные датчики с высокой собственной частотой измерения, изокINETические пылеуловители, при физическом моделировании ветровой эрозии – усовершенствованные полевые и лабораторные аэродинамические установки ([Гендугов, Глазунов, 2007](#); [Кузнецов, Глазунов, 2020](#)). Одновременно с развитием экспериментальных методов изучения ветровой эрозии совершенствовались системы дистанционного

зондирования на основе аэрокосмической съемки, что привело к накоплению огромного экспериментального материала, позволяющего анализировать явление ветровой эрозии почвы во всей его полноте, от стадии выдувания до стадии аккумуляции. Однако о наличии такого рода проектов, посвященных сопряженному исследованию полномасштабного единичного явления ветровой эрозии почвы на микро-, мезо- и макроуровнях, неизвестно.

ТРАДИЦИОННЫЕ МЕТОДЫ МОНИТОРИНГА ВЕТРОВОЙ ЭРОЗИИ ПОЧВ

Начало научному подходу к изучению ветровой эрозии почв и разработке противозерозионных мероприятий положено трудами классиков почвоведения: В.В. Докучаева, П.А. Костычева, Н.М. Сибирцева, В.Р. Вильямса, – их сотрудников и последователей, которые уделяли внимание ветровой эрозии в первую очередь в качестве фактора образования и преобразования почв, а также трудами великих исследователей Центральной Азии: Н.М. Пржевальского, Н.Ф. Дубровина, В.И. Роборовского, П.К. Козлова, Г.Е. Грум-Гржимайло, М.В. Певцова, Г.Н. Потанина, В.А. Обручева, которые исследовали физические, почвоведческие, геологические и географические аспекты ветровой эрозии ([Гендугов, Глазунов, 2007](#)). На основе преимущественно описательного, сравнительно-географического метода исследований они получили первые, не потерявшие своего значения до сих пор, сведения о причинах, интенсивности и масштабах проявления ветровой эрозии почв и способах ее предупреждения. Расширение методической базы, обусловленное применением стационарного и сравнительно-аналитического методов исследования, позволило углубить качественные представления о механизмах явления ветровой эрозии почв, получить количественные оценки ее распространения и степени опасности, положить начало разработке противозерозионных мероприятий на научной основе. Дальнейший качественный и количественный рост исследований по ветровой эрозии почв связан с развитием и применением методов моделирования – физического, математического, численного. Начало экспериментальным методам изучения механизмов ветровой эрозии почв было положено работами видного геолога Н.А. Соколова в конце XIX в. Наиболее

содержательные результаты при изучении механизмов ветровой эрозии были получены во второй половине прошлого века А.И. Знаменским, Г.И. Васильевым, Д.С. Булгаковым, Л.Н. Гавриленко, А.С. Калиниченко и др. с применением инструментальных методов, основанных на измерении переноса почвенных частиц ветром во время пыльных бурь в полевых условиях. Для выяснения механизмов отрыва почвенных частиц ветром потребовалась разработка методов физического моделирования на основе аэродинамических труб ([Гендугов, Глазунов, 2007](#)).

Ниже приводится краткая характеристика основных традиционных методов оценки и мониторинга ветровой эрозии.

Визуальная оценка

В 1967 г. в США впервые была разработана методика оценки эрозионного состояния земель площадью 160 млн акров в течение последующих 5–10 лет. Важно отметить, что на тот момент не было еще накоплено количественных показателей, позволяющих оценить эрозионную активность в конкретный момент. С этой целью была разработана Классификация эрозионного состояния (The Erosion Condition Classification System) ([Clark, 1980](#)), основанная на свойствах поверхности почвы, которые исследователь может оценить в полевых условиях и которые можно представить в цифровом выражении и в дальнейшем использовать в качестве основы для выделения пяти эрозионных классов. Эти цифровые величины, характеризующие классы эрозионного состояния, были названы “факторами поверхности почвы” (Soil Surface Factors – SSF) и изменялись в пределах от 1 до 100 ([Clark, 1980](#); [Ypsilantis, 2011](#)). Визуальная оценка сводится к тому, что рассматриваются определенные почвенные свойства: эрозионное основание, передвижение поверхностных частиц, отложения, сила порывов ветра в баллах и др. Некоторые из этих показателей до сих пор учитываются при оценке состояния земель ([Pellant et al., 2005](#); [Ypsilantis, 2011](#)). Для оценки используется методика из соответствующих технических справочников, учитывается местоположение, в том числе и экологический район, фактические значения показателей эрозии сравниваются с референсными значениями, отличия записываются в соответствующий документ.

Преимущества и недостатки

Основные преимущества метода визуальной оценки: 1) это относительно быстрый процесс; 2) наблюдения можно сделать при полевом обследовании; 3) могут быть выявлены потенциальные эрозионные проблемы, требующие осуществления мониторинга в каком-то конкретном месте (проблемные локации).

К основным недостаткам использования метода визуальной оценки относятся: 1) субъективность, основанная на мнении и оценке эксперта; 2) количественные оценки (баллы) могут различаться у разных экспертов без соответствующей подготовки; 3) оценки могут варьировать в зависимости от времени наблюдения относительно момента, когда разыгралась буря; 4) экологический район должен быть известен, для него требуется соответствующий технический справочник с референсными значениями и методикой; 5) эта методика может быть выполнена только очень опытным, грамотным и знающим человеком.

Анализ данных

Отличия визуально оцениваемых параметров от их референсных значений фиксируются в специально предусмотренных формах. Отличия от эталонных значений определяются для каждого из этих показателей, после чего высчитывается итоговый балл и приводится характеристика стабильности рассматриваемой территории, ее гидрологическая функциональность и биологическая целостность.

Эрозионный мост (метод шпилек)

Эрозионный мост – это простой в эксплуатации, функциональный, легкий и недорогой инструмент для оценки ветровой эрозии в полевых условиях. Он состоит из алюминиевой перекладины (или строительного уровня) длиной в 4 фута (приблизительно 1.2 м), который устанавливается на опорные стойки, представляющие собой своего рода реперы для микропрофилирования поверхности почвы под ними. Эта конструкция остается в поле на весь период мониторинга ([Shakesby, 1993](#); [Ypsilantis, 2011](#)). Расстояние от уровня до поверхности почвы измеряется в 10 фиксированных точках, расположенных равномерно по всей длине каждого уровня, с помощью специальных шпилек, которые опускаются до уровня поверхности земли. Эти измерения используются для

расчета средних изменений уровня поверхности почвы (рис. 1).

Места установки эрозионных мостов и их ориентация выбираются случайно в пределах изучаемой территории ([Blaney, Warrington, 1983](#)). Каждая локация должна быть точно зафиксирована с помощью GPS так, чтобы ее можно было рассматривать как точку ввода данных. Считается, что понижение уровня почвы на 1 миллиметр соответствует выдуванию 5 тонн почвы с акра (0.405 га). Повторные измерения на каждом шпиле проводятся при каждом осмотре и регистрации данных. Эти измерения свидетельствуют об изменении уровня поверхности почвы, о выдувании верхнего слоя или, наоборот, аккумуляции ([Ypsilantis, 2011](#)).

В России подобный метод учета изменения уровня почвенной поверхности называется методом шпилек. Шпилька представляет собой тонкий металлический стержень с нанесенными на нем делениями. Шпильку погружают в почву до нулевой отметки. Изменение уровня поверхности почвы возле шпильки позволяет судить о величине наноса почвы или о величине потерь. Метод шпилек применяют и при изучении водной эрозии, и при изучении дефляции в течение длительного времени. В зимний период возможно движение шпильки в вертикальном направлении вследствие морозного пучения почвы, которое можно исключить, защитив шпильку обсадной трубой ([Кузнецов, Глазунов, 2020](#)).

Существует много методов измерения уровня почвенной поверхности как индикатора эродированности почв. Наиболее широко применяемый (в силу своей простоты и доступности) – метод микронивелирования. Он заключается в устройстве на исследуемой площадке жестко фиксированных опор, на которые по мере наступления сроков измерений устанавливают на постоянной высоте от поверхности почвы металлическую рейку, по которой свободно перемещается тележка с прикрепленной к ней мерной иглой. Мерная игла снабжена нониусом и позволяет измерять вертикальную координату точки на поверхности почвы с точностью до 0.1 мм. Горизонтальную координату определяют с точностью до 1 мм (по линейке, укрепленной на направляющей рейке). Имея два профиля поверхности почвы, полученные в одном створе в разное время, можно определить слой почвы, который утрачен вследствие эрозии за это время. Метод пригоден для работы с

почвой в состоянии близком к равновесному, при котором плотность почвы приблизилась к некоторой постоянной для данного угодья и сезона величине. В случае рыхлой почвы возможны ошибки в определении величины смыва, обусловленные усадкой почвы ([Кузнецов, Глазунов, 2020](#)).



Рис. 1. Эрозионный мост, используемый для количественной оценки интенсивности ветровой эрозии на выгоревшей территории, через 2 года после пожара, штат Айдахо (США) ([Ypsilantis, 2011](#)).

Fig. 1. Erosion bridge used for quantitative assessment of wind erosion intensity in a burned-out area, 2 years after the fire, Idaho (USA) ([Ypsilantis, 2011](#)).

Преимущества и недостатки

Преимущества эрозионного моста состоят в том, что это недорогой, быстрый, беспристрастный метод оценки эрозионной активности. Однако учетные площадки и их ориентацию необходимо выбирать случайным образом, чтобы избежать систематической ошибки.

К недостаткам можно отнести то, что уровень может быть смещен или сдвинут людьми, техникой или животными, а также в результате вспучивания грунта при промерзании, что делает измерения бессмысленными. Кроме того, шпильки довольно тонкие и в некоторой степени гибкие, поэтому если при измерении они не попадают в одну и ту же точку, то могут быть получены неточные значения. Также сама исследуемая территория и количество учетных площадок довольно малы. Этим методом практически невозможно получить данные об эродированности почв на больших территориях.

Анализ данных

Полученные измерения используются для расчета средней величины изменения уровня поверхности почвы, которую можно перевести в интенсивность эрозии, указав временной интервал, в течение которого это изменение произошло. В дальнейшем можно использовать t-критерий Стьюдента для расчета среднего значения и доверительного интервала, потом сравнивать полученные величины ([Blaney, Warrington, 1983](#); [Ypsilantis, 2011](#)).

Приблизительную оценку величины потерь почвы от дефляции можно произвести по измерению глубины залегания семян. Глубина заделки семян известна, и по разности глубин можно судить о величине потерянному слою почвы. Мощность сдутого слоя почвы можно оценить и по отдельным почвенным глыбам-останцам, которые встречаются в плохо разделанном пахотном слое (Соболев, 1948). В случае щебнистой почвы мощность сдутого слоя почвы определяется по накоплению щебня на поверхности. Для этой цели предлагается с учетных площадок размером $0.5 \times 0.5 \text{ м}^2$ собрать двухсантиметровый поверхностный слой почвы и с помощью сита с размером ячеек 2 мм отделить мелкозем от камней, а затем взвесить его (Долгилевич, 1958). После этого необходимо определить концентрацию камней в пахотном слое почвы с

помощью того же сита. Зная концентрацию камней в почве и количество камней, накопившихся на учетной площадке, можно, составив пропорцию, рассчитать количество мелкозема, вмещавшего это количество камней до начала дефляции.

Фотограмметрический метод (наземная фотограмметрия)

Ближняя фотограмметрия – отличный метод получения детальной информации об эрозии на площадках размером от 1 м² до всего склона. Программное обеспечение позволяет создавать цифровую модель земной поверхности с густотой сетки в 1–2 мм и обнаруживать изменения уровня поверхности почвы с субмиллиметровой точностью на площадках меньшего размера. Этот метод особенно эффективен для мониторинга эрозии на участках свободных от растительности, таких как дороги, строительные площадки и дороги, накатанные в диких местах внедорожной техникой. Также этот метод подходит для измерения осадка, который накапливается в специально разработанных и установленных аккумулятивных ловушках, предназначенных для мониторинга эрозии на водосборной площади.

Наземная (ближняя) фотограмметрия представляет собой компиляцию фотографических материалов с их последующей обработкой и подразумевает расстояние между камерой и объектом менее 300 м ([Matthews et al., 2014](#)). Цифровая камера требует предварительной калибровки для работы в системе координат **x**, **y** и **z**. Фотограмметрическая калибровка цифровых съемочных камер выполняется с целью определения значений элементов внутреннего ориентирования съемочных камер, включая параметры фотограмметрической дисторсии объектива съемочной камеры. В этом методе фотограмметрическая калибровка цифровых фотокамер производится по снимкам пространственного тест-объекта, где тест-объект представляет собой пространственное поле маркированных точек. Либо в процессе калибровки исследуемый участок снимается под разными углами и с перекрытием, при этом метки совмещения располагают и кодируют по кругу, а затем объект с известными параметрами (размерами) помещается в зоне обзора ([Matthews, 2008](#); [Ypsilantis, 2011](#)). Необходимо установить

одну (или более) постоянную зафиксированную точку как отметку условного уровня отсчета (своего рода репер) для мониторинга изменения уровня поверхности земли. Для больших территорий требуется большее количество точек – 3 или 4. В качестве опорной точки можно использовать выход коренной породы или вбитый достаточно глубоко в землю металлический стержень, чтобы он оставался стабильным, причем верхушка стержня должна оказаться несколько ниже поверхности земли так, чтобы его не задела и не сместили и чтобы он, в свою очередь, не представлял опасности для людей. Положение опорных точек регистрируется с помощью GPS, при их перемещении для мониторинга на других площадках используется металлоискатель и GPS приемник.

В дальнейшем с помощью компьютера и специального программного обеспечения (например, PhotoModeler® или 3DM Analyst software (ADAM Technology, Australia)) создается цифровая модель поверхности ([Matthews, 2008](#); [Ypsilantis et al., 2011](#)). С помощью отснятых фотографий для исследуемой площади программа создает мозаику, основанную на сложном автоматическом распознавании маркированных точек и схожих параметрах поверхности земли на разных фотографиях. Первичная обработка фотографий может быть выполнена в полевых условиях за несколько минут. Затем трехмерные цифровые модели поверхности анализируются в ArcGIS с использованием ArcMap и ArcScene. Чтобы выявить изменения уровня поверхности почвы первоначально смоделированная сетка поверхности сравнивается с сетками, полученными при последующих исследованиях.

Преимущества и недостатки

Преимущества данного метода состоят в следующем:

- 1) эрозионная активность может быть измерена непосредственно в поле с высоким уровнем точности быстрым и эффективным способом, при этом размер учетных площадок может существенно варьировать (площадью от 1 м² до площади всего склона);
- 2) невысокая стоимость оборудования для работы в поле;
- 3) для каждой учетной площадки получают тысячи точек ввода данных;
- 4) возможность скрыть опорные точки (стержни) ниже уров-

ня поверхности земли исключает вероятность их смещения, а также, с точки зрения безопасности, позволяет осуществлять рекреационную активность на исследуемой территории (велосипедные, пешие, конные прогулки и т. д.);

- 5) для всей исследуемой территории строятся подробные карты пространственного распространения почвенной эрозии;
- 6) сами фотографии и совокупность сопряженных данных хранится в электронном виде.

Кроме того, данный метод можно использовать для проверки эрозионных моделей.

К недостаткам можно отнести следующее:

- 1) дорогостоящее на данный момент программное обеспечение, необходимое для обработки данных на учетных площадках большого размера;
- 2) растительность может загораживать поверхность земли, тем самым затрудняя проведение измерений в этой части исследуемой территории;
- 3) в настоящий момент очень мало опытных экспертов и компетентных организаций, способных проводить такого рода мониторинг.

Еще одним недостатком метода является то, что любое перемещение подстилки, камней, других объектов по поверхности земли в процессе обработки данных может интерпретироваться программой как смыв или аккумуляция почвы. Результаты анализа в таком случае могут быть существенно искажены, если подобные точки не удалить из базы данных. Но неправильные (ошибочные) точки ввода данных могут быть удалены из базы данных в процессе обработки.

Анализ данных

ArcGIS (или любой другой пакет ГИС) используется для определения объемов насыпей и выемок в процессе земляных работ, а также выноса верхнего слоя почвы для сетки поверхности в пределах учетной площадки. Общий объем потерь или приноса почвы делится на учетную площадь, чтобы определить потери или аккумуляцию почвы на единицу площади, либо выразить их в

тоннах с единицы эродированной площади. Наземная фотограмметрия позволяет определить интенсивность потерь или аккумуляции почвы с точностью до сантиметра на больших площадях (например, для склона в целом) и с точностью до миллиметра для маленьких площадок размером 1 м².

Программное обеспечение (например, ADAM Technology 3DM), как правило, быстро и эффективно обрабатывает цифровую фотограмметрическую информацию для создания проекта. Метод наземной (ближней) фотограмметрии весьма перспективен и имеет большой потенциал для процесса прямого измерения эрозии, вызванной различными факторами и деятельностью человека.

Использование уловителей пыли

Перечисленные выше методы позволяют оценить потери почвы, т. е. последствия эрозии. Однако они неинформативны в случае изучения механизма эрозии, без понимания которого трудно управлять эрозионными процессами и тем более прогнозировать их появление. В упрощенном виде процессы ветровой эрозии представляют собой движение почвенной массы под действием воздушных потоков. Для того чтобы выявить причины движения этих масс, необходимо уметь измерять это движение – измерять поток твердой фазы (т. е. почвы) в процессе эрозии ([Кузнецов, Глазунов, 2020](#)). В настоящее время для этой цели используют всевозможные пыле- и пескоуловители, фильтры, пьезоэлектрические устройства для регистрации перемещения почвенных частиц и т. п. ([Кузнецов, Глазунов, 2020](#)). Эти устройства, будучи помещенными в поток, в какой-то степени нарушают его физические характеристики, что отражается на эффективности измерения потока твердой фазы. Чем меньше нарушается взвешенный поток в районе приемного отверстия или створа такого прибора или устройства, тем точнее измеряется поток твердой фазы ([Кузнецов, Глазунов, 2020](#)). Главная трудность при измерении потока почвенной фазы при дефляции – большая толщина потока, несущего почвенные частички: сплошной пылевой фронт во время пыльных бурь часто имеет толщину несколько сотен метров. Однако основная масса почвы переносится в слое до 1 м, что существенно упрощает задачу и открывает возможности для измерения переноса

са почвы ветром с использованием простых и доступных методов ([Кузнецов, Глазунов, 2020](#)).

Наиболее широко при изучении дефляционных процессов используют пыле- или пескоуловители, представляющие собой коробку в форме параллелепипеда, одна из граней которого служит приемным отверстием. В качестве примера рассмотрим принципы работы двух пылеуловителей, описанные в работе М.С. Кузнецова, Г.П. Глазунова ([2020](#)):

“...Коробку устанавливают на поверхности почвы так, чтобы приемная грань была перпендикулярна потоку. Для уменьшения сопротивления потоку коробку делают плоской. Так, приемная щель пескоуловителя Бэгнольда имеет высоту 110 см, ширину 1 см. Пылеуловитель крепится на вращающейся оси и снабжается флюгером, что обеспечивает оптимальное положение приемного отверстия относительно потока – плоскость приемного отверстия располагается перпендикулярно направлению ветра. Частички почвы, попавшие в створ пылеуловителя, оседают в приемный сосуд, который расположен под приемной коробкой ниже уровня поверхности почвы. Часто входную щель пылеуловителя снабжают перегородками, что позволяет отдельно учитывать перенос почвы в разных слоях. Пылеуловители указанного типа не пропускают воздушный поток сквозь себя. Это приводит к тому, что значительная доля частиц, особенно мелких, минует пылеуловитель. Поэтому пылеуловители такого типа приходится тарировать...”

“...Существует и другая разновидность пылеуловителей, у которых в тыльной части накопительной емкости имеется выходное отверстие. Запыленный поток, попадая в накопительную емкость через приемное отверстие, освобождается там от пыли и выходит очищенным через отверстие в ее тыльной части. Примером простого устройства такого рода служит стеклянная колба с резиновой пробкой, в которую вставлены две Г-образные стеклянные трубки. Колба крепится к штанге на фиксированной высоте от поверхности почвы так, чтобы конец одной из стеклянных трубок был открыт навстречу потоку. Почвенные частички, попавшие в створ отверстия этой трубки, скатываются в колбу. Скорость потока в приемном отверстии пылеуловителей такой конструкции

будет, конечно, отличаться от нуля, но она будет отличаться и от скорости в свободном потоке. Для большей эффективности пылеуловителя необходимо, чтобы, во-первых, скорость потока во входной его части была равна скорости потока в его отсутствие в данной точке и, во-вторых, поток, попавший в уловитель, полностью очищался от почвенной фазы. Таким требованиям удовлетворяют приборы с принудительным забором воздуха наподобие бытовых пылесосов. Они снабжаются датчиками для измерения скорости потока в носике заборного отверстия и в свободном потоке на такой же высоте от поверхности, на которую установлено измерительное устройство. Датчики позволяют добиваться равенства скоростей в заборном отверстии и в свободном потоке...” (Кузнецов, Глазунов, 2020).

Цезий-137

В последние десятилетия для мониторинга почвенной эрозии широко используется ^{137}Cs (Sac et al., 2008; Ypsilantis, 2011; FAO, 2017; Loughran et al., 2002; Mabit et al., 2008a; Mabit et al., 2008b; Zhidkin et al., 2020; Golosov et al., 2021). Цезий-137 – искусственный радионуклид с периодом полураспада около 30 лет. Радиоактивное загрязнение ^{137}Cs при испытаниях ядерного оружия в середине 1950-х и 1960-х годов носило глобальный характер, радионуклид выпадал из загрязненной атмосферы вместе с осадками (преимущественно ливневыми). Кроме того, выбросы ядерных предприятий и крупные аварии (в т. ч. на ЧАЭС) явились наиболее значимым источником загрязнения внешней среды. Когда ^{137}Cs попадает в почву, он сразу быстро поглощается и надежно связывается ионообменными участками почвенных частиц и преимущественно переходит в необменное состояние в большинстве сред (Ritchie et al., 2003; Ypsilantis, 2011). Физические процессы ветровой и водной эрозии – это основные факторы перемещения почвенных частиц, меченных радионуклидом ^{137}Cs , в пределах одного ландшафта или между ландшафтами (Ritchie et al., 2003; Ypsilantis, 2011). Из сказанного выше следует, что данный метод позволяет оценить перенос массы почвы в целом, однако факторы переноса могут быть любыми, поэтому для мониторинга именно ветровой эрозии метод может применяться на ограниченных территориях,

где в качестве движущей силы выступает только ветер, а остальные факторы (водная эрозия, распашка земель и др.) отсутствуют.

Почвенные образцы отбираются буром на исследуемом участке и на контрольном участке, на котором подразумевается отсутствие эрозионной активности. Буровые образцы почвы могут быть изучены послойно, чтобы выявить характер вертикального распределения ^{137}Cs по почвенному профилю. Образцы высушиваются сначала до воздушно-сухого состояния, потом в сушильном шкафу до абсолютно сухого состояния и затем просеиваются через сито с отверстиями диаметром 2 мм. Образцы из пробы помещаются в сосуды Маринелли или в маленькие пластиковые стаканчики и анализируются на гамма-спектрометре. Об аккумуляции и выносе ^{137}Cs для каждого исследуемого участка можно судить путем сравнения результатов измерений с этого участка и с контрольного участка. Оценку аккумуляции / выноса почвы для каждого исследуемого участка можно проводить с использованием различных моделей, например, модели профильного распределения ^{137}Cs , и др.

Существуют портативные установки для измерения гамма-излучения непосредственно в поле, точность таких установок уступает лабораторным, однако они отлично подходят для рекогносцировочных исследований с целью оценки общей эрозионной активности и выявления особенно проблемных зон ([FAO, 2017](#)).

Преимущества и недостатки

Основным преимуществом использования метода ^{137}Cs для мониторинга эрозии состоит в том, что он подходит для долгосрочных исследований эрозии в масштабе всего водораздела или целого ландшафта ([Ypsilantis, 2011](#); [FAO, 2017](#)). Метод также актуален при оценке ветровой эрозии на больших площадях, при этом достаточно всего одной полевой экспедиции для отбора проб, и точки отбора проб можно выбирать с любой плотностью и пространственным расположением, чтобы обеспечить необходимое пространственное разрешение готового проекта ([Sac et al., 2008](#)).

Основной недостаток метода состоит в том, что он не подходит для относительно краткосрочных исследований, например, для оценки эффективности противоэрозионных мероприятий. Бо-

лее того, стоимость выполнения лабораторных анализов при большом количестве отобранных почвенных проб может оказаться достаточно высокой. Еще один недостаток – низкие концентрации Cs^{137} в большинстве районов с проявлениями ветровой эрозии, что приводит к высокой погрешности результатов оценок эрозии почв.

Анализ данных

Важным моментом является перевод полученных данных по цезию-137 в показатели интенсивности смыва или аккумуляции почвы. Несмотря на то, что количество эродированной почвы прямо пропорционально перераспределению активности ^{137}Cs , количественное математическое выражение этого отношения сложное. Оценка аккумуляции и смыва почвы на каждом исследуемом участке может быть произведена с помощью различных моделей.

Выделяются два типа моделирования: эмпирические модели и теоретические модели.

Первый основан на калибровке активности ^{137}Cs по данным об эрозионной активности, полученным на опытных полевых участках эмпирическим путем, т. е. физическими методами. Полученные уравнения (статистические модели) в виде экспоненциальных уравнений с константами, как правило, работают только для конкретной территории и в конкретный момент времени.

Преодолеть недостатки эмпирических моделей удалось при создании теоретических (второй тип моделирования), которые основываются на логических предположениях и алгоритмах расчета интенсивности перераспределения почвы. В этом типе модели делятся на две категории: модели для целинных земель и модели для культивируемых земель. Для целинных земель разработаны модели профильного распределения (Profile Distribution Model) и модель диффузии и миграции (Diffusion and Migration Model).

Для обрабатываемых земель используются пропорциональная модель (Proportional Model), модели массового баланса (Mass Balance Model 1, Mass Balance Model 2, Mass Balance Model 3) ([Mabit et al., 2014](#); [FAO, 2017](#)).

В дальнейшем с помощью программного обеспечения можно получать трехмерные изображения поверхности земли (Digital Elevation Model) и строить карты эродированности территорий.

Моделирование ветровой эрозии

Моделирование ветровой эрозии началось еще в начале 60-х годов для полуколичественной оценки потерь почвы. Моделирование ветровой эрозии было и остается преимущественно эмпирическим методом и модели актуальны только для конкретных площадок, где и проводятся исследования, универсальной достоверной модели не существует. Эмпирические модели являются наиболее простыми и основаны на наблюдениях / экспериментальных данных, т. е. они отражают факты и помогают прогнозировать, что произойдет в будущем. У таких моделей есть ограничения и недостатки, которые заключаются в отсутствии информации о пространственном распространении эрозии, однако при использовании ГИС-технологий эти недостатки можно преодолеть. Физические модели основываются на знаниях о фундаментальных эрозионных процессах и внедрении закона сохранения вещества и энергии. В теории необходимые параметры можно измерить, но на практике значительное количество параметров требует постоянной калибровки. К ним относится большое количество различных моделей, включая Soil and Water Assessment Tool (SWAT) (<https://swat.tamu.edu/>), Erosion Model for Mediterranean regions (SEMMED) (Jonga et al., 1999), Water Erosion Prediction Project (WEPP), USLE, MUSLE, RUSLE и многие др. (Karydas et al., 2014; Pandey et al., 2016). Механизм работы моделей зачастую сложен, так же как и подготовка входных данных, это, как правило, требует вложения средств и времени, поскольку они включают данные, ограниченные мнением и компетенцией эксперта, и набором результатов полевых исследований. Эти ограничения можно преодолеть, если использовать спутниковые данные в сочетании с ГИС, которые позволяют отслеживать эрозию в динамике, контролировать изменения эрозионных процессов во времени и пространстве, что является основой при оценке, контроле и прогнозировании эрозии.

Основным примером может послужить уравнение ветровой эрозии (WEQ – The Wind Erosion Equation) (Woodruff, Siddoway, 1965; Shrestha, 2008). Оно было апробировано в разных местах, и в работах Klik (2008) сообщается о том, что в сочетании с ГИС это уравнение дает вполне адекватные результаты при выявлении об-

ластей (территорий) с риском возникновения ветровой эрозии.

Уравнение ветровой эрозии (WEQ), позволяет прогнозировать потери почвы в зависимости от ряда факторов:

$$Q = f(E, I, K, C, L, V),$$

где Q – возможные потери почвы от ветровой эрозии за год с единицы поверхности;

E – дефлируемость почв, зависящая от ее комковатости (A) и наличия почвенной корки, учитываемой коэффициентом F_s ;

I – уклон;

K – коэффициент бороздковой шероховатости;

C – климатический индекс ветровой эрозии почв, зависящий от средней скорости ветра V_z и влажности почвы W ;

L – длина незащищенной части поля в направлении ветра;

V – почвозащитный эквивалент растительного покрова и пожнивных остатков:

$$V = RSK_0,$$

где R – масса растительного покрова или пожнивных остатков на единице площади;

S – коэффициент, учитывающий суммарную поверхность элементов растений;

K_0 – коэффициент, учитывающий пространственное размещение растений.

С развитием компьютерных технологий начали строить ГИС-модели развития эрозионных процессов. Например, уравнение ветровой эрозии (WEQ) широко используется для оценки ветровой эрозии в Монголии ([Mandakh et al., 2016](#)) в среде ArcGIS, модель включает метеорологические данные, значения стандартизованных индексов различий растительного покрова (NDVI), полученных с помощью MODIS, цифровую модель рельефа и почвенную карту Монголии. В США проводились исследования по моделированию ветровой эрозии не только в полевом масштабе, но и на региональном уровне. Для этого использовалось модифицированное уравнение – Revised Wind Erosion Equation (RWEQ),

ГИС и изображения Landsat ([Zobeck et al., 2000](#)). ГИС-модели процессов ветровой эрозии разработаны в рамках проектов WEELS, Wind Erosion Prediction System (WEPS) и GIS-RWEQ ([Borrelli et al., 2017](#)), спонсируемых рядом европейских стран – European Soil Data Centre (ESDAC).

Модель WEELS обеспечивает прогноз развития эрозии на трех масштабных уровнях ([Thiermann et al., 2002](#)). На региональном уровне она позволяет идентифицировать проблемные территории, по которым необходимо более детальное рассмотрение. Следующий уровень – определение риска ветровой эрозии на уровне конкретного участка на основе таких исходных параметров как характеристика верхнего слоя почвы, протяженность поля, преобладающие направления ветра и наличие ветровых барьеров. Третий уровень, для которого требуются наиболее подробные данные, обеспечивает моделирование воздействия ветровой эрозии на 30-летний период и составление прогнозов, базирующихся на сценариях возможного изменения климата и различных вариантах землепользования. Описанная процедура выделения проблемных участков и полей с потенциальным риском эрозии обеспечивает поиск “горячих точек” ветровой эрозии на региональном уровне. Необходимые для этого исходные данные доступны в большинстве государств Европы. Для более детальных исследований на уровне конкретных полей необходимо иметь соответствующие данные о верхнем слое почв, данные о форме поля и ветровых барьерах. Во многих европейских странах эти данные с разной степенью полноты могут быть получены на основе существующих цифровых наборов данных. Если таких данных нет, то необходимо проводить полевые исследования, а их результаты перевести в цифровой вид.

Подход, ориентированный на выделение районов с потенциальным риском ветровой эрозии на разных территориальных уровнях, позволяет сфокусировать внимание и финансовые средства на самых уязвимых участках. В дальнейшем по выявленным “проблемным” полям оправдано проведение детального моделирования и создание прогноза реального риска ветровой эрозии ([Thiermann et al., 2002](#)).

Подверженность почвы эрозии зависит от многих факторов,

эти зависимости далеко не линейные и не могут быть с достаточной точностью описаны с использованием классических статистических подходов. С течением времени модели претерпевают изменения и совершенствуются. Например, для прогнозирования ветровой эрозии используют комбинированный способ – сочетание генетического алгоритма и искусственной нейронной сети (hybrid Genetic algorithm – Artificial neural network method GA-ANN method) ([Kouchami-Sardoo et al., 2020](#)). Такие факторы как количество гравия на поверхности почвы, почвенная корка, очень мелкий и очень крупный песок, устойчивость агрегатов, эквивалент карбоната кальция были выявлены в ходе генетического анализа и введены в модель как наиболее значимые параметры, влияющие на подверженность почвы ветровой эрозии (в условиях Ирана). Далее была разработана нейронная сеть, позволяющая прогнозировать эрозионные изменения в ответ на пространственную вариабельность выбранных факторов, перечисленных выше.

СПУТНИКОВЫЙ МОНИТОРИНГ

Данные дистанционного зондирования (аэро- и космические снимки) широко используют при картографировании и мониторинге эрозии почв ([Андроников, 1979](#); [Morgan, 2005](#); [Vrieling, 2006](#); [Vrieling et al., 2007](#); [Alewell et al., 2008](#); [Kosmadakis et al., 2015](#)). Особенно активно в последнее время применяют спутниковые данные, которые позволяют изучать и картографировать эрозию почв на больших пространствах путем непосредственного дешифрирования ареалов эродированных почв ([Vrieling et al., 2008](#)), последствий эрозии и дают возможность оценивать и моделировать риск эрозии почв ([Siakeu, Oguchi, 2000](#); [Jain et al., 2002](#); [Gitas et al., 2009](#)). Использование спутниковых данных отличается меньшей вовлеченностью экспертного мнения, меньшими затратами труда и времени, эти данные могут служить основой как для эмпирических, так и для физических моделей при оценке степени эродированности.

В ряде работ показано, что спутниковые данные можно использовать для картирования ветровой эрозии, детектирования областей, затронутых ветровой эрозией и регистрирования времени, которое уходит на восстановление участков, затронутых вет-

ровой эрозией. Так, например, Collado и другие ([2002](#)) применили подход динамического или мультитременного сравнения для картирования территорий в процессе опустынивания в Аргентине, используя изображения Landsat TM за разные сроки съемки. Для мониторинга процесса опустынивания в провинции San Luis, где в последние десятилетия наблюдаются признаки серьезной деградации ландшафта, использовался анализ цифровых изображений дистанционного зондирования. Сравнивались два изображения Landsat (за 1982 и 1992 годы) с целью оценить потенциальную возможность применения анализа данных дистанционного зондирования для мониторинга процесса опустынивания. После геометрических и радиометрических корректировок использовалось мультитременное сравнение для выявления участков с наибольшей степенью деградации. Спектральное разложение упрощает анализ участков с неоднородным покровом, разница между “разложенными” изображениями песка или воды позволяет определить передвижение дюн, тренды восстановления растительного покрова, изменения водных объектов в результате изменившихся осадков и особенностей землепользования ([Collado et al., 2002](#)).

Дистанционное зондирование используется при изучении эрозии в целях получения исходных данных для эрозионных моделей, для косвенной оценки почвенной эрозии путем анализа растительного покрова, а также для непосредственного определения эрозионных форм рельефа и стадий эрозии. Основной принцип идентификации эродированных и аккумулярованных почв основан на предположении, что спектральные характеристики отражения аккумулярованных и неэродированных “здоровых” почв отличаются. Эти различия объясняются изменениями химических и физических свойств верхнего слоя почвы, спровоцированных переносом почвенных частиц и их аккумуляцией ([Žižala et al., 2019](#)).

Таким образом, свойства почвы, измененные эрозионными процессами, которые находят спектральный отклик в общей спектральной характеристике почвы, в то же время можно использовать как спектральные индикаторы почвенной эрозии. Это свойства, которые претерпели изменения либо вследствие избирательного отчуждения или перемещения легких поверхностных частиц,

например, содержание органического вещества и гранулометрический состав почвы ([Schmid et al., 2016](#); [Žižala et al., 2019](#)), либо вследствие смыва верхнего плодородного слоя почвы или его перемешивания с подстилающими горизонтами, такие как содержание карбонатов, оксидов железа и грубого материала ([Žižala et al., 2019](#)). Возможность и точность выявления эродированных почв с использованием спектральных изображений в значительной степени зависит от интенсивности эрозионных процессов, с одной стороны, и от соответствующих изменений спектральных характеристик нарушенных почв – с другой.

Методы дистанционного зондирования, традиционно используемые для обнаружения эродированных земель, обычно включают визуальную интерпретацию изображений на основании интерпретации цвета почвы и его изменения, вызванного эрозионными процессами ([Sepuru, Dube, 2018](#); [Žižala et al., 2019](#)).

В последние годы качество спутниковых данных и использование дистанционного зондирования, включая предварительную (первичную) компьютерную обработку изображений, и развитие методов автоматической классификации позволило анализировать большие территории с меньшими затратами времени, а также с количественной оценкой точности этих классификаций. Быстро внедряются методы классификации, основанные на попиксельном спектральном анализе. Однако их применение может быть проблематичным в тех случаях, когда наблюдается существенная спектральная вариабельность в пределах одного класса или комплексный эффект от различных поверхностей, особенно в условиях высокой неоднородности почвенного покрова. В литературе отмечается необходимость в дополнительной вспомогательной информации для точной классификации типов проявления эрозии, а также в комбинированном подходе к автоматической классификации и визуальной интерпретации. Использование непостоянной (нечеткой) классификации, анализа смешанного спектра (субпиксельного анализа) или объективно-ориентированной классификации (“пространственно-контекстуальной” классификации изображений) может быть полезным при решении вышеупомянутых проблем, связанных с методами, основанными на минимальных элементах изображения (пикселях). Вместе с тем использование

данных с более высоким разрешением в спектральной области (гиперспектральные данные) весьма перспективно в повышении точности классификации эродированных почв ([Schmid et al., 2016](#); [Žižala et al., 2017](#)). Дальнейшее развитие и более широкое применение этого метода ожидается с использованием данных гиперспектральных сенсоров, таких как EnMAP (Германия), PRISMA (Италия), HISUI (Япония), SHALOM (Израиль, Италия) или Tian-Gong-1 (Китай) (Demattê et al., 2015). На настоящий момент для исследования почвенной эрозии наиболее часто используются многоспектральные данные серии Landsat и SPOT или данные высокого разрешения, получаемые с помощью IKONOS и QuickBird ([Sepuru, Dube, 2018](#)). Сравнительно недавно запущенные спутники Landsat-8 и Sentinel-2 с улучшенными радиометрическими и пространственными характеристиками предоставляют в свободном доступе многовременные данные, подходящие для построения карт эрозионных процессов. В настоящий момент требуется верификация возможности их применения.

Несмотря на прогресс методов цифрового анализа изображений и разработку новых спутниковых сенсоров, до сих пор существуют пробелы в знаниях, ограничивающие применение этих методов для оценки эродированных почв.

Можно выделить несколько основных ограничений:

- 1) Оценка больших территорий с полями, которые отличаются вариабельностью почвенных условий (почвенная влага, неровности поверхности почвы, почвы, покрытые растительностью, опад, пыль, почвенная корка). Для уменьшения этих эффектов необходимо использовать соответствующие методы и многовременной подход. До настоящего момента большинство исследований было сконцентрировано на оценке эрозии в местных масштабах, в то время как требуется существенный прогресс научных изысканий на региональном уровне и в глобальном масштабе.
- 2) Необходимость точных атмосферных поправок и маскирования облаков и их тени.
- 3) Различия в состоянии окружающей среды, особенно неоднородность структуры почвенного покрова (присутствие

различных типов почв и материнской породы, антропогенные нарушения) (Zádorová et al., 2018; Žižala et al., 2019).

- 4) Специфика, связанная с процессами смыва / накопления. Эрозия и переотложение почвенного материала может приводить к сходным показателям поверхностных почвенных свойств, присущих как смытым, так и аккумулярованным почвам.
- 5) Недостаток спутниковых данных за предыдущие годы и связанные с этим трудности определения исходной мощности плодородного слоя почвы, почвенных свойств и влияния эрозионных процессов даже на местном уровне.

В качестве примера подобных исследований можно привести данные, опубликованные в 2019 г., по материалам изучения эрозионной деградации сельскохозяйственных угодий в юго-восточной Моравии (Чешская Республика). Цель исследований состояла в оценке возможного совместного использования а) временных рядов оптических мультиспектральных изображений, полученных с недавно запущенных спутников Sentinel-2, б) временных рядов ортографических изображений, получаемых с воздуха, а также в) результатов полевых изысканий для выявления пространственного распространения эрозии и разграничения почв, подвергшихся воздействию эрозии, на региональном уровне. В исследовании используется подход, основанный на многовременной классификации спутниковых данных, для оценки пространственного распространения эрозионно-деградированных почв на существенно большей пространственной протяженности, чем в предыдущих исследованиях. В перспективе на основании данного подхода предполагается разработать методику, подходящую для регулярного мониторинга деградации почв на больших площадях.

Исследование показало, что анализ спутниковых данных позволяет точно различать незеродированные и сильно эродированные почвы. Однако применение метода для более детальной классификации различных стадий эрозии, включая переходные (например, умеренно эродированные почвы) не показало удовлетворительных результатов. Общий уровень точности при автоматической независимой классификации достигает 55.2% для выяв-

ления эродированных (сильная и умеренная) и неэродированных почв, и 80.9% – для различения только одного эродированного класса. После визуального уточнения, основанного на ортографических изображениях, точность классификации возросла до 86.9%. Несмотря на высокую точность, остается много ограничений при использовании данного метода. Многие из этих ограничений и пробелов были обнаружены в автоматической классификации. Некоторые проблемы связаны с вариабельностью почвенного покрова, эффектами маскирования различных объектов (облаков, вегетации, подстилки), а также спектральная различимость отдельных классов. Применение данного метода ограничивается почвенной и геологической гомогенностью исследуемых участков. С помощью представленного подхода в перспективе можно будет получать ценную и точную информацию об эрозионной деградации почв. Однако требуется дальнейшая доработка и улучшение метода.

В более ранних исследованиях (Shrestha, 2008) для мониторинга ветровой эрозии приводится пример использования дистанционного зондирования и подход, описанный в Глобальной оценке деградации структуры почв (GLASOD) (<https://www.isric.org/projects/global-assessment-human-induced-soil-degradation-glasod>).

Интерпретация спутниковых снимков производилась моноскопически по комбинированным цветовым изображениям соответствующего масштаба. Для создания комбинаций ложных цветовых изображений обычно используются сочетания каналов: Landsat TM канал 4 (красный), TM канал 5 (зеленый) и TM канал 3 (синий). В случае изображений, полученных с помощью ASTER и SPOT, идеальным сочетанием было: канал 3 (красный), канал 2 (зеленый) и канал 1 (синий). После получения цветового изображения оно использовалось для оценки и мониторинга деградации почвенного покрова, следуя рекомендациям GLASOD (<https://www.isric.org/projects/global-assessment-human-induced-soil-degradation-glasod>).

Если стереопара спутниковых изображений доступна (например, стереопара ASTER или SPOT), интерпретацию данных можно проводить с помощью стереоскопа или непосредственно на

компьютере. Стереопара также может быть сгенерирована при наличии цифровых моделей рельефа (ЦМР) или контурных данных местности. Для получения стереоскопического снимка участка из спутникового снимка, ЦМР и ГИС-системы, например, можно воспользоваться программным обеспечением ILWIS (<https://www.itc.nl/ilwis/>). Но подобные подходы возможно использовать лишь при очень больших масштабах эрозионных процессов.

Преимущества и недостатки

Спутниковый мониторинг ветровой эрозии почв – это относительно экономичный, быстрый и беспристрастный способ получения информации о поверхности на больших территориях, в том числе и в труднодоступных местах. По сравнению с наземными методами для осуществления спутникового мониторинга требуется меньшее количество людей, кроме того, спутниковые изображения содержат большое количество дополнительных сведений. При использовании спутниковых изображений снимки одной и той же территории могут быть получены через определенные интервалы времени, таким образом позволяя отслеживать динамику изменений наблюдаемых процессов. Более того, цифровые изображения постоянно доступны для дополнительного анализа с применением различных техник и для оценки различных параметров и характеристик. Спутниковые данные имеют большой потенциал для своевременной, экономичной и надежной оценки почвенной эрозии на больших пространствах, а также в зонах, где проведение полевых исследований невозможно или затруднено.

Использование спутниковых изображений существенно расширило возможность количественно оценивать и проводить мониторинг эрозии почв на локальном, национальном и региональном уровнях. По сути это единственный метод картирования почвенной эрозии, поскольку он позволяет исследовать большие территории, а также учитывать размеры эрозионных явлений ([Sepuru, Dube, 2018](#)).

Недостаток состоит в том, что мультиспектральные данные представляют собой замещающие данные, т. е. они представлены в виде пространственных отношений и зависимостей или спектральных характеристик определенных свойств, а не в виде пря-

мых измерений показателей эродированности почв. Следовательно, необходимо проводить проверку полученной информации на местности (верификацию, калибровку). Ограничивающим фактором также является низкое спектральное разрешение сенсоров. Спутниковые изображения позволяют определять только поверхностные свойства почвы, если этому не препятствует растительный покров ([Sepuru, Dube, 2018](#)).

Анализ данных

Анализ “сырых” спутниковых данных – это очень трудоемкий процесс, если его не автоматизировать. К счастью, достижения последних лет в области автоматизации обработки спутниковых изображений позволяют существенно сократить затраты труда и времени.

ПЕРСПЕКТИВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЯ МЕТОДОВ МОНИТОРИНГА ВЕТРОВОЙ ЭРОЗИИ ПОЧВ

USGS разработала простой метод оценки ветровой эрозии, используя цифровые данные многоспектральных спутниковых наблюдений (<http://terraweb.wr.usgs.gov/projects/RSDust/>). Эта простая модель позволяет создавать изображения, выделяющие области с низкой плотностью растительности и почвы с высоким коэффициентом отражения. Обычно она автоматически выделяет два важных параметра ветровой эрозии, а именно: объем растительного покрова / плотности и общий тип поверхности почвы. Используя этот алгоритм, можно создать изображения, которые показывают те области, где эти два состояния наблюдаются одновременно. В этой карте изображений подверженности эоловой эрозии первого порядка различные оттенки цвета указывают на различные уровни плотности растительности и высокий коэффициент отражения почвы и служат руководством для относительного уровня потенциала / подверженности эрозии ветру, а также могут использоваться для получения величины индекса картирования эоловой эрозии (EMI) в каждом пикселе.

На ветровую эрозию и выбросы пыли оказывают воздействие климатические, почвенные свойства и особенности растительного покрова, который во многом определяет потенциал территории и ее экологическое состояние и стабильность ([Webb et al.,](#)

[2017](#)). Экологическое состояние может характеризоваться структурой растительного покрова (например, такими соотношениями как территория, покрытая растительностью, и открытые почвенные пространства; распределение открытых участков между растениями и высота растительного покрова), определяемого различными растительными сообществами. Структура растительного покрова существенно влияет на эоловый процесс, например, распределение открытых пространств между растениями, в которых наблюдается нелинейное увеличение ветровой эрозии. На основании этих утверждений разработана модель, отражающая элементы поверхности, не подверженные эрозии, в которой используются размеры и распределение открытых пространств между растениями (участки, подверженные действию эрозионных сил) для получения соотношения между максимальной силой сдвига и средней силой сдвига частиц на изучаемой поверхности ([Okin et al., 2006](#)).

Chappell и Webb предлагают усовершенствовать моделирование, картографирование и мониторинг ветровой эрозии, используя данные об альбедо поверхности. В работе ([Chappell, Webb, 2016](#)) установлено отношение между закрытыми участками и долей затененных участков рассматриваемой территории, показаны прямые взаимосвязи между измерениями затененных участков и данными аэродинамической трубы, таким образом обеспечивая непосредственную калибровку ключевых аэродинамических свойств. Оценка аэродинамических свойств по альбедо позволяет проводить оценку ветровой эрозии на различных территориях и на всех платформах: от полевых исследований до данных, полученных с воздуха, или спутниковых данных открытого доступа. Этот подход демонстрирует перегруженность и сложность существующих моделей и предлагает использовать более простую, но в то же время более точную модель. С помощью этой модели оценивался временной характер прогнозируемого горизонтального массового потока в различных точках Австралии, в результате были обнаружены вариации среди различных типов растительного покрова, которые не удалось бы обнаружить, используя традиционные модели. Новый подход открывает новые возможности в исследовании динамики ветровой эрозии во времени и пространстве, а также позволяет пролить свет на эоловые процессы в различных

масштабах (Chappell, Webb, 2016).

В США регулярно различные службы определяют содержание в воздухе аэрозолей и твердых частиц преимущественно для оценки качества воздуха и прогнозирования содержания пыли, причем не только в городах, но и в национальных парках и на других диких территориях (такие сервисы как IMPROVE (<https://airquality.ucdavis.edu/improve>)). Однако подобные сервисы государственного масштаба не позволяют установить связь между показателями качества воздуха и стратегией принятия решений в регионах с развитой эрозией. Существующие агентства AERONET (<https://aeronet.gsfc.nasa.gov/>) и EPA (<https://cfpub.epa.gov/ncer/abstracts/index.cfm/fuseaction/display.abstractDetail/abstract/887>) собирают и предоставляют информацию для различных моделей прогнозирования образования и перемещения пыли. Эти модели актуальны при оценке запыленности воздуха с точки зрения угрозы здоровью или ограничения транспортной нагрузки, однако эти модели помимо всего прочего ограничены довольно грубым пространственным разрешением (N 1–100 км) и малой чувствительностью по отношению к изменениям почвенных и растительных условий (Webb et al., 2017). Однако существуют возможности по улучшению качества мониторинга и оценки ветровой эрозии, основанные на совместном использовании различных подходов, моделей, массивов данных, методов дистанционного зондирования и т. д. Во-первых, необходимы усовершенствованные модели, которые отражают взаимодействия между характером использования земель, типом почвы, растительностью и ветровой эрозией. Во-вторых, эти модели необходимо опробовать в различных условиях (в разных ландшафтах и при различном хозяйственном использовании). По этой причине продолжительные многолетние стандартизованные измерения (метеорологические наблюдения, спутниковые данные, данные ветровых туннелей и пылеуловителей и т. д.) ветровой эрозии, пылевых выбросов и влияющих на них факторов также необходимы для уточнения и усовершенствования этих моделей. В-третьих, для достижения успеха все эти действия должны быть хорошо скоординированы и дополнять друг друга, что выражается, например, в открытом доступе к информации среди участников

такого рода коллаборации. Примером подобного проекта может служить созданная в 2014 г. в США National Wind Erosion Research Network, цель которой состоит в компиляции и анализе необходимых данных для прогнозирования и оценки ветровой эрозии, понимания основных процессов ветровой эрозии в различных масштабах и на различных уровнях, а также в формировании рекомендаций по принятию каких-либо хозяйственных решений при различных рисках ветровой эрозии ([Webb et al., 2017](#)).

Однако в подавляющем большинстве случаев речь идет о дешифрировании ветровой эрозии в пустынных и полупустынных зонах. Исследований возможности спутникового мониторинга ветровой эрозии почв на пахотных полях практически нет. Также как практически отсутствуют исследования о переносе химических веществ с микрочастицами в результате ветровой эрозии.

В последние годы появились глобальные продукты детектирования пылевых выбросов по спутниковым данным (например: <https://gmao.gsfc.nasa.gov/reanalysis/MERRA-2/>). MERRA-2 – первый глобальный продукт повторяющегося анализа, помимо стандартного метеорологического анализа ассимилирующий спутниковые наблюдения за взвешенными частицами в атмосфере и представляющий сведения об их взаимосвязи с другими физическими процессами, которые рассматриваются в рамках климатических исследований. Они позволяют получать данные о содержании пыли в атмосфере с периодичностью в несколько часов (3 часа) ([Gelaro et al., 2017](#)). Модель GOCART в сочетании с атмосферной моделью GEOS позволяет проследить жизненный цикл 5 видов взвешенных частиц, перемешанных во внешней среде: пыли, морской соли, сажистого углерода, органического углерода и сульфата. Региональные аспекты глобального распространения взвешенных частиц были исследованы с помощью MERRA-2 для основных территорий, продуцирующих тот или иной вид аэрозолей. Выяснилось, что сезонные колебания пыли и сжигания биомассы (углеродсодержащей) наблюдаются во всех регионах. Существенное увеличение сульфатов отмечается в регионах, где имело место извержение вулканов. В Азиатском регионе высокое содержание углерода зафиксировано в Сибири после пожаров 2003 г. В северной Африке доминирует пыль, и периоды интен-

сивного транспорта пыли (как, например, в 2010 г.) также фиксируются. Эта информация потенциально может являться хорошим источником данных о ветровой эрозии пахотных почв, но исследований возможности ее использования в целях мониторинга ветровой эрозии почв до сих пор не проводилось.

ВЫВОДЫ

Каждый из рассмотренных методов оценки и мониторинга ветровой эрозии имеет как преимущества, так и недостатки, поэтому при выборе метода необходимо учитывать условия проведения мониторинга, площадь рассматриваемой территории и масштаб проведения исследований, временные рамки, финансовые и трудовые ресурсы.

Метод визуальной оценки не является прямым измерением ветровой эрозии, он основывается на определении косвенных показателей, которые при комплексном рассмотрении специалиста позволяют отнести территорию к тому или иному эрозионному классу. Применим на различных уровнях: локальном, региональном и национальном ([Ypsilantis, 2011](#)). Метод недорогой и быстрый, точность и адекватность оценки зависит от уровня подготовки специалиста, заключения разных экспертов могут отличаться. В целом метод дает общую оценку состояния (“здоровья”) и эродированности земель как в краткосрочном периоде, так и в долгосрочной перспективе. Однако при расширении территории исследований метод становится слишком трудоемким.

Эрозионный мост или метод шпилек представляет собой прямое измерение эрозионной активности, недорогой и быстрый ([Ypsilantis, 2011](#)), достаточно точный, если не было смещения шпилек, но трудоемкий; надежность результатов зависит от количества образцов. Применение возможно только на местном уровне (локально), метод эффективен и часто применяется на территориях после пожаров. Кроме того, метод неприемлем на сельхозугодьях, поскольку конструкции мостов создают препятствия для работы сельхозтехники, либо могут быть просто смещены, в этом случае результаты становятся недействительными.

Ближняя фотограмметрия также представляет собой прямое измерение, применение ограничивается локальным уровнем, не

подходит для мониторинга обширных территорий. Метод очень точный, надежный и быстрый, однако для анализа данных требуется дорогостоящее программное обеспечение, а также точные предварительные настройки и калибровка камеры. Характеризуется высокой эффективностью, часто применяется для мониторинга эрозии на выгоревших угодьях и при долгосрочных наблюдениях. Этот метод наиболее перспективен среди методов, основанных на учете изменения уровня почвенной поверхности. К преимуществам метода относится также простота получения фотографий изучаемой поверхности. К недостаткам – высокая стоимость и сложность оборудования для извлечения из этих фотографий требуемой информации.

Метод радиоактивного цезия точный, надежный и быстрый, применяется для мониторинга эрозии на локальном и региональном уровне. Из минусов можно отметить дорогостоящие лабораторные анализы и исследования особенно при большом количестве отобранных проб. Применяется преимущественно для долгосрочного мониторинга эрозионных процессов (40 лет и более). Подходит для мониторинга ветровой эрозии только в том случае, если другие факторы переноса почвенных частиц (водная эрозия, агротехнические обработки и прочее) отсутствуют.

Спутниковый мониторинг основывается на измерении косвенных параметров, применим как на локальном, так и на региональном и глобальном уровнях, быстрый и недорогой метод, достаточно надежный и точный. Метод спутникового мониторинга позволяет отслеживать состояние и тенденции развития эрозии, отражает подверженность земель эрозионной деградации.

Таким образом, наиболее актуальными, экономически оправданными и перспективными, особенно на больших территориях, являются методы дистанционного зондирования, позволяющие проводить мониторинг в различных масштабах, не только оценивать эрозионную активность, но и прогнозировать ее, таким образом обеспечивая заинтересованные стороны необходимой информацией для принятия верных, оперативных и своевременных хозяйственно-экономических решений, направленных как на борьбу с ветровой эрозией и устранение последствий, так и на организацию превентивных мер. Для повышения эффективности

этих методов также необходимо создавать базы данных, расширять и накапливать почвенную информацию, которая позволяет верифицировать, уточнять, обрабатывать и калибровать полученные спутниковые данные.

Для понимания эоловых процессов и механизмов переноса пылевых частиц необходимо развивать комплексные методы, включающие данные дистанционного зондирования, метеорологические сведения, на основании которых необходимо разрабатывать усовершенствованные модели, строить карты и прогнозировать эрозионные процессы.

В литературе в подавляющем большинстве случаев речь идет о дешифрировании ветровой эрозии в пустынных и полупустынных зонах. Исследований о возможности применения спутникового мониторинга ветровой эрозии почв на пахотных полях практически нет. Также как практически отсутствуют исследования о переносе химических веществ с микрочастицами в результате ветровой эрозии.

Как в России, так и за рубежом предпринимаются попытки моделирования эрозии почв, но качество моделей сильно ограничено недостатком полевых данных, необходимых для их калибровки и верификации, в особенности по отношению к ветровой эрозии.

Выявление эродированных почв в стране до сих пор осуществляется наземными методами. Однако полевые исследования могут проводиться только на ограниченной территории, на немногих ключевых участках и их проведение фактически невозможно на активно используемых сельскохозяйственных землях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Андроников В.Л. Аэрокосмические методы изучения почв. М.: Колос, 1979. 280 с.
2. Гендугов В.М., Глазунов Г.П. Ветровая эрозия почвы и запыление воздуха. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2007. 240 с.
3. Долгилевич М.И. К методике измерения глубины выдувания почв // Почвоведение. 1958. № 8. С. 124–126.
4. Иванов А.Л., Кирюшин В.И., Молчанов Э.Н., Савин И.Ю., Столбовой В.С. Анализ земельной реформы и агропромышленного производства за

четверть века. Почвенно-экологические, технологические институциональные и инфраструктурные аспекты модернизации. Земельная служба (доклад). М.: Почвенный институт им. В.В. Докучаева, 2016. 93 с.

5. Кузнецов М.С., Глазунов Г.П. Эрозия и охрана почв. М.: Издательство МГУ, 2020. 387 с.

6. Ларионов Г.А. Эрозия и дефляция почв. М., 1993. 200 с.

7. Научные основы предотвращения деградации почв (земель) сельскохозяйственных угодий России и формирования систем воспроизводства их плодородия в адаптивно-ландшафтном земледелии (гл. ред. А.Л. Иванов). М.: Почвенный институт им. В.В. Докучаева, 2013. 756 с.

8. Семенов О.Е. Методика векторных расчетов ветрового переноса песка и солей во время песчано-солевых бурь. Агрометеорология. Л., 1988. С. 209–224.

9. Трегубов П.С., Дизенгоф Е.Г., Захарова Н.Н. Противоэрозионная и противодефляционная стойкость почв и пути ее повышения (обзорная информация). ВНИИТЭИСХ, 1980. 61 с.

10. Alewell C., Meusburger K., Brodbeck M., Banninger D. Methods to describe and predict soil erosion in mountain regions // Landsc. Urban Plan. 2008. Vol. 88. P. 46–53.

11. Blaney D.G., Warrington G.E. Estimating soil erosion using an erosion bridge. WSDG-TP-00008 Report. USDA Forest Service. Watershed Development Group. Fort Collins, 1983.

12. Borrelli P., Lugato E., Montanarella L., Panagos P. A New Assessment of Soil Loss Due to Wind Erosion in European Agricultural Soils Using a Quantitative Spatially Distributed Modelling Approach // Land Degradation & Development. 2017. Vol. 28. P. 335–344. DOI: [10.1002/ldr.2588](https://doi.org/10.1002/ldr.2588).

13. Chappell A., Webb N.P. Using albedo to reform wind erosion modelling, mapping and monitoring // Aeolian Research. 2016. Vol. 23. P. 63–78. DOI: [10.1016/j.aeolia.2016.09.006](https://doi.org/10.1016/j.aeolia.2016.09.006).

14. Clark R.D. Erosion condition classification system. Tech Note 346. Bureau of Land Management. Denver, Denver Service Center, 1980.

15. Collado A.D., Chuvieco E., Camarasa A. Satellite remote sensing analysis to monitor desertification processes in the crop-rangeland boundary of Argentina // Journal of Arid Environments. 2002. Vol. 52. Iss. 1. P. 121–133. DOI: [10.1006/jare.2001.0980](https://doi.org/10.1006/jare.2001.0980).

16. Corwin D.L., Hopmans J., Rooij G.H. From field- to landscape-scale vadose zone processes: Scale issues, modeling, and monitoring // Vadose Zone Journal. 2006. Vol. 5. No. 1. P. 129–139.

17. Duniway M.C., Pfennigwerth A.A., Fick S.E., Nauman T.W., Belnap J., Barger N.N. Wind erosion and dust from US drylands: a review of causes, consequences, and solutions in a changing world // *Ecosphere*. 2019. Vol. 10. Iss. 3. e02650. DOI: [10.1002/ecs2.2650](https://doi.org/10.1002/ecs2.2650).
18. Fulajtar E., Mabit L., Renschler C.S., Lee Zhi Yi A. Use of ¹³⁷Cs for soil erosion assessment. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Rome, 2017. 64 p.
19. Gelaro R. et al. The Modern-Era Retrospective Analysis for Research and Applications, Version 2 (MERRA-2) // *Journal of Climate*. 2017. Vol. 30. Iss. 14. P. 5419–5454. DOI: [10.1175/JCLI-D-16-0758.1](https://doi.org/10.1175/JCLI-D-16-0758.1).
20. Gitas I.Z., Douros K., Minakou C., Sillescu G.N., Karydas C.G. Multi-temporal soil erosion risk assessment in N. Chalkidiki using a modified USLE raster model // *EARSeL eProceedings*. 2009. Vol. 8. No. 1. P. 40–52.
21. Golosov V.N., Collins A.L., Dobrovolskaya N.G., Bazhenova O.I., Ryzhov Yu.V., Sidorchuk A.Yu. Soil loss on the arable lands of the forest-steppe and steppe zones of European Russia and Siberia during the period of intensive agriculture // *Geoderma*. 2021. Vol. 381. 114678. DOI: [10.1016/j.geoderma.2020.114678](https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2020.114678).
22. Hagen L.J. A wind erosion prediction system to meet user needs // *Journal of soil and water conservation*. 1991. Vol. 46. No. 2. P. 106–111.
23. Jain S.K., Singh P., Seth S.M. Assessment of sedimentation in Bhakra Reservoir in the western Himalayan region using remotely sensed data // *Hydrol. Sci. J.* 2002. Vol. 47. No. 2. P. 203–212.
24. Jonga S.M., Paracchini M.L., Bertolo F., Folving S., Megier J., Roo A.P.J. Regional assessment of soil erosion using the distributed model SEMMED and remotely sensed data // *Catena*. 1999. Vol. 37. Iss. 3–4. P. 291–308.
25. Karydas C.G., Panagos P., Gitas I.Z. A classification of water erosion models according to their geospatial characteristics // *International Journal of Digital Earth*. 2012. Vol. 7. P. 229–250. DOI: [10.1080/17538947.2012.671380](https://doi.org/10.1080/17538947.2012.671380).
26. Klik A. Wind Erosion Assessment in Austria Using Wind Erosion Equation and GIS. Vienna: BOKU – University of Natural Resources and Applied Life Sciences, 2004. URL: https://www.researchgate.net/publication/228798188_Wind_erosion_assessment_in_Austria_using_wind_erosion_equation_and_GIS.
27. Kouchami-Sardoo I., Shirani H., Esfandiarpour-Boroujeni I., Besalatpour A.A., Hajabbasi M.A. Prediction of soil wind erodibility using a hybrid Genetic algorithm – Artificial neural network method // *Catena*. 2020. Vol. 187. 104315. DOI: [10.1016/j.catena.2019.104315](https://doi.org/10.1016/j.catena.2019.104315).
28. Kosmadakis I., Tsardaklis P., Ioannou K., Zaimis G. A novel fully automated soil erosion monitoring system // *Food and Environment. Proc. of*

the 17th Intern. Conf. on Information and Communication Technologies in Agriculture. 2015. P. 80–84.

29. *Leys J., McTainsh G., Shao Y.* Wind Erosion Monitoring and Modeling Techniques in Australia. In: *Sustaining the Global Farm*. 2001. P. 940–950.

30. *Loughran R.J., Pennock D.J., Walling D.E.* Spatial Distribution of Caesium-137. In: *Handbook for the Assessment of Soil Erosion and Sedimentation Using Environmental Radionuclides* / Zapata F. (Ed). 2002. P. 97–109.

31. *Mabit L., Benmansour M., Walling D.E.* Comparative advantages and limitations of Fallout radionuclides (^{137}Cs , ^{210}Pb and ^7Be) to assess soil erosion and sedimentation // *Journal of Environmental Radioactivity*. 2008a. Vol. 99. Iss. 12. P. 1799–1807.

32. *Mabit L., Bernard C., Makhlouf M., Laverdière M.R.* Spatial variability of erosion and soil organic matter content estimated from ^{137}Cs measurements and geostatistics // *Geoderma*. 2008b. Vol. 145. P. 245–251.

33. *Mabit L., Meusburger K., Iurian A.R., Owens P.N., Toloza A., Alewell C.* Sampling soil and sediment depth profiles at a fine-resolution with a new device for determining physical, chemical and biological properties: the Fine Increment Soil Collector (FISC) // *Journal of Soils and Sediments*. 2014. Vol. 14 (3). P. 630–636.

34. *Mandakh N., Tsogtbaatar J., Dash D. et al.* Spatial assessment of soil wind erosion using WEQ approach in Mongolia // *J. Geogr. Sci.* 2016. Vol. 26. P. 473–483. DOI: [10.1007/s11442-016-1280-5](https://doi.org/10.1007/s11442-016-1280-5).

35. *Matthews N.A.* Aerial and close-range photogrammetric technology: Providing resource documentation, interpretation, and preservation. Tech Note 428. Bureau of Land Management. National Operations Center. Denver, 2008.

36. *Matthews N.A., Noble T.A., Breithaupt B.H.* The application of photogrammetry, remote sensing and geographic information systems (GIS) to fossil resource management. In: *Fossils from Federal Lands*. New Mexico Museum of Natural History and Science. 2006. Bulletin 34. P. 119–131.

37. *Minasny B., Malone B.P., McBratney A.B., Angers D.A., Arrouays D., Chambers A., Chaplot V., Chen Z.S., Cheng K. et al.* Soil carbon 4 per mille // *Geoderma*. 2017. Vol. 292. P. 59–86. DOI: [10.1016/j.geoderma.2017.01.002](https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.01.002).

38. *Morgan R.P.C.* Soil Erosion and Conservation. Oxford: Blackwell publishing, 2005. 304 p.

39. *Okin G.S.* A new model of wind erosion in the presence of vegetation // *J. Geophys. Res.* 2008. Vol. 113. Iss. F2. DOI: [10.1029/2007JF000758](https://doi.org/10.1029/2007JF000758).

40. *Pandey A., Himanshu S.K., Mishra S.K., Singh V.P.* Physically based soil erosion and sediment yield models revisited // *CATENA*. 2016. Vol. 147. P. 595–620. DOI: [10.1016/j.catena.2016.08.002](https://doi.org/10.1016/j.catena.2016.08.002).

41. *Siakeu J., Oguchi T.* Soil erosion analysis and modelling: a review // *Trans. Jpn. Geomorphol.* 2000. Vol. 21. Iss. 4. P. 413–429.
42. *Pellant M., Shaver P., Pyke D.A., Herrick J.E.* Interpreting indicators of rangeland health, version 4. Tech Ref 1734-6. Bureau of Land Management. National Science and Technology Center, Denver, 2005. URL: <http://www.blm.gov/nstc/library/techref.htm>.
43. *Ritchie J.C., McCarty G.W.* ¹³⁷Cesium and soil carbon in a small agricultural watershed // *Soil and Tillage Research.* 2003. Vol. 69 (1–2). P. 45–51.
44. *Sac M.M., Ugur A., Yener G., Ozden B.* Estimates of soil erosion using cesium-137 tracer models // *Environmental Monitoring and Assessment.* No. 136 (1–3). P. 461–467.
45. *Schmid T., Rodriguez-Rastrero M., Escribano P., Palacios-Orueta A., Bendor E., Plaza A., Chabrillat S.* Characterization of soil erosion indicators using hyperspectral data from a Mediterranean rainfed cultivated region // *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing.* 2016. Vol. 9 (2). P. 845–860.
46. *Sepuru T.K., Dube T.* An appraisal on the progress of remote sensing applications in soil erosion mapping and monitoring // *Remote Sensing Applications: Society and Environment.* 2018. Vol. 9. P. 1–9. DOI: [10.1016/j.rsase.2017.10.005](https://doi.org/10.1016/j.rsase.2017.10.005).
47. *Shakesby R.A.* The soil erosion bridge: A device for micro-profiling soil surfaces // *Earth surface processes and landforms.* 1993. Vol. 18. Iss. 9. P. 823–827. DOI: [10.1002/esp.3290180906](https://doi.org/10.1002/esp.3290180906).
48. *Shrestha D.P.* Guidelines for monitoring and assessment of wind erosion at site level. 2008. 47 p.
49. *Thiermann A., Sbresny J., Schäfer W.* GIS in WEELS – Wind Erosion on Light Soils // *GeoInformatics.* 2002. No. 5. P. 30–33.
50. *Vrieling A., Rodrigues S.C., Bartholomeus H., Sterk G.* Automatic identification of erosion gullies with ASTER imagery in the Brazilian Cerrados // *Int. J. Remote. Sens.* 2007. Vol. 28. Iss. 12. P. 2723–2738. DOI: [10.1080/01431160600857469](https://doi.org/10.1080/01431160600857469).
51. *Vrieling A.* Satellite remote sensing for water erosion assessment: a review // *Catena.* 2006. Vol. 65. Iss. 1. P. 2–18. DOI: [10.1016/j.catena.2005.10.005](https://doi.org/10.1016/j.catena.2005.10.005).
52. *Vrieling A., De Jong S.M., Sterk G., Rodrigues S.C.* Timing of erosion and satellite data: a multi-resolution approach to soil erosion risk mapping // *Int. J. Appl. Earth Obs. GeoInf.* 2008. Vol. 10. Iss. 3. P. 267–281. DOI: [10.1016/j.jag.2007.10.009](https://doi.org/10.1016/j.jag.2007.10.009).
53. *Webb N.P. et al.* Enhancing Wind Erosion Monitoring and Assessment for U.S. Rangelands // *Rangelands.* 2017. Vol. 39. Iss. 3–4. P. 85–96. DOI: [10.1016/j.rala.2017.04.001](https://doi.org/10.1016/j.rala.2017.04.001).

54. Webb N.P. et al. Indicators and benchmarks for wind erosion monitoring, assessment and management // *Ecological Indicators*. 2020. Vol. 110. 105881. DOI: [10.1016/j.ecolind.2019.105881](https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2019.105881).
55. Woodruff N.P., Siddoway F.H. A wind erosion equation // *Soil Science Society of America Proceedings*. 1965. Vol. 29. No. 5. P. 602–608.
56. Ypsilantis W.G. Upland soil erosion monitoring and assessment: An overview. Tech Note 438. Bureau of Land Management. National Operations Center. Denver, 2011.
57. Zhidkin A.P., Shamshurina E.N., Golosov V.N., Komissarov M.A., Ivanova N.N., Ivanov M.M. Detailed study of post-Chernobyl Cs-137 redistribution in the soils of a small agricultural catchment (Tula region, Russia) // *Journal of Environmental Radioactivity*. 2020. Vol. 223–224. 106386. DOI: [10.1016/j.jenvrad.2020.106386](https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2020.106386).
58. Žižala D., Zádorová T., Kapička J. Assessment of soil degradation by erosion based on analysis of soil properties using aerial hyperspectral images and ancillary data, Czech Republic // *Remote Sensing*. 2017. Vol. 9 (1). 28. DOI: [10.3390/rs9010028](https://doi.org/10.3390/rs9010028).
59. Žižala D., Juřicová A., Zádorová T., Zelenková K., Minařík R. Mapping soil degradation using remote sensing data and ancillary data: South-East Moravia, Czech Republic // *European Journal of Remote Sensing*. 2019. Vol. 52. P. 108–122. DOI: [10.1080/22797254.2018.1482524](https://doi.org/10.1080/22797254.2018.1482524).
60. Zobeck T.M., Parker C., Haskell S., Guoding K. Scaling up from field to region for wind erosion prediction using a field-scale wind erosion model and GIS, Agriculture // *Ecosystems & Environment*. 2000. Vol. 82. Iss. 1–3. P. 247–259. DOI: [10.1016/S0167-8809\(00\)00229-2](https://doi.org/10.1016/S0167-8809(00)00229-2).

REFERENCES

1. Andronikov V.L., *Aerokosmicheskie metody izucheniya pochv* (Aerospace methods of soil investigation), Moscow: Kolos, 1979, 280 p.
2. Gendugov V.M., Glazunov G.P., *Vetrovaya eroziya pochvy i zapylenie vozdukh* (Wind erosion of soil and air dusting), Moscow: FIZMATLIT, 2007, 240 p.
3. Dolgilevich M.I., K metodike izmereniya glubiny vyduvaniya pochv (To methods of the soil blowing depth measurement), *Pochvovedenie*, 1958, No. 8, pp. 124–126.
4. Ivanov A.L., Kiryushin V.I., Molchanov E.N., Savin I.Yu., Stolbovoi V.S., Analiz zemel'noi reformy i agropromyshlennogo proizvodstva za chetvert' veka. Pochvenno-ekologicheskie, tekhnologicheskie institutsional'nye i infrastrukturnye aspekty modernizatsii. Zemel'naya sluzhba (doklad) (Analysis of Land Reform and Agro-Industrial Production for a Quarter of a Century.

Soil ecological, technological institutional and infrastructural aspects of modernization. Land service (report)), Moscow: V.V. Dokuchaev Soil Science Institute, 2016, 93 p.

5. Kuznetsov M.S., Glazunov G.P., *Eroziya i okhrana pochv* (Erosion and Soil Protection), Moscow: Izdatel'stvo MGU, 2020, 387 p.

6. Larionov G.A., *Eroziya i deflyatsiya pochv* (Soil Erosion and Deflation), Moscow, 1993, 200 p.

7. Ivanov A.L. (Ed.), *Nauchnye osnovy predotvrashcheniya degradatsii pochv (zemel') sel'skokhozyaistvennykh ugodii Rossii i formirovaniya sistem vosproizvodstva ikh plodorodiya v adaptivno-landshaftnom zemledelii* (Scientific bases of prevention of degradation of soils (lands) of agricultural lands of Russia and formation of systems of reproduction of their fertility in adaptive-landscape agriculture), Moscow: V.V. Dokuchaev Soil Science Institute, 2013, 756 p.

8. Semenov O.E., *Metodika vektornykh raschetov vetrovogo perenosa peska i solei vo vremya peschano-solevykh bur'* (Methods of vectorial calculations of the wind transport of sand and salts during sand and salt storms), In: *Agrometeorologiya* (Agrometeorology), Leningrad, 1988, pp. 209–224.

9. Tregubov P.S., Dizengof E.G., Zakharova N.N., *Protivoerozionnaya i protivodeflyatsionnaya stoikost' pochv i puti ee povysheniya (obzornaya informatsiya)* (Anti-Erosion and Anti-Deflation Resistance of Soils and Ways to Increase It (review information)), VNIITEISKH, 1980, 61 p.

10. Alewell C., Meusburger K., Brodbeck M., Banninger D., Methods to describe and predict soil erosion in mountain regions, *Landsc. Urban Plan.*, 2008, Vol. 88, pp. 46–53.

11. Blaney D.G., Warrington G.E., *Estimating soil erosion using an erosion bridge*, WSDG-TP-00008 Report, USDA Forest Service, Watershed Development Group, Fort Collins, 1983.

12. Borrelli P., Lugato E., Montanarella L., Panagos P., A New Assessment of Soil Loss Due to Wind Erosion in European Agricultural Soils Using a Quantitative Spatially Distributed Modelling Approach, *Land Degradation & Development*, 2017, Vol. 28, pp. 335–344, DOI: [10.1002/ldr.2588](https://doi.org/10.1002/ldr.2588).

13. Chappell A., Webb N.P., Using albedo to reform wind erosion modelling, mapping and monitoring, *Aeolian Research*, 2016, Vol. 23, pp. 63–78, DOI: [10.1016/j.aeolia.2016.09.006](https://doi.org/10.1016/j.aeolia.2016.09.006).

14. Clark R.D., *Erosion condition classification system. Tech Note 346*, Bureau of Land Management, Denver, Denver Service Center, 1980.

15. Collado A.D., Chuvieco E., Camarasa A., Satellite remote sensing analysis to monitor desertification processes in the crop-rangeland boundary of Argentina, *Journal of Arid Environments*, 2002, Vol. 52, Iss. 1, pp. 121–133, DOI: [10.1006/jare.2001.0980](https://doi.org/10.1006/jare.2001.0980).

16. Corwin D.L., Hopmans J., Rooij G.H., From field- to landscape-scale vadose zone processes: Scale issues, modeling, and monitoring, *Vadose Zone Journal*, 2006, Vol. 5, No. 1, pp. 129–139.
17. Duniway M.C., Pfennigwerth A.A., Fick S.E., Nauman T.W., Belnap J., Barger N.N., Wind erosion and dust from US drylands: a review of causes, consequences, and solutions in a changing world, *Ecosphere*, 2019, Vol. 10, Iss. 3, e02650, DOI: [10.1002/ecs2.2650](https://doi.org/10.1002/ecs2.2650).
18. Fulajtar E., Mabit L., Renschler C.S., Lee Zhi Yi A., *Use of ¹³⁷Cs for soil erosion assessment*, Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, 2017, 64 p.
19. Gelaro R. et al., The Modern-Era Retrospective Analysis for Research and Applications, Version 2 (MERRA-2), *Journal of Climate*, 2017, Vol. 30, Iss. 14, pp. 5419–5454, DOI: [10.1175/JCLI-D-16-0758.1](https://doi.org/10.1175/JCLI-D-16-0758.1).
20. Gitas I.Z., Douros K., Minakou C., Silleos G.N., Karydas C.G., Multi-temporal soil erosion risk assessment in N. Chalkidiki using a modified USLE raster model, *EARSeL eProceeding*, 2009, Vol. 8, No. 1, pp. 40–52.
21. Golosov V.N., Collins A.L., Dobrovolskaya N.G., Bazhenova O.I., Ryzhov Yu.V., Sidorchuk A.Yu., Soil loss on the arable lands of the forest-steppe and steppe zones of European Russia and Siberia during the period of intensive agriculture, *Geoderma*, 2021, Vol. 381, 114678, DOI: [10.1016/j.geoderma.2020.114678](https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2020.114678).
22. Hagen L.J., A wind erosion prediction system to meet user needs, *Journal of soil and water conservation*, 1991, Vol. 46, No. 2, pp. 106–111.
23. Jain S.K., Singh P., Seth S.M., Assessment of sedimentation in Bhakra Reservoir in the western Himalayan region using remotely sensed data, *Hydrol. Sci. J.*, 2002, Vol. 47, No. 2, pp. 203–212.
24. Jonga S.M., Paracchini M.L., Bertolo F., Folving S., Megier J., Roo A.P.J., Regional assessment of soil erosion using the distributed model SEMMED and remotely sensed data, *Catena*, 1999, Vol. 37, Iss. 3–4, pp. 291–308.
25. Karydas C.G., Panagos P., Gitas I.Z., A classification of water erosion models according to their geospatial characteristics, *International Journal of Digital Earth*, 2012, Vol. 7, pp. 229–250, DOI: [10.1080/17538947.2012.671380](https://doi.org/10.1080/17538947.2012.671380).
26. Klik A., *Wind Erosion Assessment in Austria Using Wind Erosion Equation and GIS*, Vienna: BOKU – University of Natural Resources and Applied Life Sciences, 2004, URL: https://www.researchgate.net/publication/228798188_Wind_erosion_assessment_in_Austria_using_wind_erosion_equation_and_GIS.
27. Kouchami-Sardoo I., Shirani H., Esfandiarpour-Boroujeni I., Besalatpour A.A., Hajabbasi M.A., Prediction of soil wind erodibility using a hybrid

Genetic algorithm – Artificial neural network method, *Catena*, 2020, Vol. 187, 104315, DOI: [10.1016/j.catena.2019.104315](https://doi.org/10.1016/j.catena.2019.104315).

28. Kosmadakis I., Tsardaklis P., Ioannou K., Zaimes G., A novel fully automated soil erosion monitoring system, *Food and Environment. Proc. of the 17th Intern. Conf. on Information and Communication Technologies in Agriculture*, 2015, pp. 80–84.

29. Leys J., McTainsh G., Shao Y., Wind Erosion Monitoring and Modeling Techniques in Australia, In: *Sustaining the Global Farm*, D.E. Stott, R.H. Mohtar, G.C. Steinhardt (eds.), 2001, pp. 940–950.

30. Loughran R.J., Pennock D.J., Walling D.E., Spatial Distribution of Caesium-137, In: *Handbook for the Assessment of Soil Erosion and Sedimentation Using Environmental Radionuclides*, Zapata F. (Ed), 2002, pp. 97–109.

31. Mabit L., Benmansour M., Walling D.E., Comparative advantages and limitations of Fallout radionuclides (^{137}Cs , ^{210}Pb and ^7Be) to assess soil erosion and sedimentation, *Journal of Environmental Radioactivity*, 2008, Vol. 99, Iss. 12, pp. 1799–1807.

32. Mabit L., Bernard C., Makhlof M., Laverdière M.R., Spatial variability of erosion and soil organic matter content estimated from ^{137}Cs measurements and geostatistics, *Geoderma*, 2008, Vol. 145, pp. 245–251.

33. Mabit L., Meusburger K., Iurian A.R., Owens P.N., Toloza A., Alewell C., Sampling soil and sediment depth profiles at a fine-resolution with a new device for determining physical, chemical and biological properties: the Fine Increment Soil Collector (FISC), *Journal of Soils and Sediments*, 2014, Vol. 14 (3), pp. 630–636.

34. Mandakh N., Tsogtbaatar J., Dash D. et al., Spatial assessment of soil wind erosion using WEQ approach in Mongolia, *J. Geogr. Sci.*, 2016, Vol. 26, pp. 473–483, DOI: [10.1007/s11442-016-1280-5](https://doi.org/10.1007/s11442-016-1280-5).

35. Matthews N.A., *Aerial and close-range photogrammetric technology: Providing resource documentation, interpretation, and preservation*, Tech Note 428, Bureau of Land Management, National Operations Center, Denver, 2008.

36. Matthews N.A., Noble T.A., Breithaupt B.H., The application of photogrammetry, remote sensing and geographic information systems (GIS) to fossil resource management, In: *Fossils from Federal Lands*, Lucas S.G., J.A. Spielmann, P.M. Hester, J.P. Kenworthy, V.L. Santucci (Eds), 2006, Bulletin 34, New Mexico Museum of Natural History and Science, pp. 119–131.

37. Minasny B., Malone B.P., McBratney A.B., Angers D.A., Arrouays D., Chambers A., Chaplot V., Chen Z.S., Cheng K. et al., Soil carbon 4 per mille, *Geoderma*, 2017, Vol. 292, pp. 59–86, DOI: [10.1016/j.geoderma.2017.01.002](https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.01.002).

38. Morgan R.P.C., *Soil Erosion and Conservation*, Oxford: Blackwell publishing, 2005, 304 p.
39. Okin G.S., A new model of wind erosion in the presence of vegetation, *J. Geophys. Res.*, 2008, Vol. 113, Iss. F2, DOI: [10.1029/2007JF000758](https://doi.org/10.1029/2007JF000758).
40. Pandey A., Himanshu S.K., Mishra S.K., Singh V.P., Physically based soil erosion and sediment yield models revisited, *CATENA*, 2016, Vol. 147, pp. 595–620, DOI: [10.1016/j.catena.2016.08.002](https://doi.org/10.1016/j.catena.2016.08.002).
41. Siakeu J., Oguchi T., Soil erosion analysis and modelling: a review, *Trans. Jpn. Geomorphol.*, 2000, Vol. 21, Iss. 4, pp. 413–429.
42. Pellant M., Shaver P., Pyke D.A., Herrick J.E., *Interpreting indicators of rangeland health, version 4. Tech Ref 1734-6*, Bureau of Land Management, National Science and Technology Center, Denver, 2005, URL: <http://www.blm.gov/nstc/library/techref.htm>.
43. Ritchie J.C., McCarty G.W., ¹³⁷Cesium and soil carbon in a small agricultural watershed, *Soil and Tillage Research*, 2003, Vol. 69 (1–2), pp. 45–51.
44. Sac M.M., Ugur A., Yener G., Ozden B., Estimates of soil erosion using cesium-137 tracer models, *Environmental Monitoring and Assessment*, No. 136 (1–3), pp. 461–467.
45. Schmid T., Rodriguez-Rastrero M., Escribano P., Palacios-Orueta A., Bendor E., Plaza A., Chabrillat S., Characterization of soil erosion indicators using hyperspectral data from a Mediterranean rainfed cultivated region, *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2016, Vol. 9 (2), pp. 845–860.
46. Sepuru T.K., Dube T., An appraisal on the progress of remote sensing applications in soil erosion mapping and monitoring, *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 2018, Vol. 9, pp. 1–9, DOI: [10.1016/j.rsase.2017.10.005](https://doi.org/10.1016/j.rsase.2017.10.005).
47. Shakesby R.A., The soil erosion bridge: A device for micro-profiling soil surfaces, *Earth surface processes and landforms*, 1993, Vol. 18, Iss. 9, pp. 823–827, DOI: [10.1002/esp.3290180906](https://doi.org/10.1002/esp.3290180906).
48. Shrestha D.P., *Guidelines for monitoring and assessment of wind erosion at site level*, 2008, 47 p.
49. Thiermann A., Sbresny J., Schäfer W. GIS in WEELS – Wind Erosion on Light Soils, *GeoInformatics*, 2002, No. 5, pp. 30–33.
50. Vrieling A., Rodrigues S.C., Bartholomeus H., Sterk G., Automatic identification of erosion gullies with ASTER imagery in the Brazilian Cerrados, *Int. J. Remote. Sens.*, 2007, Vol. 28, Iss. 12, pp. 2723–2738, DOI: [10.1080/01431160600857469](https://doi.org/10.1080/01431160600857469).

51. Vrieling A., Satellite remote sensing for water erosion assessment: a review, *Catena*, 2006, Vol. 65, Iss. 1, pp. 2–18, DOI: [10.1016/j.catena.2005.10.005](https://doi.org/10.1016/j.catena.2005.10.005).
52. Vrieling A., De Jong S.M., Sterk G., Rodrigues S.C., Timing of erosion and satellite data: a multi-resolution approach to soil erosion risk mapping, *Int. J. Appl. Earth Obs. GeoInf.*, 2008, Vol. 10, Iss. 3, pp. 267–281, DOI: [10.1016/j.jag.2007.10.009](https://doi.org/10.1016/j.jag.2007.10.009).
53. Webb N.P. et al., Enhancing Wind Erosion Monitoring and Assessment for U.S. Rangelands, *Rangelands*, 2017, Vol. 39, Iss. 3–4, pp. 85–96, DOI: [10.1016/j.rala.2017.04.001](https://doi.org/10.1016/j.rala.2017.04.001).
54. Webb N.P. et al., Indicators and benchmarks for wind erosion monitoring, assessment and management, *Ecological Indicators*, 2020, Vol. 110, 105881, DOI: [10.1016/j.ecolind.2019.105881](https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2019.105881).
55. Woodruff N.P., Siddoway F.H., A wind erosion equation, *Soil Science Society of America Proceedings*, 1965, Vol. 29, No. 5, pp. 602–608.
56. Ypsilantis W.G., *Upland soil erosion monitoring and assessment: An overview*, Tech Note 438, Bureau of Land Management, National Operations Center, Denver, 2011.
57. Zhidkin A.P., Shamshurina E.N., Golosov V.N., Komissarov M.A., Ivanova N.N., Ivanov M.M. Detailed study of post-Chernobyl Cs-137 redistribution in the soils of a small agricultural catchment (Tula region, Russia), *Journal of Environmental Radioactivity*, 2020, Vol. 223–224, 106386, DOI: [10.1016/j.jenvrad.2020.106386](https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2020.106386).
58. Žižala D., Zádorová T., Kapička J., Assessment of soil degradation by erosion based on analysis of soil properties using aerial hyperspectral images and ancillary data, Czech Republic, *Remote Sensing*, 2017, Vol. 9 (1), 28, DOI: [10.3390/rs9010028](https://doi.org/10.3390/rs9010028).
59. Žižala D., Juřicová A., Zádorová T., Zelenková K., Minařík R., Mapping soil degradation using remote sensing data and ancillary data: South-East Moravia, Czech Republic, *European Journal of Remote Sensing*, 2019, Vol. 52, pp. 108–122, DOI: [10.1080/22797254.2018.1482524](https://doi.org/10.1080/22797254.2018.1482524).
60. Zobeck T.M., Parker C., Haskell S., Guoding K., Scaling up from field to region for wind erosion prediction using a field-scale wind erosion model and GIS, *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2000, Vol. 82, Iss. 1–3, pp. 247–259, DOI: [10.1016/S0167-8809\(00\)00229-2](https://doi.org/10.1016/S0167-8809(00)00229-2).

УДК 631.4

DOI: 10.19047/0136-1694-2020-104-158-198



Ссылки для цитирования:

Смирнова М.А., Жидкин А.П., Лозбенев Н.И., Заздравных Е.А., Козлов Д.Н. Цифровое картографирование степени эродированности почв с использованием моделей фактор – свойство и фактор – процесс – свойство (юг Среднерусской возвышенности) // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2020. Вып. 104. С. 158-198. DOI: 10.19047/0136-1694-2020-104-158-198

Cite this article as:

Smirnova M.A., Zhidkin A.P., Lozbenev N.I., Zazdravnykh E.A., Kozlov D.N. Digital mapping of erosion degree of soils using the factor – property and factor – process – property models (the south of the Central Russian upland), Dokuchaev Soil Bulletin, 2020, V. 104, pp. 158-198, DOI: 10.19047/0136-1694-2020-104-158-198

Благодарность:

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 18-35-20011) и в рамках темы госзадания № 0591-2020-0029.

Acknowledgments:

The studies were carried out with the financial support of the Russian Foundation for Basic Research (RFBR) (scientific project No. 18-35-20011) and within the framework of the theme of state assignment No. 0591-2020-0029.

Цифровое картографирование степени эродированности почв с использованием моделей фактор – свойство и фактор – процесс – свойство (юг Среднерусской возвышенности)

© 2020 г. М. А. Смирнова^{1,2*}, А. П. Жидкин^{1**},
Н. И. Лозбенев^{1***}, Е. А. Заздравных³, Д. Н. Козлов^{1****}

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

*<https://orcid.org/0000-0002-5256-4348>, e-mail: summerija@yandex.ru,

**<https://orcid.org/0000-0003-3995-9203>,

***<https://orcid.org/0000-0003-0377-3124>,

****<https://orcid.org/0000-0003-0103-0300>.

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

³«ЦАС “Белгородский”», Россия,
308027, Белгород, ул. Щорса, д. 8.

*Поступила в редакцию 21.09.2020, после доработки 23.10.2020,
принята к публикации 11.11.2020*

Резюме: Деградация почв в результате водной эрозии представляет серьезную угрозу продовольственной и экологической безопасности, вследствие чего вопросы изучения и картографирования эрозии почв не теряют своей актуальности. В работе приведены результаты крупномасштабного цифрового картографирования степени эродированности почвенного покрова пашни Прохоровского района Белгородской области (85 тыс га), выполненного на основании подходов, связывающих факторы эрозионно-аккумулятивных процессов и степень эродированности почв напрямую (модель фактор – свойство), и посредством имитационной эрозионной модели WaTEM/SEDEM (модель фактор – процесс – свойство). Включение процессной составляющей в алгоритм цифрового почвенного картографирования позволило учесть не только пространственные, но и временные особенности протекания эрозионных процессов. Выявлено, что распашка земель Прохоровского района в первую очередь проводилась на землях, слабо подверженных эрозии, с темпами эрозии почти в два раза ниже, чем на более молодых пашнях. В результате этого карты эродированности почв, построенные на основе модели фактор – процесс – свойство с учетом и без учета длительности распашки в значительной степени соответствуют друг другу. Карты доминантных почвенных категорий (пиксел карты соответствует одной категории почв – незеродированной и слабоэродированной, средне-, сильноэродированной), построенные с использованием моделей фактор – свойство и фактор – процесс – свойство, обладают высокой степенью соответствия друг другу (идентичность предсказания для 90% пикселей), в то время как карты комбинаций почв (пиксел карты содержит информацию о долевом участии почв разной степени эродированности) различаются в большей мере (идентичность менее чем для 60% пикселей). Площади зональных, эрозионно-зональных и слабоэродированных комбинаций почв отличаются в 1.5–2 раза в сторону большей степени эродированности почв на картах, построенных с использованием модели фактор – процесс – свойство.

Ключевые слова: эрозионное моделирование, черноземы, Белгородская область, WATEM/SEDEM, структура почвенного покрова.

Digital mapping of erosion degree of soils using the factor – property and factor – process – property models (the south of the Central Russian upland)

M. A. Smirnova^{1,2*}, A. P. Zhidkin^{1**}, N. I. Lozbenev^{1***},
E. A. Zazdravnykh³, D. N. Kozlov^{1****}

¹Federal Research Centre “V.V. Dokuchaev Soil Science Institute”,
7 Bld. 2 Pyzhevskiy per., Moscow 119017, Russian Federation,

*<https://orcid.org/0000-0002-5256-4348>, e-mail: summerija@yandex.ru,

**<https://orcid.org/0000-0003-3995-9203>,

***<https://orcid.org/0000-0003-0377-3124>,

****<https://orcid.org/0000-0003-0103-0300>.

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

³“Agrochemical Service Center “Belgorodskiy”,
8 Shchorsa Str., Belgorod 308027, Russian Federation.

Received 21.09.2020, Revised 23.10.2020, Accepted 11.11.2020

Abstract: Soil degradation resulting from water erosion poses a serious threat to food and environmental security, therefore the research of soil erosion features and soil erosion mapping do not lose their relevance. The paper presents the results of large-scale digital mapping of the erosion degree of the arable soils in the Prokhorovsky district of the Belgorod region (85 thousand hectares), based on two approaches: (1) linking the factors of erosion-accumulative processes and the erosion degree of soil directly (factor – property model), and (2) due to imitation erosion model WaTEM/SEDEM (factor – process – property model). The inclusion of the process component into the digital soil mapping algorithm allows taking into account not only the spatial but also the temporal soil erosion features. It was revealed that the agricultural development of the Prokhorovsky district was primarily carried out on lands that are weakly prone to erosion, with the rate of erosion almost two times lower than on younger arable lands. As a result, the soil erosion maps, based on the factor – process – property model, with and without taking into account the duration of agricultural use, largely correspond to each other. Dominant soil categories (the map pixel corresponds to one soil taxa – non-eroded and slightly eroded, medium, highly eroded), mapping by factor –

property and factor – process – property models, have a high degree of correspondence to each other (prediction identity for 90% of pixels), while the soil combinations (the map pixel has information on the proportion of soils with different erosion degrees of soil) more significant (identity for less than 60% of pixels). The areas of zonal, erosion-zonal, and weakly eroded soil combinations differ 1.5–2 times, in the direction of a greater degree of soil erosion on the factor – process – property map.

Keywords: erosion modeling, Chernozems, Belgorod region, WATEM/SEDEM, soil cover pattern.

ВВЕДЕНИЕ

Эрозия почв представляет угрозу для почвенного покрова, продовольственной безопасности и состояния поверхностных вод, что признается всем мировым сообществом и отражено в целом ряде документов различного уровня – от региональных ([Agricultural..., 2004](#); [Государственный..., 2019](#)) до межгосударственных ([Thematic Strategy..., 2006](#); [Decision..., 2012](#); [Transforming..., 2015](#)). В основе современных оценок, программ по управлению и контролю эрозии почв лежат специальные карты, поскольку для принятия решений недостаточно знать количественные показатели эрозии почв, важно обладать информацией о пространственных особенностях протекания процесса и состоянии почвенного покрова ([Bui et al., 2011](#); [Guerra et al., 2015](#); [Alewell et al., 2019](#)). Все это вместе обуславливает большой интерес к проблеме картографирования эрозии почв ([Dotterweich, 2013](#); [Vanwalleghe et al., 2017](#)).

Существующие работы по картографированию эрозии почв можно разделить на две группы. В первой – пространственному отображению подвергаются особенности протекания эрозионно-аккумулятивных (ЭА) процессов путем построения карт темпов, объемов суммарных эрозионных потерь и т. д. ([Flanagan, 2004](#); [Guerra et al., 2014](#); [Alewell et al., 2019](#)). Во второй группе работ картографируются свойства почв – мощность гумусового горизонта, степень эродированности почв и т. д. ([Chaplot et al., 2010](#)). При этом в крайне редких случаях проводится сопряженный анализ пространственных особенностей протекания ЭА процессов и степени эродированности почвенного покрова одновременно

([Martinez-Mena et al., 2020](#)). В настоящее время все большую популярность приобретают методы цифрового картографирования степени эродированности почв и интенсивности протекания ЭА процессов в сравнении с визуально-экспертным методом в силу их большей дешевизны и производительности ([Minasny, McBratney, 2016](#); [Alewell et al., 2019](#); [Arrouays et al., 2020](#)).

Цифровое картографирование почв основано на установлении связей между факторами почвообразования и почвами, выраженными в виде численных моделей. Наиболее часто используемая модель SCORPAN ([McBratney et al., 2003](#); [Minasny, McBratney, 2016](#); [Ma et al., 2019](#)) является математическим выражением формулы Докучаева (1883): факторы почвообразования – почвы. Несмотря на то, что в теоретическом почвоведении давно показано преимущество использования подхода фактор – процесс – свойство над подходом фактор – свойство, использование моделей, включающих параметры процесса в алгоритмы цифрового почвенного картографирования, до сих пор единично и представлено в некоторых работах ([Angelini et al., 2016, 2017, 2018](#); [Ma et al., 2019](#); [Козлов и др., 2019](#)). Сложность включения процессной составляющей в алгоритмы цифрового почвенного картографирования заключается в том, что: (1) процессы сложно наблюдаемы, их прямое изучение вызывает определенные затруднения, прежде всего, инструментального характера ([Элементарные..., 1993](#)); (2) прямое изучение процессов реализуется, как правило, в условиях лабораторных экспериментов или на очень локальном уровне ([Карпачевский, Яшин, 1999](#); [Bockheim, Gennadiyev, 2009](#)); (3) различные процессы могут приводить к формированию одного и того же свойства (например, пониженное содержание органического углерода в почвах может являться результатом эрозии почв или дегумификации ([Элементарные..., 1993](#); [Sommer et al., 2016](#); [Yaghobi et al., 2018](#))).

В работах ([Angelini et al., 2016, 2017, 2018](#)), посвященных внедрению структурных уравнений в алгоритмы почвенного картографирования, процессная составляющая не упоминается напрямую, однако указано, что моделируемые почвенные свойства (содержание органического углерода, илистой фракции, емкость катионного обмена) находятся в тесной взаимосвязи, реали-

зуемой в результате почвообразовательных процессов. В работе [Ma et al. \(2019\)](#) используется модель почвенно-ландшафтных связей SSSPAM (State Space Soil Production and Assessment Model) для предсказания пространственно-временной неоднородности содержания песчаной фракции в почвах.

В работе Д.Н. Козлова ([Козлов и др., 2019](#)) впервые показана возможность использования эрозионной модели для крупномасштабного картографирования степени эродированности почв на примере полигона, расположенного в Курской области. Настоящее исследование является продолжением цитируемой работы и направлено на развитие подходов цифрового почвенного картографирования степени эродированности почв, в частности учета продолжительности ЭА процессов в алгоритме картографирования. Такой учет необходим, поскольку степень эродированности почв на участках с разной продолжительностью распашки, как правило, существенно отличается. Например, в работе ([Жидкин и др., 2016](#)) на основе изучения ключевых участков в Белгородской области было показано, что на склонах со сходными физико-географическими условиями, но с разной длительностью распашки, объемы суммарных эрозионных потерь различались в 2–4 раза, несмотря на то, что среднеголетние темпы ЭА процессов были относительно стабильны.

Применение моделей, связывающих факторы ЭА процессов, пространственные, временные особенности их протекания и текущие свойства почв, может существенно усовершенствовать возможности оценки эродированности почвенного покрова и прогноза его трансформации в будущем. Помимо практической значимости, разрабатываемые подходы могут быть использованы для выявления особенностей структуры почвенного покрова, скорости и направленности трансформации его компонентов, а также устойчивости пространственной организации почвенного покрова к ЭА процессам. В этом смысле учет продолжительности ЭА процессов в алгоритмах картографирования имеет принципиально важную роль. В более широком понимании цифровое картографирование степени эродированности почв может быть использовано как инструмент для понимания структурно-функциональной организации почвенного покрова пахотных склонов. Целью исследо-

вания является разработка методических подходов к цифровому картографированию эродированности почвенного покрова. В задачи работы входило:

1. составление моделей фактор – свойство (ФС), фактор – процесс – свойство без учета длительности ЭА процессов (ФП_хС) и фактор – процесс – свойство с учетом длительности ЭА процессов (ФП_{х,t}С) для картографирования эродированности почвенного покрова всей пашни Прохоровского района Белгородской области (85 000 га);
2. картографирование доминантных почвенных категорий и комбинаций почв разной степени эродированности на основании моделей ФС, ФП_хС и ФП_{х,t}С.
3. сравнительный анализ карт доминантных почвенных категорий и карт комбинаций почв, полученных на основании моделей ФС, ФП_хС и ФП_{х,t}С.

Концептуальная схема исследования приведена на рисунке 1.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Физико-географическая характеристика

Район исследований расположен в южной части Среднерусской возвышенности. Климат умеренно континентальный с жарким летом и сравнительно холодной зимой, гидротермический коэффициент составляет около 1. Продолжительность теплого периода, по среднегодовым данным, равен 149 дням. По данным Старооскольской метеостанции за 2012–2016 гг., средняя температура января равна –6.8 °С, июня 19.3 °С. Среднегодовая температура воздуха составляет 6.6 °С, среднегодовое количество осадков – 558 мм ([Лукин, 2016](#)).

Рельеф представлен слабоволнистой возвышенной равниной с общим уклоном к югу и абсолютными высотами от 165 до 267 м. Преобладают платообразные междуречья с очень пологими склонами, как правило, менее 2°, редко 3–7°. Увеличение степени расчленения рельефа и крутизны склонов происходит при движении с севера на юг.

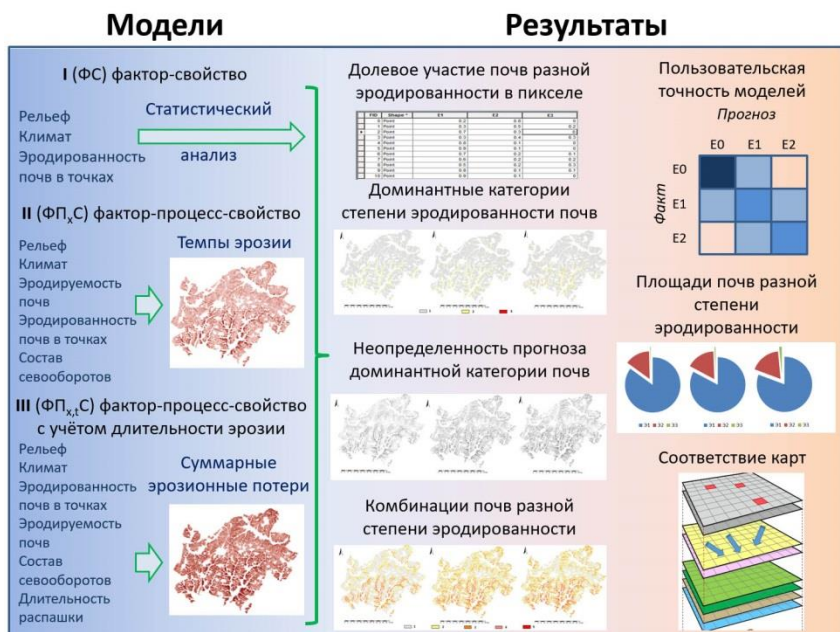


Рис. 1. Концептуальная схема исследования.

Fig. 1. Research design.

Многочисленные ложбины стока и карстово-меловые ландшафты встречаются преимущественно в восточной и юго-восточной части Прохоровского района. В качестве почвообразующих пород на территории исследования выступают лёссовидные суглинки. Почвенный покров пашни представлен в основном черноземами типичными (около 55% от площади пашни) и выщелоченными (около 40% от площади пашни), встречаются черноземы типичные карбонатные, черноземы солонцеватые, серые лесные, лугово-черноземные почвы (Лукин, 2016). Согласно данным почвенно-эрозионного районирования Белгородской области, (Соловиченко, Тютюнов, 2014) исследуемая территория относится к двум районам: западному эрозионному району слабого распространения смыва, слабой заовраженности, и к центральному эрозионному району среднего распространения смыва, средней заовраженности.

История землепользования исследуемой территории включает несколько этапов, в целом характерных для Центрального Черноземья ([Чендев, 2008](#)). Резкий рост интенсивности сельскохозяйственного освоения земель, сопровождаемый увеличением площади пашни, приходится на начало XVIII в. и середину XIX в. В XVIII преобладала переложная система земледелия, впоследствии вытесненная трехпольной системой к началу XIX. В конце XIX в. – начале XX в. увеличение численности населения привело к нехватке обрабатываемой земли и, как следствие, к распространению двупольной системы, исключая парующие поля. Начиная с 1930-х годов стали появляться многопольные севообороты; доля пропашных культур в составе севооборотов увеличивалась вплоть до конца 1960-х годов, и к настоящему времени структура посевных площадей изменилась слабо. В настоящее время в структуре посевных площадей Белгородской области (в том числе Прохоровского района) из зерновых культур преобладают яровая ячмень и озимая пшеница, из пропашных культур – кукуруза и сахарная свекла. В период с 1964 г. по 2004 г. возросла доля многолетних трав, которая с 2005 г. начала снижаться. Доля подсолнечника в структуре севооборота увеличилась, начиная с 1999 г. Механизированная обработка почв (отвальная вспашка с оборотом пласта) стала преобладать с 1930 г. В последние десятилетия, наряду с отвальной вспашкой, внедряется плоскорезная вспашка, дискование, технологии “no-till” и “strip-till” ([Заздравных, 2017](#)).

Материалы и методы исследования

В качестве исходных материалов для построения карт степени эродированности почв использованы данные полевого почвенного опробования в 639 точках, цифровая модель рельефа с пространственным разрешением 20 м, карта длительности сельскохозяйственного освоения (рис. 2). Данные предоставлены ФГБУ «Центром агрохимической службы “Белгородский”».

Карта длительности сельскохозяйственного освоения составлена с использованием планов Генерального Межевания конца XVIII в., а также литературных источников, посвященных особенностям освоения данной территории ([Чендев, 1997](#), [2008](#); [Чен-](#)

[дев, Петин, 2006, 2008](#); [Белеванцев, Чендев, 2015](#); Особенности..., 2015 и др.).

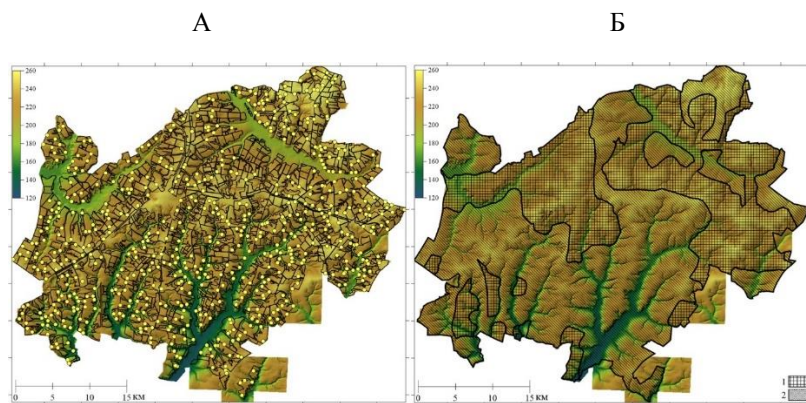


Рис. 2. Цифровая модель рельефа с указанием расположения точек полевого почвенного опробования (А) и участками с различным периодом сельскохозяйственного освоения (Б: 1 – 1780–1920 гг., 2 – 1600–1780 гг.).

Fig. 2. Digital elevation model with the sampling points (А) and the areas with different periods of agricultural development (Б: 1 – 1780–1920 period, 2 – 1600–1780 period).

Для расчетов были использованы средние длительности распашки, принятые для территорий, освоенных в период 1600–1780 гг., – за 310 лет, для территорий, освоенных в период 1780–1920 гг., – за 170 лет. Диагностика степени эродированности почв проводилась на основании разницы между мощностью гумусового горизонта почвы местного водораздела и мощностью исследованной почвы (согласно [Соловиченко и др., 2014](#)); выборку составляли незэродированные и слабоэродированные почвы (Э1; мощность гумусового горизонта на 0–20 см меньше, чем на водоразделе; 478 точек), среднеэродированные (Э2, мощность гумусового горизонта на 20–40 см меньше; 157 точек) и сильноэродированные почвы (мощность гумусового горизонта более чем на 40 см меньше; 4 точки). Обработка предоставленных данных проводилась в программах SAGA GIS, GRAS GIS, ArcGis, Statistica. Математическое

моделирование ЭА процессов осуществлялось на основе WaTEM/SEDEM v. 2004 ([Van Oost et al., 2000](#); [Van Rompay et al., 2001](#)).

Построение модели фактор – свойство (ФС)

Построение математической модели, напрямую связывающей факторы ЭА процессов и степень эродированности почв, было выполнено с использованием линейного дискриминантного анализа с пошаговым отбором предикторов ([Webster, Burrough, 1974](#)). Примеры использования этого метода в цифровом почвенном картографировании приведены в работах ([Сорокина, Козлов, 2009](#); [Digital..., 2008](#); [Lozbenov et al., 2019](#)). В качестве факторов ЭА процессов были использованы морфометрические параметры рельефа и климата, рассчитанные для каждого элемента регулярной сетки (20×20 м) пашни Прохоровского района. Были получены значения экспозиции и крутизны склонов, глубины замкнутых депрессий, поперечной, плановой и общей кривизны, общей и модифицированной площади водосбора, топографического индекса влажности, индекса длины и крутизны склона (LS-фактор), превышения над базисом эрозии, индекса неровности поверхности (TRI), относительного превышения (TPI) в окрестности 250 м, 500 м, 1 000 м и далее до 4 000 м с шагом в 500 м, величина потенциальной суммарной солнечной радиации, значения перераспределенного слоя осадков. Таким образом, обучающую выборку анализа составили полевые описания свойств почв (степени эродированности) в 639 точках опробования и количественные данные о факторах ЭА процессов.

Методом линейного дискриминантного анализа были выявлены наиболее значимые факторы, обуславливающие пространственную дифференциацию степени эродированности почв, и предсказана вероятность встречи (от 0 до 1) почв категорий Э1, Э2 и Э3 для каждого пиксела карты. В качестве критерия оценки значимости связи между количественными параметрами факторов почвообразования и степени эродированности почв был выбран критерий Фишера.

Построение моделей фактор – процесс – свойство

Для анализа возможностей цифрового почвенного картографирования, основанного на модели фактор – процесс – свойство, было построено две карты: одна, учитывающая только пространственные особенности протекания ЭА процессов (карта и модель ФП_хС), другая – дополнительно учитывающая продолжительность ЭА процессов (карта и модель ФП_{х,t}С).

Модель WaTEM/SEDEM v. 2004 г. ([Van Oost et al., 2000](#); [Van Rompay et al., 2001](#)), основанная на модифицированном универсальном уравнении эрозии почв RUSLE, была использована для предсказания пространственной неоднородности протекания ЭА процессов. Входными параметрами для данной модели и количественными характеристиками факторов почвообразования являются: эрозионный потенциал дождевых осадков, коэффициент противоэрозионной устойчивости почв, эрозионный индекс возделываемых культур в среднемноголетнем севообороте, LS-фактор. Подробное описание параметров, использованных при моделировании ЭА процессов на территории пашни Прохоровского района, а также результаты цифрового картографирования эродированности почвенного покрова по модели ФП_хС и его сравнение с традиционным способом картографирования были проанализированы авторами ранее ([Жидкин и др., 2021](#)). Приведем здесь только значения использованных параметров: коэффициент противоэрозионной устойчивости почв был задан равным 35 кг·га·час/га·мДж·мм; эрозионный индекс возделываемых культур в среднемноголетнем севообороте равнялся 0.4; значения эрозионного потенциала дождевых осадков для территории исследования варьируют от 270 до 320 МДж·мм·га⁻¹·час⁻¹·год⁻¹; значения LS-фактора рассчитаны на основании цифровой модели рельефа для каждой ячейки регулярной сетки.

В результате применения модели WaTEM/SEDEM были получены темпы ЭА процессов для каждой ячейки регулярной сетки (расчетные темпы эрозии были ранжированы с шагом в 5 т/га в год. Таким образом была получена информация о пространственных особенностях протекания процесса. Для учета влияния ЭА процессов на почвенный покров с учетом их продолжительности для каждой ячейки регулярной сетки Прохоровского района были

рассчитаны суммарные эрозионные потери за весь период сельскохозяйственного освоения путем умножения среднесуточных темпов эрозии почв (т. е. результата эрозионного моделирования) на количество лет распашки с помощью инструмента “калькулятор растров” в программе ArcGIS 10.5. Далее было принято допущение о неизменности темпов эрозии почв за агрикультурный период. Для уточнения средних многолетних темпов эрозии почв за период распашки требуется детализация информации об изменении факторов ЭА процессов во времени, такая детализация крайне трудоемка и лишь приближает к уточнению результата, не гарантируя абсолютной точности. Отметим, что в данном исследовании разрабатываемый подход носит, в том числе, методический характер и позволяет, при наличии данных об изменении факторов среды во времени, учитывать их при картографировании степени эродированности почвенного покрова.

Эмпирические функции принадлежности категорий почв разной степени эродированности и расчетных темпов эрозии почв получены следующим образом. Были сопоставлены темпы ЭА процессов, полученные с использованием модели WaTEM/SEDEM, и значения степени эродированности почв в 639 точках полевого опробования (путем наложения точек полевого опробования на карту темпов ЭА процессов и присвоения данных о темпах эрозии точкам). Таким образом, каждая точка полевого опробования содержала информацию о степени эродированности почв и расчетных темпах ЭА процессов. Для каждой градации расчетных темпов эрозии (0–5, 5–10, 10–15 и т. д. т/га в год) было рассчитано долевое участие почв разной степени эродированности: к примеру, 282 точки опробования расположены на участках с расчетными темпами эрозии почв 0–5 т/га год; из них 268 точек диагностированы как Э1, 14 точек – как Э2, Э3 не обнаружены. При пропорциональном расчете получается, что доля Э1 в составе почвенного покрова ячеек раstra с темпами эрозии 0–5 т/га год составляет 0.95, Э2 – 0.05, Э3 – 0. Аналогично получено долевое участие почв разной степени эродированности для точек опробования с темпами эрозии 5–10, 10–15 и т. д. т/га в год. На следующем этапе были построены три графика, отражающие зависимость долевого участия почв каждой степени эродированности (Э1, Э2 и

Э3) от темпов эрозии почв. Эти графики были аппроксимированы (величина достоверности аппроксимации более 0.8), получены формулы эмпирических функций принадлежности. Эмпирические функции принадлежности в модели $\Phi\P_{x,t}C$ были построены аналогичным образом, но вместо расчетных темпов эрозии были использованы суммарные эрозионные потери.

Построение карт доминантной категории степени эродированности почв, неопределенности прогноза и карт комбинаций почв разной степени эродированности

Результатами применения моделей ФС, $\Phi\P_xC$ и $\Phi\P_{x,t}C$ являются таблицы, где каждая отдельная строка содержит информацию о координатах центра пикселя размером 20×20 м, апостериорная вероятность встречи в этом пикселе (от 0 до 1) незэродированных и слабоэродированных почв, среднеэродированных, сильноэродированных почв. Каждая из таблиц содержит чуть более 2 млн строк.

Построение карт доминантных категорий и неопределенности прогноза (или максимальной апостериорной вероятности) было проведено следующим образом. Для каждого пикселя было выполнено сравнение значений апостериорных вероятностей встречи Э1, Э2, Э3 и выявлена преобладающая категория степени эродированности почв. Информация о доминантной (преобладающей) категории почв и апостериорная вероятность встречи этой категории в пикселе были добавлены в новые столбцы таблицы. В программе SAGA GIS полученная таблица была преобразована в набор точечных данных (каждая точка соответствовала центру пикселя 20×20 м). Значения в точках (доминантная категория степени эродированности почв, максимальная апостериорная вероятность) были интерполированы на всю территорию пашни Прохоровского района методом ближайшего соседа (Nearest neighbor).

Для построения всех карт комбинаций почв разной степени эродированности было принято следующее допущение: вероятность встречи категорий Э1, Э2, Э3 в пикселе интерпретируется как доля пикселя, занимаемая Э1, Э2, Э3 почвой ([Сорокина, Козлов, 2009](#)). По соотношению долей было выделено 5 комбинаций

почв разной степени эродированности (табл. 1) в соответствии с нормами “[Общесоюзной инструкции по почвенному обследованию...](#)” (1973, стр. 16) и с добавлениями авторов (в колонке дополнительные условия).

Таблица 1. Критерии выделения комбинаций почв на основе долевого участия неэродированных и слабоэродированных (Э1), среднеэродированных (Э2), сильноэродированных (Э3) почв в пикселе
Table 1. Criteria for identifying combinations of soils with varying erosion degrees based on the share of non-eroded and slightly eroded (E1), moderately eroded (E2), strongly eroded (E3) soils in a pixel

Комбинации почв		Критерии на основе долевого участия почв различной степени эродированности	
№	Название	Э1	Дополнительные условия
1	“зональные” с преобладанием неэродированных и слабоэродированных почв	$\text{Э1} > 0.9$	-
2	“эрозионно-зональные” с долей средне- и сильноэродированных почв менее 0.25	$0.75 \leq \text{Э1} < 0.9$	-
3	“слабоэродированные” с долей средне- и сильноэродированных почв менее 0.5	$0.5 \leq \text{Э1} < 0.75$	-
4	“среднеэродированные” с долей средне- и сильноэродированных почв более 0.5 и преобладанием среднеэродированных над сильноэродированными почвами	$\text{Э1} < 0.5$	$\text{Э2} > \text{Э3}$
5	“сильноэродированные” с долей средне- и сильноэродированных почв более 0.5 и преобладанием сильноэродированных над среднеэродированными почвами	$\text{Э1} < 0.5$	$\text{Э3} > \text{Э2}$

Названия комбинаций почв предложены авторами с учетом развития терминов, использованных в работах Н.П. Сорокиной (2006). Комбинации почв ранжированы в порядке увеличения степени эродированности почв в составе пиксела – от 1 (с наименьшей долей эродированных почв) до 5 (с наибольшей долей эродированных почв). Интерполяция точечных данных, изъятых из таблицы, проводилась методом ближайшего соседа (Nearest neighbor) так же, как и в случае картографирования доминантной категории почв. Подсчет площадей неэродированных и слабоэродированных, средне- и сильноэродированных почв в составе комбинаций почв проводилось на основании таблиц апостериорных вероятностей.

Оценка точности, неопределенности прогноза и идентичности карт

Точность моделей (или пользовательская точность) оценивалась путем сопоставления предсказанной доминантной и фактической (т. е. диагностированной при полевом обследовании) категории эродированности почв в точке полевого опробования. Точность выражена в процентах. Значение неопределенности прогноза и максимальная апостериорная вероятность встречи той или иной категории степени эродированности почв в пикселе вместе дают единицу; чем больше апостериорная вероятность, тем меньше неопределенность прогноза, и наоборот. Значения апостериорных вероятностей прогноза получены в результате применения линейного дискриминантного анализа для модели ФПС и эмпирических функций принадлежности для моделей $ФП_{x,C}$ и $ФП_{x,t,C}$. Идентичность (или соответствие карт) оценено путем сравнения значения пикселей, обладающих одинаковым пространственным положением, но показанных на разных картах; идентичность карт оценена в процентах от всех пикселей карты.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Модель фактор-процесс

Из всех 23 используемых в анализе количественных параметров рельефа и климата значимыми (т. е. обуславливающими пространственную дифференциацию степени эродированности почв) оказались следующие: LS-фактор, относительное превыше-

ние в окрестности (Topographic Position Index (TPI)) 500 и 4 000 метров. LS-фактор характеризует эрозионный потенциал рельефа и рассчитывается как отношение длины склона к размеру водосбора. Чем больше значение LS-фактора, тем больше эрозионный потенциал рельефа. Значение относительного превышения в окрестности определяется путем сравнения значения высоты каждого пикселя со средней высотой в заданной окрестности. Отрицательные значения индекса TPI свидетельствуют о преимущественном накоплении вещества, положительные – о выносе. Отметим, что критерий Фишера для экспозиции склонов оказался очень низким и составил лишь 0.847, вероятно, в связи с относительно небольшим вкладом талого смыва в среднесуточные темпы эрозии почв на данной территории. Пользовательская точность модели составила 78.4%.

Модели $\Phi\Pi_xC$ и $\Phi\Pi_{x,t}C$

Сельскохозяйственное освоение на территории исследования проходило в первую очередь на участках в среднем относительно слабо подверженных ЭА процессам. Расчетные средние темпы эрозии почв на участках с длительностью распашки более 300 лет составили ~4.4 т/га в год; а на участках с длительностью распашки около 170 лет – почти в 2 раза больше ~7.5 т/га в год. Как следствие, различия в степени эродированности почвенного покрова между участками с разной длительностью распашки оказались выражены не очень контрастно на данной территории.

Эмпирические функции принадлежности категорий почв разной степени эродированности и расчетных темпов эрозии почв имеют следующий вид для модели $\Phi\Pi_xC$:

$$\mu_{\Sigma 0} + \Sigma 1 = \exp(-0.05 \cdot x) \quad (1)$$

$$\mu_{\Sigma 2} = -0.2186 + 0.6532 \cdot \log_{10}(x) \quad (2)$$

$$\mu_{\Sigma 3} = -0.0066 + 0.0018 \cdot x \quad (3),$$

где $\mu_{\Sigma 0} + \Sigma 1$ – вероятность долевого участия незероэродированных и слабоэродированных почв;

$\mu_{\Sigma 2}$ – вероятность долевого участия среднеэродированных почв;

$\mu_{Э3}$ – вероятность долевого участия сильноэродированных почв;

x – расчетные темпы эрозии почв.

Пользовательская точность данной модели при предсказании доминантной категории составила 80.9%.

Эмпирические функции принадлежности категорий почв разной степени эродированности и расчетных суммарных эрозионных потерь имеют следующий вид для модели $\Phi P_{x,t}C$:

$$\mu_{Э0} + Э1 = \exp(-0.0026 \cdot x) \quad (4)$$

$$\mu_{Э2} = 0.003 + 0.0026 \cdot x - 2.5251E - 6 \cdot x^2 \quad (5)$$

$$\mu_{Э3} = 0.005 - 4.1928E - 5 \cdot x + 2.7762E - 7 \cdot x^2 \quad (6),$$

где x – расчетные объемы суммарных эрозионных потерь.

Пользовательская точность данной модели при предсказании доминантной категории составила 79.5%.

Карты доминантных категорий степени эродированности почв

На рисунке 3 показаны доминантные категории почв, пространственное положение которых предсказано по моделям ΦC , $\Phi P_x C$ и $\Phi P_{x,t} C$. Несмотря на использование различных моделей при картографировании, можно отметить высокую степень соответствия карт между собой. Более 90% от всей территории пашни Прохоровского района показано одинаковой категорией степени эродированности почв на всех трех картах (предсказанная степень эродированности почв по моделям ΦC и $\Phi P_x C$ совпадает в 91% случаев, ΦC и $\Phi P_{x,t} C$ – в 92% случаев, $\Phi P_x C$ и $\Phi P_{x,t} C$ – в 95% случаев). Преобладающими категориями на всех трех картах (табл. 2) являются незэродированные и слабоэродированные почвы, приуроченные к обширным водораздельным пространствам и пологим склонам с небольшим углом наклона. На их долю, в зависимости от используемой для предсказания модели, приходится от 77 до 79 тыс. га. Среднеэродированные почвы окаймляют крутые участки пахотных склонов и занимают от 6 до 7 тыс. га (преимущественно южная и юго-восточная часть Прохоровского района). Сильноэродированные почвы предсказаны только с использованием

ем моделей $ФП_{\chi}C$ и $ФП_{\chi,t}C$, встречаются локально на склонах крутизной более 5° . Эти почвы занимают 1.3 га на карте $ФП_{\chi}C$ и 682 га на карте $ФП_{\chi,t}C$. Таким образом, общая доля средне- и сильноэродированных почв возрастает в ряду карт, построенных по моделям $FC - ФП_{\chi}C - ФП_{\chi,t}C$.

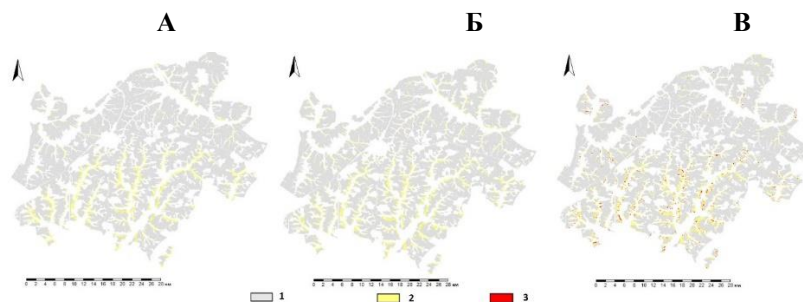


Рис. 3. Карты эродированности почвенного покрова пашни Прохоровского района (1 – незэродированные и слабоэродированные, 2 – среднеэродированные; 3 – сильноэродированные), предсказанные по моделям FC (А), $ФП_{\chi}C$ (Б) и $ФП_{\chi,t}C$ (В). Белым показаны непахотные земли.

Fig. 3. Maps of erosion degree of the arable soil in the Prokhorovsky district (1 – non-eroded and slightly eroded, 2 – moderately eroded; 3 – heavily eroded), predicted by the models FP (А), $FP_{\chi}P$ (Б) and $FP_{\chi,t}P$ (В). Non-arable lands are shown in white.

В предыдущем исследовании ([Жидкин и др., 2021](#)) было проведено сравнение карт доминантных категорий степени эродированности почв пашни Прохоровского района, построенных визуально-экспертным и цифровым методом (с использованием модели $ФП_{\chi}C$). В некоторой степени такое сравнение может являться оценкой адекватности построения карт методами цифрового картографирования. Было выявлено, что карты характеризуются высокой степенью соответствия (идентичность для 75% пикселей карт).

Таблица 2. Площади почв разной степени эродированности пашни Прохоровского района (в тыс. га), по данным применения моделей ФС, FP_xC и $FP_{x,t}C$

Table 2. Areas of soils of varying erosion degree of arable soils in the Prokhorovsky district (in thousand hectares), according to the FP, FP_xC and $FP_{x,t}C$ models

Модель, использованная для создания карты		Площади почв разной степени эродированности (тыс. га)		
		Э1	Э2	Э3
ФС	доминантная категория	79.3	6.1	0
	долевое участие почв в пикселе	72.6	12.5	0.3
FP_xC	доминантная категория	78.2	7.2	0.001
	долевое участие почв в пикселе	70.7	14.2	0.5
$FP_{x,t}C$	доминантная категория	77.7	7	0.7
	долевое участие почв в пикселе	68.9	15.2	1.3

Карты неопределенности прогноза доминантной категории почв

Карты неопределенности прогноза (или максимальной апостериорной вероятности встречи одной из категорий степени эродированности почв, рис. 4), с одной стороны, показывают область применения используемой модели для предсказания доминантной категории почв – т. е. выявляют те участки, в пределах которых можно с большей или меньшей уверенностью говорить о преобладании той или иной почвы в пикселе; с другой стороны, интерпретация карт позволяет говорить о сложности почвенного покрова территории – в случае низкого значения апостериорной вероятности присутствие нескольких категорий почв в пределах пикселя становится более вероятным, а значит, почвенный покров таких пикселей является наиболее сложно устроенным ([Сорокина, Козлов, 2009](#); [Digital., 2008](#)).

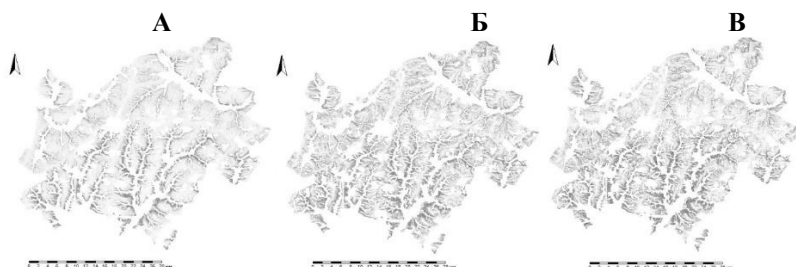


Рис. 4. Неопределенность прогноза доминантной категории почв в пределах пашни Прохоровского района (белым показаны непахотные земли), предсказанной по моделям ФС (А), ФП_хС (Б) и ФП_{х,т}С (В); чем темнее – тем выше неопределенность прогноза и тем меньше максимальная апостериорная вероятность встречи одной из категорий степени эродированности почв.

Fig. 4. The prediction uncertainty of the dominant category of arable soils in the Prokhorovsky district (non-arable lands are shown in white), by the models FP (A), FP_xP (Б) and FP_{x,t}P (В); the darker, the higher the prediction uncertainty and the lower the maximum a posteriori probability of one of the categories of the erosion degree of soils.

Значения неопределенности прогноза на всех трех картах увеличивается в пределах склонов, особенно в их нижних частях. Максимальные значения неопределенности в пределах нижних частей склонов характерны для карты ФП_{х,т}С. Апостериорная вероятность встречи одной из категорий степени эродированности почв превышает 90% для двух третей пашни Прохоровского района при использовании модели ФС. В случае моделей ФП_хС и ФП_{х,т}С такая высокая апостериорная вероятность наблюдается только лишь для двух пятых исследуемой территории. Таким образом, мы наблюдаем разные пространственные особенности неопределенности прогноза модели ФС и моделей ФП_хС, ФП_{х,т}С при их общей высокой пользовательской точности (во всех трех случаях точность превышает 78%).

Наложение сетки размерами 20 × 20 м (параметры используемой в работе ячейки раstra) на детальные почвенные карты при водораздельных и прибалочных склонов Среднерусской возвышенности, опубликованные в работах ([Фишман, 1977](#); [Сорокина,](#)

[1976](#)), показывают, что в пределах этих ячеек встречается, как правило, два и более контура элементарных почвенных ареалов с разной степенью эродированности (например, черноземы типичные слабоэродированные, черноземы типичные карбонатные среднеэродированные и т. д.). Аналогичные особенности (присутствие разных почв по степени эродированности в ячейке размером 20×20 м) характерны для детальных почвенных карт юга Молдавии и Придунайской равнины ([Пугаев, 1976](#); [Годельман, Пугаев, 1979](#)). В упомянутых работах, а также в других ([Сорокина, 1966](#); [Сорокина, 1988](#); [Григорьев, 1975](#); [Васенёва и др., 2000](#)) показано, что при движении от водораздельных поверхностей к приводораздельным и прибалочным склонам происходит заметное усложнение почвенного покрова за счет уменьшения размеров контуров элементарных почвенных ареалов и появления новых компонентов почвенного покрова, в том числе почв разной степени эродированности. Так, наблюдаемое на построенных картах увеличение неопределенности прогноза при движении от водораздельных поверхностей к склонам совпадает с усложнением строения почвенного покрова в этом направлении; следовательно, низкая точность прогноза на прибалочных склонах может быть обусловлена особенностями используемых моделей, а сложностью почвенного покрова этих участков – присутствием разных почв при одинаковых физико-географических условиях (усредненных для полигонов размерами 20×20 м). Увеличение точности предсказания почв (доминантных почвенных категорий) в пределах прибалочных склонов следует ожидать при увеличении пространственного разрешения цифровых данных. При пространственном разрешении, соответствующем 20×20 м, отображение комбинаций почв, а не доминантных почвенных категорий, более полно отражает особенности почвенного покрова приводораздельных и прибалочных склонов агроландшафтов лесостепной зоны, поскольку показывает присутствие разных почв в пределах контуров размерами 20×20 м. На основании визуального сравнения карт неопределенности прогноза можно предположить, что модели ФП_хС и ФП_{х1}С предсказывают более сложное строение почвенного покрова исследуемой территории, чем модель ФС.

Карты комбинаций почв разной степени эродированности

Различия между картами и данными о площади эродированности почв определяются не только использованными моделями (ФС, ФП_хС и ФП_{х,т}С), но и средствами генерализации информации при их отображении на картах. Так, при переходе от доминантных категорий почв к учету долевого участия почв в каждом пикселе отмечается значительное (двукратное) увеличение расчетной площади средне- и сильноэродированных почв в составе почвенного покрова (табл. 2). Это объясняется тем, что, в пикселях с преобладанием незэродированных и слабоэродированных почв данные о сопутствующих средне- и сильноэродированных разностях генерализируются при составлении карты доминантных категорий, что приводит к уменьшению расчетной площади эродированных почв и увеличению доли незэродированных почв на этих картах. Карты комбинаций почв разной степени эродированности являются “промежуточным звеном” между картами доминантных категорий почв и табличной информацией о доле участия почв в каждом пикселе. Необходимо совершенствование картографических подходов для более детального отображения информации о доле участия почв разной степени эродированности на картах.

Карты комбинаций почв разной степени эродированности, полученные на основании использования трех моделей, представлены на рисунке 5, данные о площадях, занимаемых различными комбинациями почв, приведены в таблице 3. Для всех карт наблюдается уменьшение площадей комбинаций почв в порядке: зональные – эрозионно-зональные – слабоэродированные – среднеэродированные – сильноэродированные. При этом площади зональных, эрозионно-зональных и слабоэродированных комбинаций почв, показанные на карте ФС и картах ФП_хС, ФП_{х,т}С, отличаются 1.5–2 раза в сторону большей степени эродированности почв на картах, учитывающих особенности ЭА процессов. Площадь среднеэродированных комбинаций почв на всех трех картах приблизительно одинакова.

Таблица 3. Площади комбинаций почв разной степени эродированности (в тыс. га)

Table 3. Areas of soil combinations with various erosion degrees (thousand hectares)

Комбинации почв разной степени эродированности	Площади комбинаций почв разной степени эродированности (в тыс. га), полученные с использованием разных моделей		
	ФС	ФП _х С	ФП _{х,t} С
зональные	53.3	33.6	36.8
эрозионно-зональные	18.5	30.1	27.2
слабоэродированные	7.4	14.5	14.4
среднеэродированные	6.2	7.2	7
сильноэродированные	0	0.001	0.5

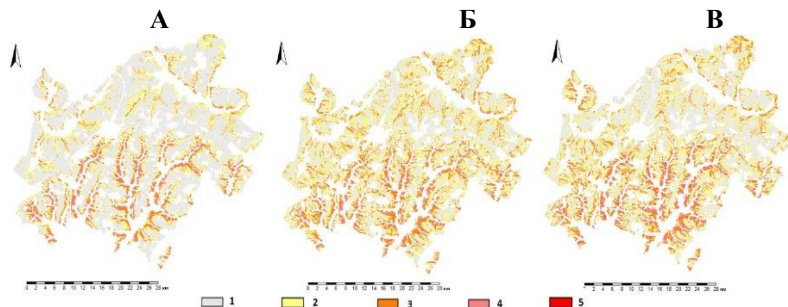


Рис. 5. Карты комбинаций почв разной степени эродированности (1 – зональные, 2 – эрозионно-зональные; 3 – слабоэродированные; 4 – среднеэродированные; 5 – сильноэродированные) в пределах пашины Прохоровского района (белым показаны непахотные земли), предсказанные по моделям ФС (А), ФП_хС (Б) и ФП_{х,t}С (В).

Fig. 5. Maps of combinations of soils with varying erosion degrees (1 – zonal, 2 – erosion-zonal; 3 – slightly eroded; 4 – moderately eroded; 5 – heavily eroded) within the the Prokhorovsky district (non-arable lands are shown in white), predicted by FP models (А), FPsP (Б) and FPs,tP (В).

Визуальное сравнение карт доминантных категорий и карт комбинаций почв разной степени эродированности, построенных на основании одной модели (т. е. сравнение карты доминантной категории (модель ФС) и комбинаций почв (модель ФС), сравнение карты доминантной категории (модель ФП_хС) и комбинаций почв (модель ФП_хС) и т. д.) свидетельствует о практически одинаковом пространственном положении среднеэродированных почв на карте доминантных категорий и среднеэродированных комбинаций на карте комбинаций почв, сильноэродированных почв на карте доминантных категорий и сильноэродированных комбинаций на карте комбинаций почв, а также о близких значениях площадей данных ареалов (табл. 2, 3). Контурсы неэродированных и слабо-эродированных почв, представленные на карте доминантных категорий, разбиваются на три группы (зональные, эрозионно-зональные и слабоэродированные) на карте комбинаций почв.

В отличие от карт доминантных категорий, характеризующихся идентичностью для 90% территории пашни Прохоровского района, карты комбинаций почв отличаются друг от друга в значительно большей мере (табл. 4). Карты, построенные на основе моделей ФП_хС и ФП_{х,г}С, характеризуются большим соответствием друг другу (идентичны в 75.4% пикселей), чем карте, построенной на основании модели ФС (соответствие пикселей в 60%). Как правило, различие между картами в зонах несоответствия слабоконтрастно, наблюдается различие в одну категорию эродированности. Например, если на карте ФС показана “слабоэродированная” комбинация почв, то на карте ФП_хС показана “эрозионно-зональная” или “среднеэродированная” комбинация. При этом на картах, построенных по моделям ФП_хС и ФП_{х,г}С в большинстве случаев (~70% случаев) отображаются комбинации с большей долей эродированных почв в их составе, чем на карте, построенной по модели ФС. При сравнении карт, построенных по моделям ФП_хС и ФП_{х,г}С, комбинации почв с большей долей эродированных компонентов могут быть равновероятно показаны как на карте, учитывающей длительность ЭА процессов, так и без нее. Различия в две и более градаций комбинаций почв по степени эродированности практически не встречаются (табл. 4).

Таблица 4. Матрица соответствия и различия пространственного положения комбинаций почв разной степени эродированности (в процентах)

Table 4. Matrix of correspondence and differences in the spatial position of soil combinations with various erosion degrees (percentage)

	Полное соответствие			Различие в 1 категорию			Различие в 2 категории			Различие в 3 категории		
	ФС	ФП _х С	ФП _{х,t} С	ФС	ФП _х С	ФП _{х,t} С	ФС	ФП _х С	ФП _{х,t} С	ФС	ФП _х С	ФП _{х,t} С
ФС	100	60.7	59.6	0	36.8	36.4	0	2.4	3.7	0	0.1	0.3
ФП _х С	60.7	100	75.4	36.8	0	23.5	2.4	0	0.9	0.1	0	0.1
ФП _{х,t} С	59.6	75.4	100	36.4	23.5	0	3.7	0.9	0	0.3	0.3	0

Максимальное соответствие пространственного положения почвенных комбинаций при разных способах моделирования наблюдается на приводораздельных участках с уклонами менее 1° (рис. 6), поскольку все модели свидетельствуют о слабой эродированности почв на данных участках (соответствие более чем для 95% пикселей). Наибольшие различия отмечаются при сравнении моделей ФС – ФП_хС и ФС – ФП_{х,t}С в верхних частях склонов с уклонами 1–3° – около 60% территории, приуроченной к склонам крутизной 1–3°, представлены разными комбинациями почв на картах ФС и ФП_хС, ФС и ФП_{х,t}С. При увеличении крутизны склонов, различия между картами последовательно уменьшаются. При углах наклона в 5–7° на разных картах показана одна и та же комбинация почв в более чем 70% случаев.

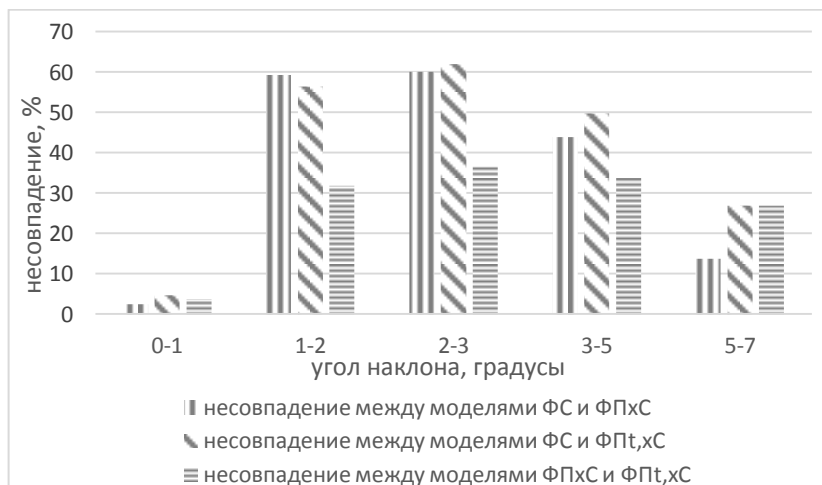


Рис. 6. Площади зон несоответствия (в процентах от всей площади пашни Прохоровского района) комбинаций почв разной степени изэродированности, построенных с использованием моделей ФС, ФПхС и ФПх,tС.

Fig. 6. Areas of inconsistency zones (as a percentage of the total arable land in the Prokhorovsky district) of soil combinations with various erosion degrees, predicted by the models FP, FP_xP and FP_{x,t}P.

Различие карт комбинаций почв, построенных по моделям ФПхС и ФПх,tС, при крутизне более 1° варьирует от 27 до 37% и не связано с углом наклона склона; оно обусловлено длительностью сельскохозяйственного освоения на разных участках исследуемой территории, которая в первую очередь определялась особенностями расселения.

На рисунке 7 представлены результаты наложения карт ФПхС и ФПх,tС друг на друга. Серым цветом показаны участки соответствия карт – несмотря на включение временной составляющей в алгоритм картографирования, комбинации почв (рис. 7А) и доминантная категория почв (рис. 7Б) не изменились. Зоны несоответствия карт друг другу показаны синим и красным цветом; они приурочены к границам перехода одной категории (доминантной категории (рис. 7А) или комбинации почв (рис. 7Б)) к

другой. На участках с меньшей продолжительностью распашки в пределах зон несоответствия показана меньшая степень эродированности на карте $ФП_{x,t}C$, в сравнении с картой $ФП_xC$ (синий цвет); на участках с более продолжительной историей сельскохозяйственного освоения наблюдается обратная картина (красный цвет).

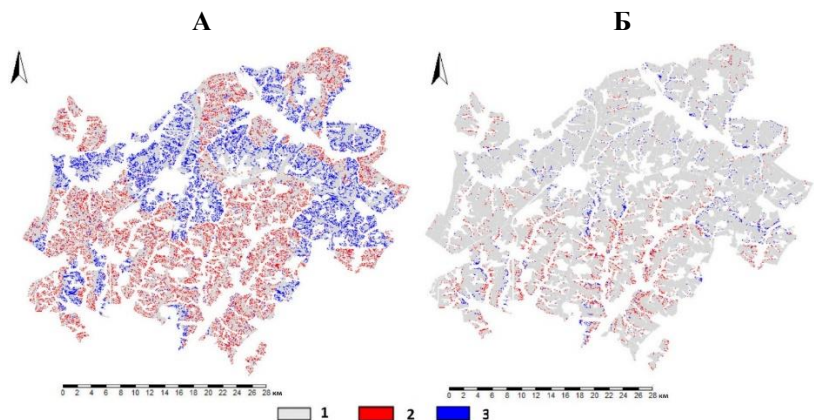


Рис. 7. Наложение карт комбинаций почв разной степени эродированности (А) и доминантных категорий почв (Б), построенных по моделям $ФП_xC$ и $ФП_{x,t}C$; 1 – зоны соответствия, 2 – зоны несоответствия в сторону большей эродированности на карте $ФП_{x,t}C$ в сравнении с картой $ФП_xC$, 3 – зоны несоответствия в сторону меньшей эродированности на карте $ФП_{x,t}C$ в сравнении с картой $ФП_xC$.

Fig. 7. Overlay of maps of soil combinations with various erosion degrees (А) and dominant categories of soils (Б), predicted by the models $ФП_xP$ and $ФП_{x,t}P$; 1 – zones of accordance, 2 – zones of inconsistency – more eroded on the $ФП_{x,t}P$ map in comparison with the $ФП_xS$ map, 3 – zones of inconsistency – less eroded on the $ФП_{x,t}P$ map in comparison with the $ФП_xS$ map.

Размеры зон несоответствия (протяженность вдоль склонов) варьируют от 20 до 300 м на картах комбинаций почв и от 20 до 100 м на картах доминантных категорий. Использование комбинаций почв разной степени эродированности в качестве объектов картографирования позволяет выделить на исследуемом участке

зоны несоответствия не только в пределах прибалочных склонов (как и при использовании доминантных категорий), но и на выровненной субгоризонтальной поверхности. Учет длительности распашки в алгоритме цифрового почвенного картографирования приводит к корректировке границ распространения различных доминантных категорий/комбинаций почв разной степени эродированности, при этом содержание основных (расположенных в центре контура) частей этих доминантных категорий/комбинаций почв в пределах исследуемого участка не затрагивается.

ВЫВОДЫ

В результате проведенной работы по цифровому картографированию степени эродированности почв пашни Прохоровского района, основанному на моделях фактор – свойство (ФС), фактор – процесс – свойство без учета длительности распашки (ФП_хС) и фактор – процесс – свойство с учетом длительности распашки (ФП_{х,t}С), можно сделать следующие выводы:

- цифровые методы картографирования доминантной категории степени эродированности почв, основанные на моделях ФС, ФП_хС и ФП_{х,t}С, обладают высокой пользовательской точностью, о чем свидетельствует сравнение предсказанных и наблюдаемых в точках полевого опробования значениях степени эродированности почв (точность выше 78% для всех трех моделей);

- карты доминантных почвенных категорий, построенные с использованием разных моделей, характеризуются высокой степенью соответствия друг другу (идентичность предсказания для ~90% пикселей); преобладающими по площади доминантными категориями на исследованной территории являются незэродированные и слабоэродированные почвы. При этом отмечается увеличение степени эродированности почвенного покрова в ряду карт, построенных по моделям ФС – ФП_хС – ФП_{х,t}С. Сильноэродированные почвы были выделены только при использовании модели ФП_{х,t}С;

- при картографировании комбинаций почв разной степени эродированности идентичность пикселей отмечена в 60% случаев для карт ФС и ФП_хС, ФС и ФП_{х,t}С, в 75% случаев для карт ФП_хС и ФП_{х,t}С. Площади зональных, эрозионно-зональных и слабоэроди-

рованных комбинаций почв, показанные на карте ФС и картах $\Phi\Pi_{\text{х}}\text{С}$, $\Phi\Pi_{\text{х,t}}\text{С}$ отличаются в 1.5–2 раза в сторону большей степени эродированности почв на картах $\Phi\Pi_{\text{х}}\text{С}$ и $\Phi\Pi_{\text{х,t}}\text{С}$. При этом площадь среднеэродированных комбинаций почв на всех трех картах приблизительно одинакова. Преобладающими комбинациями почв во всех трех случаях являются комбинации с долей средне- и сильноэродированных почв менее 0.1 (зональная комбинация почв);

- в зонах несоответствия карт комбинаций почв разной степени эродированности, построенных с использованием разных моделей, различия являются слабоконтрастными. Как правило, наблюдаются отличия в одну категорию степени эродированности почв. На картах ФС в большинстве случаев (~70% случаев) показана меньшая степень эродированности, чем на картах, построенных по моделям $\Phi\Pi_{\text{х}}\text{С}$ и $\Phi\Pi_{\text{х,t}}\text{С}$. В случае последних комбинации почв с большей долей средне- и сильноэродированных почв могут равновероятно быть показаны как на карте, учитывающей историю распашки, так и без нее;

- традиционно принято считать, что одним из ведущих факторов, определяющих эродированность почвенного покрова, является длительность распашки. Однако на данной территории сельскохозяйственное освоение проходило в первую очередь на участках, слабо подверженных эрозии. Расчетные темпы эрозии почв на участках с высокой длительностью распашки (освоенные в 1600–1780 гг.) оказались почти в 2 раза ниже по сравнению с участками с непродолжительной распашкой (освоенные в 1780–1880 гг.). Как следствие, различия в степени эродированности почвенного покрова между участками с разной длительностью распашки выражены неконтрастно. Поэтому карты, построенные на основе моделей $\Phi\Pi_{\text{х}}\text{С}$ и $\Phi\Pi_{\text{х,t}}\text{С}$, для данной территории оказались достаточно близки между собой, а зоны несоответствия приурочены к границам перехода от одной категории к другой и почти не затрагивают центральные части контуров.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Белеванцев В.Г., Чендев Ю.Г.* Картографический анализ социальных и природных явлений на территории Белгородской области в XVIII, XIX и XX вв. // Проблемы природопользования и экологическая ситуация в Европейской России и сопредельных странах. Белгород: “ПОЛИТЕРРА”, 2015. С. 6–16.
2. *Васенёва Э.Г., Васенёв И.И., Щербаков А.П., Шнуг Э., Хансклаус С.* Внутрипольная пестрота почвенного покрова и урожайности в центре черноземной зоны России // Антропогенная эволюция черноземов. Воронеж: ВГУ, 2000. С. 330–362.
3. *Годельман Я.М., Пугаев А.П.* Классификация, систематика и картография структуры почвенного покрова Придунайской равнины // Почвоведение. 1979. № 10. С. 34–45.
4. Государственный (национальный) доклад о состоянии и использовании земель в Российской Федерации в 2018 году. Росреестр, 2019. 198 с.
5. *Григорьев Г.И.* Элементарная структура почвенного покрова // Бюллетень почвенного института имени В.В. Докучаева. 1975. Вып. VIII. С. 6–16.
6. *Докучаев В.В.* Русский чернозем: Отчет Вольному экономическому обществу. СПб: тип. Деклерона и Евдокимова, 1883. 376 с.
7. *Жидкин А.П., Геннадиев А.Н., Кошовский Т.С., Чендев Ю.Г.* Пространственно-временные параметры латеральной миграции твердофазного вещества почв (Белгородская область) // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. География. 2016. № 3. С. 9–17.
8. *Жидкин А.П., Смирнова М.А., Геннадиев А.Н., Лукин С.В., Заздравных Е.А., Лозбенев Н.И.* Цифровое моделирование строения и степени эродированности почвенного покрова (Прохоровский район Белгородской области) // Почвоведение. 2021 (в печати).
9. *Заздравных Е.А.* Пространственно-временные особенности трансформации пахотных почв лесостепи на юге Среднерусской возвышенности. Дис. ... канд. геогр. наук. Белгород, 2017. 200 с.
10. *Карпачевский Л.О., Яшин И.М.* Итоги первой всероссийской конференции “Лизиметрические исследования почв” // Почвоведение. 1999. № 10. С. 1291–1294.
11. *Козлов Д.Н., Жидкин А.П., Лозбенев Н.И.* Цифровое картографирование эрозионных структур почвенного покрова на основе имитационной модели смыва (северная лесостепь Среднерусской возвышенности) // Бюллетень Почвенного института имени

В.В. Докучаева. 2019. № 100. С. 5–29. DOI: [10.19047/0136-1694-2019-100-5-35](https://doi.org/10.19047/0136-1694-2019-100-5-35).

12. Лукин С.В. Агроэкологическое состояние и продуктивность почв Белгородской области. Белгород: КОНСТАНТА, 2016. 344 с.

13. Общесоюзная инструкция по почвенным обследованиям и составлению крупномасштабных почвенных карт землепользований. М.: Колос, 1973. 48 с.

14. Пугаев А.П. Отображение неоднородности почвенного покрова юга Молдавии на детальных почвенных картах // Почвоведение. 1979. № 3. С. 28–34.

15. Соловichenko В.Д., Тютюнов С.И., Уваров Г.И. Методика проведения почвенно-эрозионного обследования склоновых земель Белгородской области. Белгород: “Отчий край”, 2014. 44 с.

16. Сорокина Н.П. Статистический метод оценки смывости на примере мощных типичных черноземов Курской опытной станции // Почвоведение. 1966. № 2. С. 91–96.

17. Сорокина Н.П. Элементарные почвенные структуры на полях Курской опытной станции // Крупномасштабная картография почв и ее значение в сельском хозяйстве черноземной зоны. Науч. тр. Почв. ин-та им. В.В. Докучаева. М.: Почв ин-т им. В.В. Докучаева, 1976. С. 155–173.

18. Сорокина Н.П. Динамика почвенного покрова распаханного склона Курской опытной станции за 20-летний период // Региональные модели плодородия почв как основа совершенствования зональных систем земледелия. М., 1988. С. 163–171.

19. Сорокина Н.П. Методология составления крупномасштабных агроэкологически ориентированных почвенных карт. М.: Почв. ин-т им. В.В. Докучаева, 2006. 159 с.

20. Сорокина Н.П., Козлов Д.Н. Опыт цифрового картографирования структуры почвенного покрова // Почвоведение. 2009. № 2. С. 198–210.

21. Фишман М.И. Черноземные комплексы и их связь с рельефом на Среднерусской возвышенности // Почвоведение. 1977. № 5. С. 17–30.

22. Чендев Ю.Г. Эволюция лесостепных почв Среднерусской возвышенности в голоцене. М.: ГЕОС, 2008. 212 с.

23. Чендев Ю.Г., Геннадиев А.Н., Белеванцев В.Г., Жидкин А.П. Особенности изменения естественной растительности в результате многовекового хозяйственного освоения юга Среднерусской возвышенности // Проблемы природопользования и экологическая ситуация в Европейской России и сопредельных странах. Белгород: “ПОЛИТЕРРА”, 2015. С. 145–155.

24. Чендев Ю.Г., Петин А.Н. Изучение и оценка показателей антропогенной деградации природно-ресурсного потенциала на юге

лесостепи Среднерусской возвышенности // Геология, география и глобальная энергия. 2008. № 2 (29). С. 112–121.

25. *Чендев Ю.Г.* Изменение во времени компонентов географической среды Белгородской области. Белгород: Изд-во БелГУ, 1997. 84 с.

26. *Чендев Ю.Г., Петин А.Н.* Естественные изменения и техногенная трансформация компонентов окружающей среды староосвоенных регионов (на примере Белгородской области). М.: МГУ, 2006. 123 с.

27. Элементарные почвообразовательные процессы: Опыт концептуального анализа, характеристика, систематика. М.: Наука, 1992. 184 с.

28. Agricultural Baseline Projections to 2013, Staff Report WAOB-2004-1. Office of the Chief Economist, US Department of Agriculture, 2004.

29. *Alewell C., Borrelli P., Meusburger K., Panagos P.* Using the USLE : Chances, challenges and limitations of soil erosion modelling // International Soil and Water Conservation Research. 2019. Vol. 7 (3). P. 203–225. DOI: [10.1016/j.iswcr.2019.05.004](https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2019.05.004).

30. *Angelini M.E., Heuvelink G.B.M.* Including spatial correlation in structural equation modelling of soil properties // Spat. Stat. 2018. Vol. 25. P. 35–51. DOI: [10.1016/j.spasta.2018.04.003](https://doi.org/10.1016/j.spasta.2018.04.003).

31. *Angelini M.E., Heuvelink G.B.M., Kempen B.* Multivariate mapping of soil with structural equation modelling // European J. of Soil Science. 2017. Vol. 68 (5). P. 575–591. DOI: [10.1111/ejss.12446](https://doi.org/10.1111/ejss.12446).

32. *Angelini M.E., Heuvelink G.B.M., Kempen B., Morras H.J.M.* Mapping the soils of an Argentine Pampas region using structural equation modelling // Geoderma. 2016. Vol. 281. P. 102–118. DOI: [10.1016/j.geoderma.2016.06.031](https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2016.06.031).

33. *Arrouays D., Mcbratney A., Bouma J., Libohova Z., Richer-de-forges A.C., Morgan C.L.S. et al.* Impressions of digital soil maps : The good, the not so good, and making them ever better // Geoderma Regional. 2020. Vol. e00255. DOI: [10.1016/j.geodrs.2020.e00255](https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2020.e00255).

34. *Bockheim J.G., Gennadiyev A.N.* The value of controlled experiments in studying soil-forming processes: A review // Geoderma. 2009. Vol. 152. № 3–4. P. 208–217. DOI: [10.1016/j.geoderma.2009.06.019](https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2009.06.019).

35. *Bui E.N., Hancock G.J., Wilkinson N.S.* ‘Tolerable’ hillslope soil erosion rates in Australia: Linking science and policy // Agriculture, Ecosystems & Environment. 2011. Vol. 144. Iss. 1. P. 136–149. DOI: [10.1016/j.agee.2011.07.022](https://doi.org/10.1016/j.agee.2011.07.022).

36. *Chaplot V., Lorentz S., Podwojewski P., Jewitt G.* Digital mapping of A-horizon thickness using the correlation between various soil properties and soil apparent electrical resistivity // Geoderma. 2010. Vol. 157. Iss. 3–4. P. 154–164. DOI: [10.1016/j.geoderma.2010.04.006](https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2010.04.006).

37. Decision X/2 strategic plan for biodiversity 2011–2020 and the aichi biodiversity targets. Nagoya. 2012. URL: <https://www.cbd.int/sp/>.
38. Digital soil mapping with limited data / A. Hartemink, A. McBratney, L.M. Mendosa-Sanyos (Eds). Springer. 2008. 445 p.
39. *Dotterweich M.* The history of human-induced soil erosion: Geomorphic legacies, early descriptions and research, and the development of soil conservation – A global synopsis // *Geomorphology*. 2013. Vol. 201. P. 1–34. DOI: [10.1016/j.geomorph.2013.07.021](https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2013.07.021).
40. *Flanagan D.* Pedotransfer functions for soil erosion models // *Developments in Soil Science*. 2004. Vol. 30. P. 177–193. DOI: [10.1016/S0166-2481\(04\)30011-5](https://doi.org/10.1016/S0166-2481(04)30011-5).
41. *Guerra C.A., Pinto-Correia T., Metzger M.J.* Mapping Soil Erosion Prevention Using an Ecosystem Service Modeling Framework for Integrated Land Management and Policy // *Ecosystems*. 2014. Vol. 17. P. 878–889. DOI: [10.1007/s10021-014-9766-4](https://doi.org/10.1007/s10021-014-9766-4).
42. *Lozbenov N., Smirnova M., Bocharnikov M., Kozlov D.* Digital Mapping of Habitat for Plant Communities Based on Soil Functions: A Case Study in the Virgin Forest-Steppe of Russia // *Soil Systems*. 2019. No. 3. P. 19. DOI: [10.3390/soilsystems3010019](https://doi.org/10.3390/soilsystems3010019).
43. *Ma Y., Minasny B., Malone B.P., Mcbratney A.* Pedology and digital soil mapping (DSM) // *Eur. J. of Soil Sci.* 2019. Vol. 70. P. 216–235. DOI: [10.1111/ejss.12790](https://doi.org/10.1111/ejss.12790).
44. *Martinez-Mena M., Carrillo-Lopez E., Boix-Fayos C., Almagro M., Garcia Franco N., Diaz-Pereira E., Montoya I., de Vente J.* Long-term effectiveness of sustainable land management practices to control runoff, soil erosion, and nutrient loss and the role of rainfall intensity in Mediterranean rainfed agroecosystems // *Catena*. 2020. Vol. 187. P. 104352. DOI: [10.1016/j.catena.2019.104352](https://doi.org/10.1016/j.catena.2019.104352).
45. *McBratney A.B., Santos M.L.M., Minasny B.* On digital soil mapping // *Geoderma*. 2003. Vol. 117. P. 3–52. DOI: [10.1016/S0016-7061\(03\)00223-4](https://doi.org/10.1016/S0016-7061(03)00223-4).
46. *Minasny B., McBratney A.* Digital soil mapping: a brief history and some lessons // *Geoderma*. 2016. Vol. 264. P. 301–311. DOI: [10.1016/j.geoderma.2015.07.017](https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2015.07.017).
47. *Sommer M., Augustin J., Kleber M.* Feedbacks of soil erosion on SOC patterns and carbon dynamics in agricultural landscapes – The CarboZALF experiment // *Soil and Tillage Research*. 2016. Vol. 156. P. 182–184. DOI: [10.1016/j.still.2015.09.015](https://doi.org/10.1016/j.still.2015.09.015).
48. Thematic Strategy for Soil Protection (COM2006.231). Communication from the Commission to the Council, the European Parliament, the European Economic and Social Committee and the Committee of Regions. Brussels,

2006. URL: <https://www.eea.europa.eu/policy-documents/soil-thematic-strategy-com-2006-231>.

49. Transforming our world: The 2030 agenda for sustainable development, 2015. URL:

<https://sustainabledevelopment.un.org/content/documents/21252030%20Agenda%20for%20Sustainable%20Development%20web.pdf>.

50. Van der Kroef I., Koszinski S., Grinat M. Digital mapping of buried soil horizons using 2D and pseudo-3D geoelectrical measurements in a ground moraine landscape // Eur J Soil Sci. 2020. Vol. 71. P. 10–26. DOI: [10.1111/ejss.12842](https://doi.org/10.1111/ejss.12842).

51. Van Oost K., Govers G., Desmet P. Evaluating the effects of changes in landscape structure on soil erosion by water and tillage // Landscape Ecology. 2000. Vol. 15. P. 577–589. DOI: [10.1023/A:1008198215674](https://doi.org/10.1023/A:1008198215674).

52. Van Rompay A., Verstraeten G., Van Oost K., Govers G., Poesen J. Modelling mean annual sediment yield using a distributed approach // Earth Surface Processes and Landforms. 2001. Vol. 26 (11). P. 1221–1236. DOI: [10.1002/esp.275](https://doi.org/10.1002/esp.275).

53. Vanwalleghem T., Gomez J.A., Infante Amate J., Gonzalez de Molina, M., Vanderlinden, K., Guzman G., Laguna A., Giraldez J.V. Impact of historical land use and soil management change on soil erosion and agricultural sustainability during the Anthropocene // Anthropocene. 2017. Vol.17. P.13–39. DOI: [10.1016/j.ancene.2017.01.002](https://doi.org/10.1016/j.ancene.2017.01.002).

54. Webster R., Burrough P.A. Multiple discriminant analysis in soil survey // European Journal of Soil Science. 1974. Vol. 25 (1). P. 120–134

55. Yaghoobi A., Khalilimoghdam B., Saedi T., Rahnama M. The effect of enclosure management on the reduction of SOC loss due to splash erosion in gypsiferous soils in Southwestern Iran // Geoderma. 2018. Vol. 319. P. 34–42. DOI: [10.1016/j.geoderma.2017.12.037](https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.12.037).

REFERENCES

1. Belevancev V.G., Chendev Ju.G., Problemy prirodopol'zovaniya i jekologicheskaja situacija v Evropejskoj Rossii i sopredel'nyh stranah (Cartographic analysis of social and natural phenomena on the territory of the Belgorod region in the 18th, 19th and 20th centuries), In: *Problemy prirodopol'zovaniya i jekologicheskaja situacija v Evropejskoj Rossii i sopredel'nyh stranah* (Problems of nature management and the ecological situation in European Russia and neighboring countries), Belgorod: “POLITERRA”, 2015. pp. 6–16.

2. Vaseneva E.G., Vasenev I.I., Shcherbakov A.P., Shnug E., Khansklaus S., Vnutripol'naya pestrota pochvennogo pokrova i urozhainosti v tsentre

chernozemnoi zony Rossii (Intra-field variegation of soil cover and yield in the center of the chernozem zone of Russia), In: *Antropogennaya evolyutsiya chernozemov* (Anthropogenic evolution of chernozems), Voronezh: VGU, 2000, pp. 330–362.

3. Godel'man Ya.M., Pugaev A.P., Klassifikatsiya, sistematika i kartografiya struktury pochvennogo pokrova Pridunaiskoi ravniny (Classification, taxonomy and cartography of the soil cover pattern of the Danube plain), *Pochvovedenie*, 1979, No. 10, pp. 34–45.

4. *Gosudarstvennyi (natsional'nyi) доклад o sostoyanii i ispol'zovanii zemel' v Rossiiskoi Federatsii v 2018 godu* (State (national) report on the state and use of land in the Russian Federation in 2018), Rosreestr, 2019, 198 p.

5. Grigor'ev G.I., Elementarnaya struktura pochvennogo pokrova (Elementary soil cover pattern), *Dokuchaev Soil Bulletin*, 1975, Vol. VIII, pp. 6–16.

6. Dokuchaev V.V., *Russkii chernozem: (Otchet Vol'nomu ekonomicheskomu obshchestvu)* (Russian chernozem: (Report to the Free Economic Society)), St. Petersburg: tip. Deklerona i Evdokimova, 1883, 376 p.

7. Zhidkin A.P., Gennadiyev A.N., Koshovskii T.S., Chendev Yu.G., Prostranstvenno-vremennye parametry lateral'noi migratsii tverdogaznogo veshchestva pochv (Belgorodskaya oblast') (Spatio-temporal parameters of the lateral migration of solid-phase soil matter (Belgorod Region), *Vestn. Mosk. un-ta. Ser. 5. Geografiya*, 2016, No. 3, pp. 9–17.

8. Zhidkin A.P., Smirnova M.A., Gennadiyev A.N., Lukin S.V., Zazdravnykh E.A., Lozbenyev N.I., Digital modeling of pattern and erosion degree of soil cover pattern (Prokhorovskij district of Belgorod region), *Eurasean soil science*, 2021 (in print).

9. Zazdravnykh E.A., *Prostranstvenno-vremennye osobennosti transformatsii pakhotnykh pochv lesostepi na yuge Srednerusskoi vozvyshennosti: Dis. ... kand. geogr. nauk* (Spatial-temporal features of the transformation of arable soils of the forest-steppe in the south of the Central Russian Upland, Cand. geogr. sci. thesis), Belgorod, 2017, 200 p.

10. Karpachevskii L.O., Yashin I.M., Itogi pervoi vserossiiskoi konferentsii “Lizimetricheskie issledovaniya pochv” (Results of the first Russian conference “Lysimetric studies of soils”), *Pochvovedenie*, 1999, No. 10, pp. 1291–1294.

11. Kozlov D.N., Zhidkin A.P., Lozbenyev N.I., Digital mapping of soil cover eroded patterns on the basis of soil erosion simulation model (northern foreststeppe of the Central Russian Upland), *Dokuchaev Soil Bulletin*, 2019, Vol. 100, pp. 5–35, DOI: [10.19047/0136-1694-2019-100-5-35](https://doi.org/10.19047/0136-1694-2019-100-5-35).

12. Lukin S.V., *Agroekologicheskoe sostoyanie i produktivnost' pochv Belgorodskoi oblasti* (Agroecological state and soil productivity of the Belgorod region), Belgorod: KONSTANTA, 2016, 344 p.
13. *Obshchesoyuznaya instruktsiya po pochvennym obsledovaniyam i sostavleniyu krupnomasshtabnykh pochvennykh kart zemlepol'zovaniy* (USSR Instruction on Soil Investigations and Compilation of Large-Scale Soil Maps of Land Use), Moscow: Kolos, 1973, 48 p.
14. Pugaev A.P., *Otobrazhenie neodnorodnosti pochvennogo pokrova yuga Moldavii na detal'nykh pochvennykh kartakh* (Display of soil cover heterogeneity in the south of Moldova on detailed soil maps), *Pochvovedenie*, 1979, No. 3, pp. 28–34.
15. Solovichenko V.D., Tyutyunov S.I., Uvarov G.I., *Metodika provedeniya pochvenno-erozionnogo obsledovaniya sklonovykh zemel' Belgorodskoi oblasti* (Methodology for soil erosion survey of the slope lands of the Belgorod region), Belgorod: “Otchii krai”, 2014, 44 p.
16. Sorokina N.P., *Statisticheskii metod otsenki smytosti na primere moshchnykh tipichnykh chernozemov Kurskoi opytnoi stantsii* (Statistical method for assessing washout on the example of powerful typical chernozems of the Kursk experimental station), *Pochvovedenie*, 1966, No. 2, pp. 91–96.
17. Sorokina N.P., *Elementarnye pochvennye struktury na polyakh Kurskoi opytnoi stantsii* (Elementary soil structures in the fields of the Kursk Experimental Station), *Krupnomasshtabnaya kartografiya pochv i ee znachenie v sel'skom khozyaistve chernozemnoi zony* (Large-scale soil mapping and its importance in agriculture in the chernozem zone), *Nauchnye trudy Pochvennogo instituta imeni V.V. Dokuchaeva* (Scientific works of the V.V. Dokuchaev Soil Science Institute), Moscow, 1976. pp. 155–173.
18. Sorokina N.P., *Dinamika pochvennogo pokrova raspakhannogo sklona Kurskoi opytnoi stantsii za 20-letnii period* (Dynamics of the soil cover of the plowed slope of the Kursk experimental station over a 20-year period), In: *Regional'nye modeli plodorodiya pochv kak osnova sovershenstvovaniya zonal'nykh sistem zemledeliya* (Regional models of soil fertility as the basis for improving zonal farming systems), Moscow, 1988, pp. 163–171.
19. Sorokina N.P., *Metodologiya sostavleniya krupnomasshtabnykh agroekologicheskii orientirovannykh pochvennykh kart* (Methodology for the compilation of large-scale agroecologically oriented soil maps), Moscow: Dokuchaev Soil Science Institute, 2006, 159 p.
20. Sorokina N.P., Kozlov D.N., *Experience in digital mapping of soil cover patterns*, *Eurasian Soil Science*, 2009, Vol. 42, pp. 182–193, DOI: [10.1134/S1064229309020094](https://doi.org/10.1134/S1064229309020094).
21. Fishman M.I., *Chernozemnye komplekсы i ikh svyaz' s rel'efom na Srednerusskoi vozvyshennosti* (Chernozem complexes and their relationship

with the relief on the Central Russian Upland), *Pochvovedenie*, 1977, No. 5, pp. 17–30.

22. Chendev Yu.G., *Evolutsiya lesostepnykh pochv Srednerusskoi vozvyshennosti v golotsene* (Evolution of forest-steppe soils of the Central Russian Upland in the Holocene), Moscow: GEOS, 2008. 212 p.

23. Chendev Yu.G., Gennadiev A.N., Belevancev V.G., Zhidkin A.P., Osobennosti izmeneniya estestvennoj rastitel'nosti v rezul'tate mnogovekovogo hozjajstvennogo osvoeniya juga Srednerusskoi vozvyshennosti (Features of changes in natural vegetation as a result of centuries-old economic development of the south of the Central Russian Upland), In: *Problemy prirodnopol'zovaniya i ekologicheskaya situacija v Evropejskoj Rossii i sopredel'nyh stranah* (Problems of natural resources and the ecological situation in European Russia and neighboring countries), Belgorod: "POLITERA", 2015, pp. 145–155.

24. Chendev Ju.G., Petin A.N., *Izuchenie i ocenka pokazatelej antropogennoj degradacii prirodno-resurnogo potentsiala na jube lesostepi Srednerusskoi vozvyshennosti* (Study and assessment of indicators of anthropogenic degradation of natural resource potential in the south of the forest-steppe of the Central Russian Upland), *Geologija, geografija i global'naja jenergiya*, 2008, No. 2 (29), pp. 112–121.

25. Chendev Yu.G., *Izmenenie vo vremeni komponentov geograficheskoi sredy Belgorodskoj oblasti* (Changes in time of the components of the geographic environment of the Belgorod region), Belgorod: Izd-vo BelGU, 1997, 84 p.

26. Chendev, Yu.G., Petin A.N., *Estestvennye izmeneniya i tehnogennaja transformacija komponentov okruzhajushhej sredy staroosvoennykh regionov (na primere Belgorodskoj oblasti)* (Natural changes and technogenic transformation of environmental components of old-developed regions (on the example of the Belgorod region).), Moscow: MSU, 2006, 123 p.

27. *Elementarnye pochvoobrazovatel'nye protsessy: Opyt kontseptual'nogo analiza, kharakteristika, sistematika* (Elementary soil-forming processes: Experience of conceptual analysis, characteristics, taxonomy), Moscow: Nauka, 1992, 184 p.

28. *Agricultural Baseline Projections to 2013*, Staff Report WAOB-2004-1, Office of the Chief Economist, US Department of Agriculture, 2004.

29. Alewell C., Borrelli P., Meusburger K., Panagos P., Using the USLE : Chances, challenges and limitations of soil erosion modelling, *International Soil and Water Conservation Research*, 2019, Vol. 7 (3), pp. 203–225, DOI: [10.1016/j.iswcr.2019.05.004](https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2019.05.004).

30. Angelini M.E., Heuvelink G.B.M., Including spatial correlation in structural equation modelling of soil properties, *Spat. Stat*, 2018, Vol. 25, pp. 35–51, DOI: [10.1016/j.spasta.2018.04.003](https://doi.org/10.1016/j.spasta.2018.04.003).

31. Angelini M.E., Heuvelink G.B.M., Kempen B., Multivariate mapping of soil with structural equation modelling, *European J. of Soil Science*, 2017, Vol. 68 (5), pp. 575–591, DOI: [10.1111/ejss.12446](https://doi.org/10.1111/ejss.12446).
32. Angelini M.E., Heuvelink G.B.M., Kempen B., Morras H.J.M., Mapping the soils of an Argentine Pampas region using structural equation modelling, *Geoderma*, 2016, Vol. 281, pp. 102–118, DOI: [10.1016/j.geoderma.2016.06.031](https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2016.06.031).
33. Arrouays D., Mcbratney A., Bouma J., Libohova Z., Richer-de-forges A.C., Morgan C.L.S. et al., Impressions of digital soil maps : The good , the not so good, and making them ever better, *Geoderma Regional*, 2020, Vol. e00255, DOI: [10.1016/j.geodrs.2020.e00255](https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2020.e00255).
34. Bockheim J.G., Gennadiyev A.N., The value of controlled experiments in studying soil-forming processes: A review, *Geoderma*, 2009, Vol. 152, No. 3–4, pp. 208–217, DOI: [10.1016/j.geoderma.2009.06.019](https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2009.06.019).
35. Bui E.N., Hancock G.J., Wilkinson N.S., ‘Tolerable’ hillslope soil erosion rates in Australia: Linking science and policy, *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2011, Vol. 144, Issue 1, pp. 136–149, DOI: [10.1016/j.agee.2011.07.022](https://doi.org/10.1016/j.agee.2011.07.022).
36. Chaplot V., Lorentz S., Podwojewski P., Jewitt G., Digital mapping of A-horizon thickness using the correlation between various soil properties and soil apparent electrical resistivity, *Geoderma*, 2010, Vol. 157, Iss. 3–4, pp. 154–164, DOI: [10.1016/j.geoderma.2010.04.006](https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2010.04.006).
37. Decision X/2 strategic plan for biodiversity 2011–2020 and the aichi biodiversity targets, Nagoya, 2012, URL: <https://www.cbd.int/sp/>.
38. Hartemink A., McBratney A., Mendosa-Sanyos L.M. (Eds), *Digital soil mapping with limited data*, Springer, 2008, 445 p.
39. Dotterweich M., The history of human-induced soil erosion: Geomorphic legacies, early descriptions and research, and the development of soil conservation – A global synopsis, *Geomorphology*, 2013, Vol. 201, P. 1–34, DOI: [10.1016/j.geomorph.2013.07.021](https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2013.07.021).
40. Flanagan D., Pedotransfer functions for soil erosion models, *Developments in Soil Science*, 2004, Vol. 30, pp. 177–193, DOI: [10.1016/S0166-2481\(04\)30011-5](https://doi.org/10.1016/S0166-2481(04)30011-5).
41. Guerra C.A., Pinto-Correia T., Metzger M.J., Mapping Soil Erosion Prevention Using an Ecosystem Service Modeling Framework for Integrated Land Management and Policy, *Ecosystems*, 2014, Vol. 17, pp. 878–889, DOI: [10.1007/s10021-014-9766-4](https://doi.org/10.1007/s10021-014-9766-4).
42. Lozbennev N., Smirnova M., Bocharnikov M., Kozlov D. Digital Mapping of Habitat for Plant Communities Based on Soil Functions: A Case Study in the Virgin Forest-Steppe of Russia, *Soil Systems*, 2019, No. 3, 19 p., DOI: [10.3390/soilsystems3010019](https://doi.org/10.3390/soilsystems3010019).

43. Ma Y., Minasny B., Malone B.P., Mcbratney A., Pedology and digital soil mapping (DSM), *Eur. J. of Soil Science*, 2019, Vol. 70, pp. 216–235, DOI: [10.1111/ejss.12790](https://doi.org/10.1111/ejss.12790).
44. Martinez-Mena M., Carrillo-Lopez E., Boix-Fayos C., Almagro M., García Franco N., Diaz-Pereira E., Montoya I., de Vente J., Long-term effectiveness of sustainable land management practices to control runoff, soil erosion, and nutrient loss and the role of rainfall intensity in Mediterranean rainfed agroecosystems, *Catena*, 2020, Vol. 187, 104352. DOI: [10.1016/j.catena.2019.104352](https://doi.org/10.1016/j.catena.2019.104352).
45. McBratney A.B., Santos M.L.M., Minasny B., On digital soil mapping, *Geoderma*, 2003, Vol. 117, pp. 3–52, DOI: [10.1016/S0016-7061\(03\)00223-4](https://doi.org/10.1016/S0016-7061(03)00223-4).
46. Minasny B., McBratney A., Digital soil mapping: a brief history and some lessons, *Geoderma*, 2016, Vol. 264, pp. 3013–311, DOI: [10.1016/j.geoderma.2015.07.017](https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2015.07.017).
47. Sommer M., Augustin J., Kleber M. Feedbacks of soil erosion on SOC patterns and carbon dynamics in agricultural landscapes – The CarboZALF experiment, *Soil and Tillage Research*, 2016, Vol. 156, pp. 182–184, DOI: [10.1016/j.still.2015.09.015](https://doi.org/10.1016/j.still.2015.09.015).
48. Thematic Strategy for Soil Protection (COM2006.231). Communication from the Commission to the Council, the European Parliament, the European Economic and Social Committee and the Committee of Regions. Brussels, 2006, URL: <https://www.eea.europa.eu/policy-documents/soil-thematic-strategy-com-2006-231>.
49. Transforming our world: The 2030 agenda for sustainable development, 2015, URL: <https://sustainabledevelopment.un.org/content/documents/21252030%20Agenda%20for%20Sustainable%20Development%20web.pdf>.
50. Van der Kroef I., Koszinski S., Grinat M., Digital mapping of buried soil horizons using 2D and pseudo-3D geoelectrical measurements in a ground moraine landscape, *Eur J Soil Sci*, 2020, Vol. 71, pp. 10–26, DOI: [10.1111/ejss.12842](https://doi.org/10.1111/ejss.12842).
51. Van Oost K., Govers G., Desmet P., Evaluating the effects of changes in landscape structure on soil erosion by water and tillage, *Landscape Ecology*, 2000, Vol. 15, pp. 577–589, DOI: [10.1023/A:1008198215674](https://doi.org/10.1023/A:1008198215674).
52. Van Rompay A., Verstraeten G., Van Oost K., Govers G., Poesen J. Modelling mean annual sediment yield using a distributed approach, *Earth Surface Processes and Landforms*, 2001, Vol. 26 (11), pp. 1221–1236, DOI: [10.1002/esp.275](https://doi.org/10.1002/esp.275).
53. Vanwalleghem T., Gomez J.A., Infante Amate J., Gonzalez de Molina, M., Vanderlinden, K., Guzmán G., Laguna A., Giraldez J.V., Impact of historical land use and soil management change on soil erosion and agricultural

- sustainability during the Anthropocene, *Anthropocene*, 2017, Vol. 17, P.13–39, DOI: [10.1016/j.ancene.2017.01.002](https://doi.org/10.1016/j.ancene.2017.01.002).
54. Webster R., Burrough P.A., Multiple discriminant analysis in soil survey, *European Journal of Soil Science*, 1974, Vol. 25 (1), pp. 120–134.
55. Yaghobi A., Khalilimoghadam B., Saedi T., Rahnama M., The effect of exclosure management on the reduction of SOC loss due to splash erosion in gypsiferous soils in Southwestern Iran, *Geoderma*, 2018, Vol. 319, pp. 34–42, DOI: [10.1016/j.geoderma.2017.12.037](https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.12.037).

УДК 631.4

DOI: 10.19047/0136-1694-2020-104-199-222



Ссылки для цитирования:

Плотникова О.О., Романис Т.В., Куст П.Г. Сравнение методов цифрового анализа изображений для морфометрической характеристики почвенных агрегатов в шлифах // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2020. Вып. 104. С. 199-222. DOI: 10.19047/0136-1694-2020-104-199-222

Cite this article as:

Plotnikova O.O., Romanis T.V., Kust P.G., Comparison of digital image analysis methods for morphometric characterization of soil aggregates in thin sections, Dokuchaev Soil Bulletin, 2020, V. 104, pp. 199-222, DOI: 10.19047/0136-1694-2020-104-199-222

Благодарность:

Исследование выполнено при поддержке гранта Президиума РАН “Теоретические и экспериментальные исследования для эффективного научно-технического развития агропромышленного комплекса Российской Федерации”.

Acknowledgments:

The research was supported by a grant from the Presidium of the Russian Academy of Sciences “Theoretical and experimental studies for the effective scientific and technical development of the agro-industrial complex of the Russian Federation”.

Сравнение методов цифрового анализа изображений для морфометрической характеристики почвенных агрегатов в шлифах

© 2020 г. О. О. Плотникова^{1,2*}, Т. В. Романис^{1**},
П. Г. Куст^{1***}

¹ФИЦ “Почвенный институт им. В.В. Докучаева”, Россия,
119017, Москва, Пыжжевский пер, 7, стр. 2,

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

** <https://orcid.org/0000-0003-3846-5324>, e-mail:

romanis.tatyana@yandex.ru,

*** <https://orcid.org/0000-0003-4476-9017>, e-mail: pavelkust@yandex.ru.

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

*Поступила в редакцию 09.06.2020, после доработки 23.10.2020,
принята к публикации 11.11.2020*

Резюме: Работа посвящена исследованию применимости методов полуавтоматической сегментации микрофотографий для морфометрической характеристики почвенных агрегатов в шлифах из насыпных образцов. Объект исследования – чернозем типичный пахотный (Курская область). Агрегаты были выделены методом мокрого просеивания из насыпного образца верхних 10 см пахотного горизонта после размыва модельным мелководным потоком на большом эрозионном лотке. Из агрегатов, свободно рассыпанных на стекло и закрепленных полиэфирной смолой, были изготовлены шлифы, обработка снимков которых проводилась двумя сравнимыми способами: Adobe Photoshop + CTan и Thixomet Pro. Большое количество срезов нативных агрегатов под разными углами в среднем сечении позволяет статистически оценить форму агрегатов. Получены данные по морфометрическим показателям агрегатов: фактор формы, степень округлости и коэффициент изрезанности поверхности агрегатов. Оценка сходимости результатов, полученных способом Photoshop + CTan тремя исследователями, проводилась путем сравнения выборок по t-критерию Стьюдента и U-критерию Манна – Уитни. Оценка сходимости усредненных результатов, полученных способом Photoshop + CTan, и результатов, полученных с использованием Thixomet Pro, проводилась по U-критерию Манна – Уитни. Значимых различий между параметрами одних и тех же агрегатов, полученных с помощью сочетания программ Adobe Photoshop и CTan разными исследователями, не обнаружено. Значимых различий между параметрами одних и тех же агрегатов, полученными сравнимыми способами, не обнаружено. Можно заключить, что достоверность определения морфометрических параметров почвенных агрегатов с помощью Thixomet Pro соизмерима с достоверностью результатов при работе со снимками шлифов в CTan после бинаризации в Adobe Photoshop. Способ получения данных о морфометрических параметрах почвенных агрегатов с помощью Thixomet Pro полностью исключает возможность субъективной ошибки, показывает высокую степень автоматизации, воспроизводимости и достоверности полученных результатов и является более быстрым.

Ключевые слова: бинаризация снимков, морфометрия агрегатов, чернозем, CTan, Thixomet Pro.

Comparison of digital image analysis methods for morphometric characterization of soil aggregates in thin sections

O. O. Plotnikova^{1,2*}, T. V. Romanis^{1**}, P. G. Kust^{1***}

¹*Federal Research Centre “V.V. Dokuchaev Soil Science Institute”,*

7 Bld. 2 Pyzhevskiy per., Moscow 119017, Russian Federation,

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

***<https://orcid.org/0000-0003-3846-5324>, e-mail:*

romanis.tatyana@yandex.ru,

****<https://orcid.org/0000-0003-4476-9017>, e-mail: pavelkust@yandex.ru.*

²*Lomonosov Moscow State University,*

1 Leninskie Gori, Moscow 119234, Russian Federation.

Received 09.06.2020, Revised 23.10.2020, Accepted 11.11.2020

Abstract: The purpose of this study was to investigate the applicability of semiautomatic segmentation methods for obtaining and evaluating morphometric parameters of soil aggregates in artificially prepared loose samples in soil thin sections. The object of the research is typical arable Chernozem. The aggregates were separated by wet sieving method from loose sample of upper 10 cm of the plowing horizon after erosion by a model shallow water flow on a large erosion tray. The aggregates, loosely scattered on the glass and fixed with polyester resin, were used to produce the thin sections. Images of the thin sections were taken under a polarizing microscope and then were processed using two methods compared: Adobe Photoshop + CTan and Thixomet Pro. Data on morphometric parameters of aggregates were obtained: the shape factor, the degree of roundness and the coefficient of aggregate surface roughness. The convergence of the results obtained using Photoshop + CTan by three researchers was evaluated by comparing samples using the Student's test and the Mann-Whitney test. The convergence of the averaged results obtained using Photoshop + CTan and the results obtained using Thixomet Pro was evaluated using the Mann – Whitney test. No significant differences were found between the parameters of the same aggregates obtained using a combination of Adobe Photoshop and CTan programs by different researchers. No significant differences were found between the parameters of the same aggregates obtained by the compared methods. So, one can conclude that the reliability of determining the morphometric parameters of soil aggregates using Thixomet Pro is comparable to the reliability of results when working with images of sections

in CTan after binarization in Adobe Photoshop. The method of obtaining data on morphometric parameters of soil aggregates using Thixomet Pro completely eliminates the possibility of subjective error, shows a high degree of automation, reproducibility and reliability of the results obtained, and is faster.

Keywords: image binarization, morphometry of aggregates, Chernozem, CTan, Thixomet Pro.

ВВЕДЕНИЕ

Морфометрические исследования в почвоведении имеют длительную историю развития. Морфометрия элементов микростроения почв как направление микроморфологии была исключительно “ручным” методом, а потому крайне трудоемким и имеющим ограниченное распространение ([Польский, 1955](#); [Феофарова, 1956](#); [Kubiena, 1967](#)). Затем для микроморфометрического анализа стали использовать фотометры (Geyger, Beckmann, 1967), автоматический анализатор негативов и фотографий (Афанасьев и др., 1972), различные отечественные и зарубежные анализаторы типа ТАСИ, Протва, микровидеомат, эпиквант, квантимет ([Jongnerius et al., 1972](#); [Турсина и др., 1985](#); [Dorronsoro, 1988](#)). В 1990 г. в США был проведен первый симпозиум по использованию анализа изображения в почвоведении, по результатам которого был опубликован специальный выпуск журнала Geoderma ([Mermut, Norton, 1992](#)). В последующие годы получены морфометрические данные для отдельных элементов микростроения почв. Чаще всего математически оценивают поровое пространство: это и выделение архетипов порового пространства дерново-подзолистых почв ([Skvortsova, Rozhkov, 2011](#)), и оценка интенсивности педогенеза по степени развития порового пространства ([Bryk, 2016](#)), и количественное определение параметров биогенных пор и ориентированной глины (кутан) для прогнозирования изменения структуры почв ([Sauzet et al., 2017](#)).

Несмотря на обширное количество работ по морфометрической оценке отдельных микроморфологических характеристик, проведение комплексного количественного анализа элементов микростроения в шлифах до настоящего времени остается трудоемким и является актуальным развивающимся направ-

лением современной микроморфологии ([Stoops, 2018](#)). Применение цифровых методов для анализа снимков шлифов почвенных агрегатов перспективно в рамках изучения влияния факторов почвообразования на структурное состояние почвы ([San José Martínez et al., 2015](#)), связи между цветом почвы и ее свойствами ([Savin et al., 2016](#)), влияния эрозионных процессов на состояние агрегатов почвы ([Плотникова и др., 2019](#)). Получаемые этим способом комплексные количественные данные могут быть использованы для оценки интенсивности и направления педогенеза в результате воздействия абиотических и биотических факторов. Одной из составляющих подобных комплексных данных являются морфометрические характеристики агрегатов, для которых требуется разработка методов быстрой и достоверной диагностики.

В случае анализа снимков природных объектов необходимо комбинировать несколько различных программ в одном исследовании для достижения достоверных результатов. Это связано с неравномерным распределением света на объемных объектах, градиентом цвета (изменение тона и/или насыщенности) природного объекта и математическими алгоритмами обработки полученных изображений ([Marcelino et al., 2007](#)). В зависимости от целей конкретного исследования авторы используют как свободно распространяемое программное обеспечение для цифрового анализа изображений, например, ImageJ ([Wang et al., 2017](#)), так и более узко специализированное, как CTan и Image-Pro Plus ([Gorbov et al., 2016](#); [Zhao et al., 2019](#)); редко используются трудоемкие для анализа растровые одноканальные изображения ГИС ([Asmussen et al., 2015](#)). Сегментация (процесс выделения на изображении интересующих объектов) и последующая математическая обработка – обязательные этапы морфометрического анализа снимков. Специалисты в области анализа цифровых изображений ежегодно разрабатывают новые алгоритмы и модели сегментации ([Angulo et al., 2020](#); [Takashimizu, Iiyoshi, 2016](#)). Методы сегментации успешно реализуются в области картографии почв ([Королюк, 2012](#); [Симакова, 2014](#)), точного земледелия ([Pusd  -Chulde et al., 2020](#)), генетического почвоведения ([Чжуан и др., 2019](#)), физики почв ([Ivanov et al., 2019](#)) и механики грунтов ([Rodríguez et al., 2013](#)).

Цель настоящего исследования – проверить, насколько при-

менимо программное обеспечение СТАп для получения данных о морфометрических параметрах почвенных агрегатов. Кроме того, необходимо было оценить достоверность и сходимость результатов измерения морфометрических параметров, получаемых с помощью нового, ранее не использованного в почвоведении программного обеспечения Thixomet Pro в сравнении с уже хорошо себя зарекомендовавшим СТАп.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

В качестве объекта исследования были выбраны агрегаты чернозема типичного пахотного (Опытное хозяйство ВНИИЗиЗПЭ структурного подразделения ФГБНУ “Курский Федеральный Аграрный Центр”, Курская область, координаты разреза 51°32'36.35" с. ш., 36°6'35.54" в. д.). Название почвы по Классификации и диагностике почв СССР – чернозем типичный мощный тяжелосуглинистый на лёссовидных суглинках глубокопахотный несмытый ([Классификация, 1977](#)), по WRB – Haplic Chernozem (Loamic, Aric, Pachic) ([World Reference..., 2015](#)). Агрегаты были выделены методом мокрого просеивания ([Вадюнина, Корчагина, 1986](#)) из сыпного образца верхних 10 см пахотного горизонта (PU по Полевому определителю, 2008) после размыва модельным мелководным потоком со скоростью 0.41 м/с на большом эрозионном лотке. Для исследования выбрали фракцию 1–2 мм (средневзвешенный диаметр $\bar{d}$ 1.84 мм).

Шлифы. Из агрегатов фракции, свободно рассыпанных на стекло и закрепленных полиэфирной смолой, М.А. Лебедевым были изготовлены шлифы. В процессе изготовления шлифов получены срезы агрегатов толщиной 25–30 мкм. Дальнейший анализ проведен для срезов агрегатов. В анализ включались те проекции (срезы) агрегатов на плоскости, максимальное сечение которых превышало 1 000 мкм. Большое количество срезов нативных агрегатов под разными углами в среднем сечении позволяет статистически оценить форму агрегатов ([Скворцова, 1999](#); [Плотникова и др., 2019](#)). Изготовление и съемку шлифов проводили с привлечением оборудования Центра коллективного пользования научным оборудованием “Функции и свойства почв и почвенного покрова” Почвенного института им. В.В. Докучаева.

Фото съемка. Для каждого способа сегментации съемку одних и тех же шлифов фракции агрегатов почв 1–2 мм проводили отдельно. Фотографии шлифов получены на поляризационном микроскопе Olympus BX51 с цифровой фотокамерой Olympus DP26. На матрицу фотоаппарата подавалось изображение с 40-кратным увеличением, при этом в оптической схеме применялся объектив UIS 2 UPlanFL N 4x/0.13 ∞ /-FN26.5 UPLFLN с оптическим разрешением 2.5 мкм.

Для первого способа (Adobe Photoshop + CТan) шлифы снимали в проходящем поляризованном свете без анализатора и без поворота вокруг оси микроскопа (то есть без выявления оптических осей зерен минералов) (рис. 1а). Для второго способа (Thixomet Pro) выполняли съемку каждого поля зрения в проходящем поляризованном свете без анализатора и с анализатором (при повороте объекта съемки вокруг оси микроскопа на 30°) ([Скворцов и др., 1989](#)). Поскольку минералы в почве зачастую анизотропны – обладают свойством двойного лучепреломления ([Соболев, 1990](#)), – то проходящий через их кристаллы поляризованный свет может быть как полностью поглощен анализатором при совпадении оси индикатрисы кристалла с направлением световых колебаний в поляризаторе, так и пропущен анализатором при отклонении направления световых колебаний кристаллом. В первом случае кристалл полностью погасает и выглядит темным (черным). Это приводит к совпадению его цветовых характеристик с изотропными (не имеющими двойного лучепреломления), а потому тоже темными составляющими почвы в шлифе (изотропного внутриагрегатного вещества и эпоксидной смолы, которая является отвердителем при изготовлении шлифов и заполняет поровое пространство). В связи с этим на получаемом единичном микрофотоснимке невозможно автоматически разделить три вида темных пикселей: поровое пространство; изотропное тонкодисперсное вещество основной почвенной массы; погасший кристалл. Поэтому необходим поворот шлифа для визуализации на границах агрегатов погасших анизотропных зерен минералов. Поворот шлифа приводит к несовпадению световых колебаний в анализаторе и зернах минералов, погасшие зерна светлеют, и становится возможным их выявление на фоне остальных объектов изображения (рис. 2).

Морфометрические параметры. Получены данные по следующим морфометрическим показателям срезов исследуемых агрегатов: фактор формы (FF), степень изометричности (Rdn) и коэффициент изрезанности поверхности агрегатов (U). Формулы расчета этих показателей:

$$FF = \frac{4\pi A}{Pm^2},$$

где A – площадь объекта, мм², Pm – периметр объекта, мм;

$$Rdn = \frac{4A}{\pi d_{\max}^2},$$

где A – площадь объекта, мм², d_{max} – максимальный диаметр объекта, мм;

$$U = \frac{L}{\pi D^*},$$

где L – длина линии, ограничивающей объект, мм, D* – диаметр круга с площадью, эквивалентной площади объекта, мм (Amada et al., 2002).

Подготовка снимков и математическая обработка. Первый вариант получения морфометрических параметров агрегатов заключается в последовательном применении программ Adobe Photoshop CS5 и CТаn. Для математической обработки в программе CТаn (Bruker CТаn v.1.18 Micro-CT Software) снимки необходимо было предварительно бинаризовать с выделением границ объектов. Бинаризация – частный случай сегментации – получение двухцветного изображения из многоцветного ([Тропченко и др., 2015](#)). Возможности программы CТаn позволяют выполнять бинаризацию снимков. Использовали инструменты CТаn – Treshholding, Filtering, Despeckle – как по отдельности, так и в различных комбинациях. Однако в случае со снимками шлифов процедуры бинаризации в CТаn показали низкую эффективность: 1) агрегаты не отделяются от артефактов, следовательно, увеличивается число объектов математической обработки (рис. 1б, красный контур); 2) внутренняя структура агрегатов распознается как пористость, еще больше увеличивая число объектов (рис. 1б, зеленый контур); 3) агрегаты, соприкасающиеся с границами снимка, также распознаются как объекты внимания и проходят дальнейшую математическую обработку, искажая результаты исследова-

ния. Кроме того, неправильное распознавание границ агрегатов на снимках приводит к увеличению их коэффициента изрезанности поверхности, а также к “слипанию” агрегатов и в дальнейшем обработке их программой как одного объекта, а не нескольких (рис. 1б, синий контур).

Таким образом, было принято решение бинаризовать снимки для обработки в СТан полуавтоматическим способом в программе Adobe Photoshop CS5 с помощью инструмента Magnetic Lasso. Параметры инструмента: растушевка – 0 пикс., сглаживание – да, ширина – 5 пикс., контрастность – 100%, частота – 57 (без уточнения краев). Этим способом бинаризовали один и тот же набор снимков три разных исследователя независимо друг от друга для последующей оценки применимости данного способа сегментации с целью получения морфометрических параметров срезов почвенных агрегатов (рис. 1в). Бинаризованные в Photoshop снимки затем обрабатывали с помощью ПО (программного обеспечения) СТан.

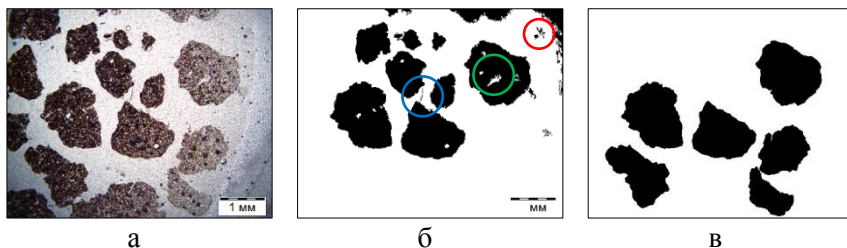


Рис. 1. Примеры предварительной сегментации снимка почвенного шлифа из агрегатов чернозема типичного Курской области: **а** – исходный снимок (IIN); **б** – снимок после обработки инструментами СТан; **в** – снимок после сегментации в Adobe Photoshop.

Fig. 1. Examples of pre-segmentation of an image of a soil thin section from aggregates of a typical Chernozem of the Kursk region: **а** – initial image (IIN); **б** – image after processing with CTan tools; **в** – image after segmentation in Adobe Photoshop.

Второй способ обработки – полуавтоматическая сегментация и математическая обработка в ПО Thixomet Pro, модуль “Агрегаты”. При работе с модулем “Агрегаты” ПО Thixomet Pro из

снимков одного и того же поля зрения создается одно целое многослойное изображение (рис. 2), которое затем сегментируется с помощью выделения диапазонов яркости пикселей.

Три снимка одного поля зрения необходимы для точного распознавания программой границ агрегатов, поскольку на снимке в проходящем свете цвет минеральных зерен на границах может совпадать с цветом пор. Также можно выделять диапазоны тона и насыщенности пикселей.

В нашем исследовании экспериментально было установлено, что эффективнее использовать полуавтоматическую процедуру алгоритм программного обеспечения Thixomet Pro, в которой реализован следующий алгоритм ([Russ, 2007](#)):

1. Пороговая бинаризация в цветовом пространстве HSL изображений с разным поворотом предметного столика. Порог выставляется экспертом, исходя из цветовых характеристик (зависят от толщины и чистоты) каждого отдельного шлифа.

2. Из серии бинарных изображений, полученных на шаге 1, формируется итоговое бинарное изображение с применением логического оператора OR с учетом изменения цвета отдельных элементов микростроения. Например, один и тот же пиксель на предполагаемой границе агрегата, имеющий светлую окраску на изображении, полученном в поляризованном свете без анализатора (рис. 2а), отнесен к классу “пора”; тот же пиксель темного цвета на изображении в поляризованном свете с анализатором (рис. 2б) отнесен к классу “пора”; тот же пиксель светлого цвета на изображении в поляризованном свете с анализатором и поворотом предметного столика на 30° (рис. 2в) отнесен к классу “зерно минерала”. При таком наборе характеристик пиксель присоединяется к общему ареалу прилегающего агрегата.

3. Последовательное применение морфологических операторов “закрытие” и “раскрытие” с маской в виде круга. Количество итераций применения операторов и размер маски задается экспертом.

4. Заполнение в объектах несплошностей меньше заданного экспертом размера.

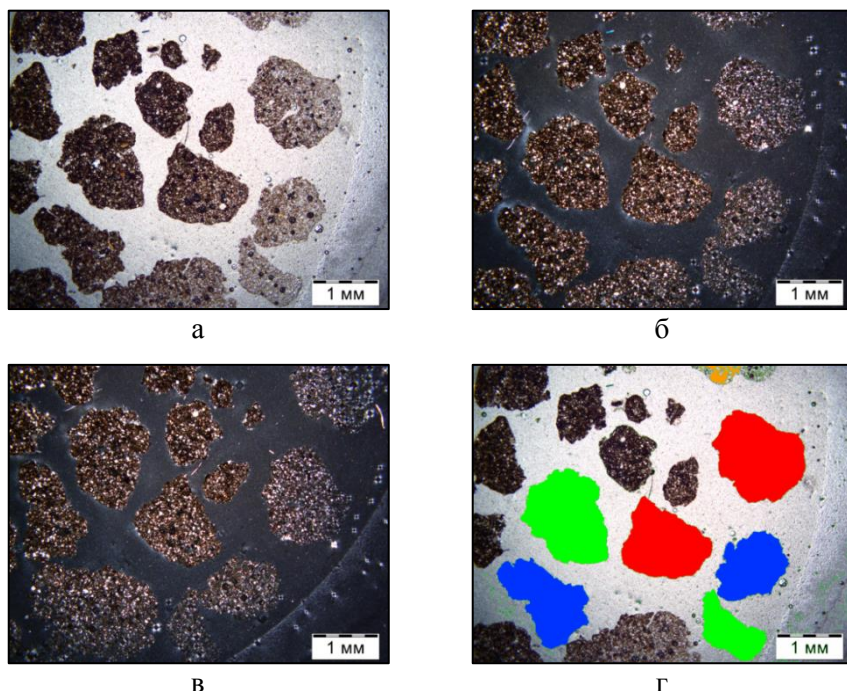


Рис. 2. Пример полуавтоматической сегментации снимка почвенного шлифа из агрегатов чернозема типичного с помощью программы Thixomet Pro. **а, б, в** – снимки, выполненные на поляризационном микроскопе Olympus BX51 с цифровой фотокамерой Olympus DP26: **а** – снимок в проходящем свете; **б** – снимок в поляризованном свете; **в** – снимок в поляризованном свете с поворотом предметного столика на 30°; **г** – итоговое изображение, полученное после сведения слоев и обработки в программе Thixomet Pro.

Fig. 2. Example of semi-automatic segmentation of a soil thin section image from typical Chernozem aggregates using the Thixomet Pro software. **а, б, в** – images taken on an Olympus BX51 polarizing microscope with an Olympus DP26 digital camera: **а** – image in transmitted light; **б** – image in polarized light; **в** – image in polarized light with the subject table rotated by 30°; **г** – the final image obtained after merging layers and processing in Thixomet Pro.

5. Разделение слипшихся агрегатов:

5.1. Построение евклидовой карты расстояний (EDM).

5.2. Бинаризация EDM с использованием алгоритма водораздела (watershed).

5.3. Применение логического оператора AND к изображениям, полученным на этапе 3. Легитимность разделения агрегатов определяется экспертом, прежде всего, по характеристике границы агрегатов ([Stoops, 2003](#)).

6. Удаление объектов меньше заданного экспертом размера.

После сегментации проводили анализ изображения для получения морфометрических параметров срезов агрегатов. Как можно видеть на рисунке 2г, особенностью программы Thixomet Pro является то, что при сегментации для математической обработки отбираются только те объекты, которые не соприкасаются с границами изображения. Кроме того, программа Thixomet Pro в отличие от STan позволяет устанавливать как нижнюю, так и верхнюю границы размеров объектов, параметры которых рассчитываются после сегментации. На рисунке 2г цветом выделены агрегаты, чей минимальный диаметр с учетом масштаба съемки попадает в исследуемую фракцию 1–2 мм.

При оценке сходимости результатов, получаемых разными исследователями с помощью метода Adobe Photoshop + STan, сравнение выборок по FF и Rdn проводилось попарно по t-критерию Стьюдента, поскольку данные по этим показателям имели нормальное распределение. Распределение данных по U отличалось от нормального, поэтому сравнение выборок по этому показателю проводилось по U-критерию Манна – Уитни ([Дмитриев, 2009](#)).

Оценка применимости двух описанных методов сегментации изображений проводилась на основе статистического анализа выборок данных, полученных этими методами. Сравнение выборок данных проводилось для параметров FF, Rdn и U по U-критерию Манна – Уитни. Уровень значимости α принимался для всех сравнений равным 0.01.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Исходные морфометрические параметры изученных агрегатов, выделенных на изображениях способом полуавтоматической бинаризации в Photoshop с последующей обработкой в STap, приведены в таблице 1 (Supplementary files). Основные статистические параметры выборок сравниваемых морфометрических показателей исследованных нами агрегатов и результаты сравнения выборок морфометрических параметров, полученных путем сегментации изображений в Adobe Photoshop тремя исследователями с последующей обработкой бинарных снимков в STap, приведены в таблицах 1 и 2. Цифрами 1, 2, 3 обозначены выборки трех разных исследователей, сегментировавших снимки.

Уровни значимости различий по выборкам морфометрических показателей почвенных агрегатов, полученным тремя разными исследователями, ни в одном случае не оказались меньше принятого в исследовании уровня α , равного 0.01 (табл. 2).

Таким образом, значимых различий между параметрами одних и тех же агрегатов, полученных с помощью сочетания программ Adobe Photoshop и STap разными исследователями, не обнаружено. Это означает, что описанный метод получения морфометрических параметров срезов агрегатов устойчив к возможному влиянию личности эксперта, выполняющего исследование (отсутствует субъективная погрешность). Сходные результаты получены в различных исследованиях при прямом измерении площади объектов на изображении с использованием непосредственно инструмента Magnetic Lasso программы Adobe Photoshop ([Li et al., 2012](#); [Wang et al., 2015](#)). Однако нужно отметить, что при исследовании морфометрии агрегатов недостаточно только информации об их площади, а сложные расчеты в программе Adobe Photoshop выполнить нельзя. Эта программа позволяет выполнить только полуавтоматическую бинаризацию снимков для дальнейшей обработки другими средствами, что делает данный метод достаточно трудоемким. В то же время Thixomet Pro позволяет выполнять и сегментацию снимков, и исследование морфометрических параметров объектов в одной программной среде.

Таблица 1. Описательные статистики по выборкам морфометрических показателей агрегатов чернозема типичного (фракция 1–2 мм), полученным тремя исследователями путем бинаризации изображений в Adobe Photoshop с последующей обработкой в CTan

Table 1. Descriptive statistics on samples of morphometric parameters of typical Chernozem aggregates (1–2 mm fraction) obtained by three researchers by image segmentation in Adobe Photoshop with subsequent processing in CTan

	Mean	Med	Min	Max	Var	Std. Dev.	Valid N
FF1	0.583	0.595	0.250	0.780	0.013	0.113	32
FF2	0.529	0.550	0.230	0.750	0.014	0.117	
FF3	0.525	0.515	0.320	0.760	0.013	0.116	
Rdn1	0.601	0.600	0.322	0.850	0.015	0.123	
Rdn2	0.594	0.597	0.324	0.831	0.015	0.122	
Rdn3	0.598	0.595	0.324	0.855	0.015	0.123	
U1	1.331	1.301	1.135	1.985	0.026	0.161	
U2	1.406	1.349	1.158	2.094	0.036	0.189	
U3	1.404	1.393	1.146	1.772	0.026	0.161	

Примечание. FF – фактор формы, Rdn – степень изометричности, U – коэффициент изрезанности поверхности агрегатов, 1, 2, 3 – номера исследователей, выполнявших бинаризацию и обработку снимков, Mean – среднее значение, Med – медиана, Min – наименьшее значение, Max – наибольшее значение, Var – дисперсия выборки, Std. Dev. – стандартное отклонение, Valid N – количество измерений в выборке.

Для исследования различий между методами Adobe Photoshop + CTan и “Агрегаты” Thixomet Pro были сформированы выборки морфометрических параметров срезов агрегатов, которые попали на обе серии снимков. Таким образом, из-за необходимости поворота столика при съемке для Thixomet Pro сравниваемые выборки уменьшились относительно метода Adobe Photoshop + CTan. Однако использование методов непараметрической статистики позволяет избежать ошибок, связанных с небольшим объемом сравниваемых выборок. Кроме того, для исключения влияния личности эксперта при сравнении двух методов выборка по мето-

ду Adobe Photoshop + CTan формировалась из средних значений морфометрических параметров, полученных тремя исследователями. Выборки исходных морфометрических параметров изученных срезов агрегатов, выделенных на изображениях сравниваемыми способами, приведены в таблице 2 (Supplementary files). Описательные статистики выборок данных, полученных с помощью программ CTan и Thixomet Pro, представлены в таблице 3.

Таблица 2. Уровни значимости различий при попарном сравнении морфометрических показателей агрегатов чернозема типичного, полученных тремя исследователями путем сегментации изображений в Adobe Photoshop с последующей обработкой в CTan

Table 2. Levels of significance of differences in pairwise comparison of morphometric parameters of typical Chernozem aggregates obtained by three researchers by segmentation of images in Adobe Photoshop with subsequent processing in CTan

	1–2	1–3	2–3
FF	0.066	0.050	0.906
Rdn	0.821	0.939	0.880
U	0.047	0.038	0.824

Примечание. FF – фактор формы, Rdn – степень округлости, U – коэффициент изрезанности поверхности агрегатов.

Уровни значимости различий при сравнении морфометрических показателей агрегатов чернозема типичного, полученных методами сегментации изображений в Adobe Photoshop с последующей обработкой в CTan и обработки изображений ПО Thixomet Pro (модуль “Агрегаты”) составили: для FF – 0.189, для Rdn – 0.912, для U – 0.091 (табл. 3). Поскольку во всех случаях уровень значимости различий оказался больше α , можно заключить, что достоверность определения морфометрических параметров почвенных агрегатов с помощью ПО Thixomet Pro так же высока, как и при определении с помощью CTan после бинаризации в Adobe Photoshop. Однако Thixomet Pro представляется более удобной программой, поскольку совмещает в себе возможности поворота и наложения слоев изображения с последующей матема-

тической обработкой, что делает весь процесс получения данных значительно менее трудоемким при сопоставимо высокой точности.

Таблица 3. Описательные статистики по выборкам морфометрических показателей агрегатов чернозема типичного (фракция 1–2 мм), полученным двумя способами, и уровни значимости различий средних этих выборок

Table 3. Descriptive statistics on samples of morphometric indicators of typical Chernozem aggregates (fraction 1–2 mm) obtained in two ways, and the significance levels of differences in the average of these samples

Пара-метр	Mean	Med	Min	Max	Var	Std.Dev.	Valid N
CTan							
FF	0.544	0.555	0.267	0.763	0.015	0.123	18
Rdn	0.602	0.595	0.470	0.766	0.008	0.088	
U	1.389	1.345	1.146	1.950	0.037	0.192	
Thixomet Pro							
FF	0.493	0.515	0.230	0.710	0.013	0.115	18
Rdn	0.604	0.595	0.460	0.770	0.007	0.086	
U	1.512	1.435	1.180	2.200	0.063	0.251	
p-value							
FF	0.189						18
Rdn	0.912						
U	0.091						

Примечание. Mean – среднее значение, Med – медиана, Min – наименьшее значение, Max – наибольшее значение, Var – дисперсия выборки, Std. Dev. – стандартное отклонение, Valid N – количество измерений в выборке, FF – фактор формы, Rdn – степень изометричности, U – коэффициент изрезанности поверхности агрегатов.

Можно утверждать, что оба сравниваемых метода сегментации микроморфологических снимков дают высокие результаты. Однако ПО Thixomet Pro обеспечивает бóльшую скорость обработки снимков и получения морфометрической информации за

счет сокращения числа подготовительных операций, требующих тщательного визуального контроля со стороны исследователя. Таким образом, для получения уверенных выводов о форме почвенных агрегатов целесообразнее применение ПО Thixomet Pro, позволяющего оценивать большее количество срезов агрегатов, нежели способ Adobe Photoshop + CТап.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенного нами исследования установлено, что:

1. Способ получения данных о морфометрических параметрах срезов почвенных агрегатов, включающий бинаризацию микроморфологических снимков шлифов в Adobe Photoshop с последующей обработкой в CТап является устойчивым к возникновению субъективной погрешности.

2. Способ получения данных о морфометрических параметрах срезов почвенных агрегатов с помощью Thixomet Pro дает результат, сопоставимый с результатами по CТап, позволяя сравнивать их и объединять в одну выборку. При этом использование Thixomet Pro позволяет учесть большее количество входных данных, что полностью исключает возможность субъективной ошибки.

3. Thixomet Pro показывает высокую степень автоматизации, воспроизводимости и достоверности полученных результатов и является намного более производительным, и, следовательно, более эффективным. Использование Thixomet Pro решает вопросы выделения и расчета морфометрических параметров агрегатов в комплексном анализе микросложения почвы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вадюнина А.Ф., Корчагина З.А. Методы исследования физических свойств почв. М.: Агропромиздат. 1986. 416 с.
2. Дмитриев Е.А. Математическая статистика в почвоведении. М.: Книжный дом Либроком, 2009. 327 с.
3. Классификация и диагностика почв СССР. М.: Колос, 1977. 221 с.
4. Королук Т.В. Почвенная интерпретация космических изображений в системе методов ЦПК // В кн. Цифровая почвенная картография: теоре-

тические и экспериментальные исследования. М.: Почвенный ин-т им. В.В. Докучаева. 2012. С. 125–140.

5. *Плотникова О.О., Лебедева М.П., Демидов В.В., Карпова Д.В.* Сравнение микроморфометрических показателей агрегатов несмытого и среднесмытого пахотного чернозема типичного в лабораторном эрозионном эксперименте // Почвоведение. 2019. № 10. С. 1225–1233. DOI: [10.1134/S0032180X19100095](https://doi.org/10.1134/S0032180X19100095).

6. *Польский М.Н.* О некоторых новых путях изучения порозности и структуры почвы // Почвоведение. 1955. № 5. С. 29–43.

7. *Симакова М.С.* От визуального дешифрирования аэрофотоснимков и полевого картографирования почв до автоматизированного дешифрирования и картографирования по космическим снимкам // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2014. № 74. С. 3–19. DOI: [10.19047/0136-1694-2014-74-3-19](https://doi.org/10.19047/0136-1694-2014-74-3-19).

8. *Скворцов Г.Е., Панов В.А., Поляков В.А., Федин Л.А.* Микроскопы. Л.: Изд-во “Машиностроение”, 1989. 512 с.

9. *Скворцова Е.Б.* Строение порового пространства естественных и антропогенноизмененных почв: Автореф. дис. ... канд. геогр. наук.: 03.00.27. М., 1999. 44 с.

10. *Соболев Р.Н.* Методы оптического исследования минералов. М.: Недра, 1990. 288 с.

11. *Тропченко А.А., Тропченко А.Ю.* Методы вторичной обработки и распознавания изображений. СПб: Университет ИТМО, 2015. 215 с.

12. *Турсина Т.В., Скворцова Е.Б., Кулинская Е.В., Грачева М.В.* Микроморфометрический анализ пористости почв // Почвоведение. 1985. № 4. С. 60–69.

13. *Феофарова И.И.* Микроморфологическая характеристика такыров // Такыры Западной Туркмении и пути их сельскохозяйственного освоения. М., 1956. С. 351–380.

14. *Чжуан Я., Хартеминк А.Е., Хуан Ц.* Количественная характеристика фракций крупнозема из почвенных образцов с использованием цифровых фотоснимков // Почвоведение. 2019. № 8. С. 956–965. DOI: [10.1134/S0032180X19080173](https://doi.org/10.1134/S0032180X19080173).

15. *Amada S., Imagawa K., Aoki S.* Splat Profile of impinging droplets on rough substrates: influence of surface roughness // Surface and Coatings Technology. 2002. Vol. 154. P. 27–33. DOI: [10.1016/S0257-8972\(01\)01517-1](https://doi.org/10.1016/S0257-8972(01)01517-1).

16. *Angulo K., Gil D., Espitia H.* Method for Edges Detection in Digital Images Through the Use of Cellular Automata // Advances in Intelligent Systems and Computing book series. 2020. Vol. 1078. P. 3–21. DOI: [10.1007/978-3-030-33614-1_1](https://doi.org/10.1007/978-3-030-33614-1_1).

17. *Asmussen P., Conrad O., Günther A., Kirsch M., Riller U.* Semi-automatic segmentation of petrographic thin section images using a “seeded-region growing algorithm” with an application to characterize weathered subarkose sandstone // *Computers & Geosciences*. 2015. Vol. 83. P. 89–99. DOI: [10.1016/j.cageo.2015.05.001](https://doi.org/10.1016/j.cageo.2015.05.001).
18. *Bryk M.* Macrostructure of diagnostic B horizons relative to underlying BC and C horizons in Podzols, Luvisol, Cambisol, and Arenosol evaluated by image analysis // *Geoderma*. 2016. Vol. 263. P. 86–103. DOI: [10.1016/j.geoderma.2015.09.014](https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2015.09.014).
19. *Dorransoro C.* Micromorphometria de suelos. Aplicaciones // *An. Edafol. Y agrobiol.* 1988. Vol. 47. No. 1–2. P. 503–530.
20. *Gorbov S.N., Bezuglova O.S., Abrosimov K.N., Skvortsova E.B., Tagiverdiev S.S., Morozov I.V.* Physical Properties of soils in Rostov agglomeration // *Eurasian Soil Science*. 2016. Vol. 49. P. 898–907. DOI: [10.1134/S106422931606003X](https://doi.org/10.1134/S106422931606003X).
21. *Ivanov A.L., Shein E.V., Skvortsova E.B.* Tomography of soil pores: from morphological characteristics to structural-functional assessment of pore space // *Eurasian Soil Science*. 2019. Vol. 52. No. 1. P. 50–57. DOI: [10.1134/S106422931901006X](https://doi.org/10.1134/S106422931901006X).
22. *Jongerius A., Schoonderbeek D., Jager A., Kowalinski St.* Electro-optical soil porosity investigation by means of Quantimet-B equipment // *Geoderma*. 1972. Vol. 7. P. 177–198.
23. *Kubiens W. (Ed.).* Die micromorphometrische Bodenanalyse. Stuttgart. 1967. 196 p.
24. *Li P.-N., Li H., Wu M.-L., Wang S.-Y., Kong Q.-Y., Zhang Z., Sun Y., Liu J., Lv D.-C.* A Cost-Effective Transparency-Based Digital Imaging for Efficient and Accurate Wound Area Measurement // *PLoS ONE*. 2012. Vol. 7. Iss. 5. e38069. DOI: [10.1371/journal.pone.0038069](https://doi.org/10.1371/journal.pone.0038069).
25. *Marcelino V., Cnudde V., Vansteelandt S., Carò F.* An evaluation of 2D-image analysis techniques for measuring soil microporosity // *European Journal of Soil Science*. 2007. Vol. 58. P. 133–140. DOI: [10.1111/j.1365-2389.2006.00819.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.2006.00819.x).
26. *Mermut A.R., Norton L.D.* Preface // *Geoderma*. Vol. 53. Iss. 3–4. P. iii–iv. DOI: [10.1016/0016-7061\(92\)90053-A](https://doi.org/10.1016/0016-7061(92)90053-A).
27. *Pusdà-Chulde M.R., Salazar-Fierro F.A., Sandoval-Pillajo L., Herrera-Granda E.P., García-Santillán I.D., De Giusti A.* Image Analysis Based on Heterogeneous Architectures for Precision Agriculture: A Systematic Literature Review // *Advances in Intelligent Systems and Computing book series*. 2020. Vol. 1078. P. 51–70. DOI: [10.1007/978-3-030-33614-1_4](https://doi.org/10.1007/978-3-030-33614-1_4).

28. *Rodriguez J., Edeskär T., Knutsson S.* Particle shape quantities and measurement techniques: a review // *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*. 2013. Vol. 18. P. 169–198.
29. *Russ J.C.* The image processing handbook (5th edition). USA, Taylor & Francis Group, LLC. 2007. 818 p.
30. *San José Martínez F., Muñoz Ortega F.J., Caniego Monreal F.J., Kravchenko A.N., Wang W.* Soil aggregate geometry: Measurements and morphology // *Geoderma*. 2015. Vol. 237–238. P. 36–48. DOI: [10.1016/j.geoderma.2014.08.003](https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2014.08.003).
31. *Savin I.Y., Prudnikova E.Y., Vasilyeva N.A., Veretelnikova I.V., Bairamov A.N.* The color of soils as a basis for proximal sensing of their composition // *Dokuchaev Soil Bulletin*. 2016. Vol. 86. P. 46–52. DOI: [10.19047/0136-1694-2016-86-46-52](https://doi.org/10.19047/0136-1694-2016-86-46-52).
32. *Sauzet O., Cammas C., Gilliot J.M., Bajard M., Montagne D.* Development of a novel image analysis procedure to quantify biological porosity and illuvial clay in large soil thin sections // *Geoderma*. 2017. Vol. 292. P. 135–148. DOI: [10.1016/j.geoderma.2017.01.004](https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.01.004).
33. *Skvortsova E.B., Rozhkov V.A.* Morphometric profiles of pore space in loamy soils of the forest and steppe zones of European Russia // *Eurasian Soil Science*. 2011. Vol. 4. No. 10. P. 1209–1221. DOI: [10.1134/S1064229311100140](https://doi.org/10.1134/S1064229311100140).
34. *Stoops G.* Guidelines for analysis and description of soil and regolith thin sections. Soil Sci. Soc. Am. Madison, Wisconsin. 2003. 184 p. DOI: [10.2136/2003.guidelinesforanalysis](https://doi.org/10.2136/2003.guidelinesforanalysis).
35. *Stoops G.* Micromorphology as a Tool in Soil and Regolith Studies // *Interpretation of Micromorphological Features of Soils and Regoliths*. 2018. P. 1–19. DOI: [10.1016/b978-0-444-63522-8.00001-2](https://doi.org/10.1016/b978-0-444-63522-8.00001-2).
36. *Takashimizu Y., Iiyoshi M.* New parameter of roundness R: circularity corrected by aspect ratio // *Progress in Earth and Planetary Science*. 2016. Vol. 3. Article No. 2. DOI: [10.1186/s40645-015-0078-x](https://doi.org/10.1186/s40645-015-0078-x).
37. *Wang Q., Hartemink A. E., Jiang Z., Jin N., Sun Z.* Digital soil morphometrics of crotonas in a deep Alfisol derived from loess in Shenyang, China // *Geoderma*. 2017. Vol. 301. P. 11–18. DOI: [10.1016/j.geoderma.2017.04.010](https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.04.010).
38. Working Group WRB, I. World Reference Base for Soil Resources 2014. update 2015. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. World Soil Resources Reports No. 106. FAO, Rome, 2015.
39. *Wang Z., Liang X., Wu Z., Lin J., Huang J.* A novel method for measuring anterior segment area of the eye on ultrasound biomicroscopic images using

Photoshop // PLoS ONE. 2015. Vol. 10. Iss. 3. e0120843. DOI: [10.1371/journal.pone.0120843](https://doi.org/10.1371/journal.pone.0120843).

40. Zhao Y., Han Q., Zhao Y., Liu J. Soil pore identification with the adaptive fuzzy C-means method based on computed tomography images // Journal of Forestry Research. 2019. Vol. 30. P. 1043–1052. DOI: [10.1007/s11676-018-0725-3](https://doi.org/10.1007/s11676-018-0725-3).

REFERENCES

1. Vadyunina A.F., Korchagina Z.A., *Metody issledovaniya fizicheskikh svoystv pochv* (Methods for studying physical properties of soils), Moscow: Agropromizdat, 1986, 416 p.
2. Dmitriev E.A., *Matematicheskaya statistika v pochvovedenii* (Mathematical Statistics in Soil Science), Moscow: Knizhnyi dom Librokom, 2009, 327 p.
3. *Klassifikatsiya i diagnostika pochv SSSR* (Classification and Diagnosis of Soils in the USSR), Moscow: Kolos, 1977, 221 p.
4. Korolyuk T.V., Pochvennaya interpretatsiya kosmicheskikh izobrazhenii v sisteme metodov TsPK (Soil Interpretation of Space Images in the System of CPC Methods), In: *Tsifrovaya pochvennaya kartografiya: teoretichskie i eksperimental'nye issledovaniya* (Digital Soil Cartography: Theoretical and Experimental Studies), Moscow: V.V. Dokuchaev Soil Science Institute, 2012, pp. 125–140.
5. Plotnikova O.O., Lebedeva M.P., Demidov V.V., Karpova D.V., Comparison of Micromorphometric Characteristics of Aggregates from Noneroded and Moderately Eroded Typical Chernozem in a Laboratory Experiment, *Eurasian Soil Science*, 2019, Vol. 52, No. 10, pp. 1258–1265, DOI: [10.1134/S1064229319100090](https://doi.org/10.1134/S1064229319100090).
6. Pol'skij M.N., O nekotorykh novykh putjah izuchenija poroznosti i struktury pochvy (About some new ways of studying the porosity and structure of soil), *Eurasian Soil Science*, 1955, No. 5, pp. 29–43.
7. Simakova M.S., From visual aerial photo interpretation and field soil survey to automated decoding and soil mapping by satellite imagery, *Dokuchaev Soil Bulletin*, 2014, Vol. 74, pp. 3–19, DOI: [10.19047/0136-1694-2014-74-3-19](https://doi.org/10.19047/0136-1694-2014-74-3-19).
8. Skvortsov G.E., Panov V.A., Polyakov V.A., Fedin L.A., *Mikroskopy* (Microscopes), Leningrad: Izd-vo “Mashinostroenie”, 1989, 512 p.
9. Skvortsova E.B., *Stroenie porovogo prostranstva estestvennykh i antropogennozmenennykh pochv: Avtoref. dis. ... kand. s.-kh. nauk* (Structure of Pore Space of Natural and Anthropogenic Changed Soils, Extended abstract of cand. agric. sci. thesis), 03.00.27, Moscow, 1999, 44 p.

10. Sobolev R.N., *Metody opticheskogo issledovaniya mineralov* (Optical Mineral Research Methods), Moscow: Nedra, 1990, 288 p.
11. Tropchenko A.A., Tropchenko A.Yu., *Metody vtorichnoi obrabotki i raspoznavaniya izobrazhenii* (Methods of secondary processing and recognition of images e), Saint-Petersburg: Universitet ITMO, 2015, 215 p.
12. Tursina T.V., Skvortsova E.B., Kulinskaya E.V., Gracheva M.V., Mikromorfometricheskij analiz poristosti pochv (Micro-morphometric analysis of soil porosity), *Eurasian Soil Science*, 1985, No. 4, pp. 60–69.
13. Feofarova I.I., Mikromorfologicheskaja karakteristika takyrov (Micromorphological characteristics of takyrs), In: *Takyry Zapadnoj Turkmenii i puti ih sel'skhozjajstvennogo osvoenija* (Takyr of Western Turkmenistan and ways of their agricultural development), Moscow, 1956, pp. 351–380.
14. Zhang Y., Hartemink A.E., Huang J., Quantifying Coarse Fragments in Soil Samples Using a Digital Camera, *Eurasian Soil Science*, 2019, Vol. 52, No. 8, pp. 954–962, DOI: [10.1134/S1064229319080179](https://doi.org/10.1134/S1064229319080179).
15. Amada S., Imagawa K., Aoki S., Splat Profile of impinging droplets on rough substrates: influence of surface roughness, *Surface and Coatings Technology*, 2002, Vol. 154, pp. 27–33, DOI: [10.1016/S0257-8972\(01\)01517-1](https://doi.org/10.1016/S0257-8972(01)01517-1).
16. Angulo K., Gil D., Espitia H., Method for Edges Detection in Digital Images Through the Use of Cellular Automata, *Advances in Intelligent Systems and Computing book series*, 2020, Vol. 1078, pp. 3–21, DOI: [10.1007/978-3-030-33614-1_1](https://doi.org/10.1007/978-3-030-33614-1_1).
17. Asmussen P., Conrad O., Günther A., Kirsch M., Riller U., Semi-automatic segmentation of petrographic thin section images using a “seeded-region growing algorithm” with an application to characterize wheathered subarkose sandstone, *Computers & Geosciences*, 2015, Vol. 83, pp. 89–99, DOI: [10.1016/j.cageo.2015.05.001](https://doi.org/10.1016/j.cageo.2015.05.001).
18. Bryk M., Macrostructure of diagnostic B horizons relative to underlying BC and C horizons in Podzols, Luvisol, Cambisol, and Arenosol evaluated by image analysis, *Geoderma*, 2016, Vol. 263, pp. 86–103, DOI: [10.1016/j.geoderma.2015.09.014](https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2015.09.014).
19. Dorransoro C., Micromorphometria de suelos. Aplicaciones, *An. Edafol. Y agrobiol.*, 1988, Vol. 47, No. 1–2, pp. 503–530.
20. Gorbov S.N., Bezuglova O.S., Abrosimov K.N., Skvortsova E.B., Tagilverdiev S.S., Morozov I.V., Physical Properties of soils in Rostov agglomeration, *Eurasian Soil Science*, 2016, Vol. 49, pp. 898–907, DOI: [10.1134/S106422931606003X](https://doi.org/10.1134/S106422931606003X).
21. Ivanov A.L., Shein E.V., Skvortsova E.B., Tomography of soil pores: from morphological characteristics to structural-functional assessment of pore

- space, *Eurasian Soil Science*, 2019, Vol. 52, No. 1, pp. 50–57, DOI: [10.1134/S106422931901006X](https://doi.org/10.1134/S106422931901006X).
22. Jongerius A., Schoonderbeek D., Jager A., Kowalinski St., Electro-optical soil porosity investigation by means of Quantimet-B equipment, *Geoderma*, 1972, Vol. 7, pp. 177–198.
23. Kubiena W. (Ed.), Die micromorphometrishe Bodenanalyse, Stuttgart, 1967, 196 p.
24. Li P.-N., Li H., Wu M.-L., Wang S.-Y., Kong Q.-Y., Zhang Z., Sun Y., Liu J., Lv D.-C., A Cost-Effective Transparency-Based Digital Imaging for Efficient and Accurate Wound Area Measurement, *PLoS ONE*, 2012, Vol. 7, Iss. 5, e38069, DOI: [10.1371/journal.pone.0038069](https://doi.org/10.1371/journal.pone.0038069).
25. Marcelino V., Cnudde V., Vansteelandt S., Carò F., An evaluation of 2D-image analysis techniques for measuring soil microporosity, *European Journal of Soil Science*, 2007, Vol. 58, pp. 133–140, DOI: [10.1111/j.1365-2389.2006.00819.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.2006.00819.x).
26. Mermut A.R., Norton L.D., Preface, *Geoderma*, Vol. 53, Iss. 3–4, pp. iii–iv, DOI: [10.1016/0016-7061\(92\)90053-A](https://doi.org/10.1016/0016-7061(92)90053-A).
27. PUSDÁ-Chulde M.R., Salazar-Fierro F.A., Sandoval-Pillajo L., Herrera-Granda E.P., García-Santillán I.D., De Giusti A., Image Analysis Based on Heterogeneous Architectures for Precision Agriculture: A Systematic Literature Review, *Advances in Intelligent Systems and Computing book series*, 2020, Vol. 1078, pp. 51–70, DOI: [10.1007/978-3-030-33614-1_4](https://doi.org/10.1007/978-3-030-33614-1_4).
28. Rodríguez J., Edeskär T., Knutsson S., Particle shape quantities and measurement techniques: a review, *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, 2013, Vol. 18, pp. 169–198.
29. Russ J.C., *The image processing handbook (5th edition)*, USA, Taylor & Francis Group, LLC, 2007, 818 p.
30. San José Martínez F., Muñoz Ortega F.J., Caniego Monreal F.J., Kravchenko A.N., Wang W., Soil aggregate geometry: Measurements and morphology, *Geoderma*, 2015, Vol. 237–238, pp. 36–48, DOI: [10.1016/j.geoderma.2014.08.003](https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2014.08.003).
31. Savin I.Y., Prudnikova E.Y., Vasilyeva N.A., Veretelnikova I.V., Bairamov A.N., The color of soils as a basis for proximal sensing of their composition, *Dokuchaev Soil Bulletin*, 2016, Vol. 86, pp. 46–52, DOI: [10.19047/0136-1694-2016-86-46-52](https://doi.org/10.19047/0136-1694-2016-86-46-52).
32. Sauzet O., Cammas C., Gilliot J.M., Bajard M., Montagne D., Development of a novel image analysis procedure to quantify biological porosity and illuvial clay in large soil thin sections, *Geoderma*, 2017, Vol. 292, pp. 135–148, DOI: [10.1016/j.geoderma.2017.01.004](https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.01.004).
33. Skvortsova E.B., Rozhkov V.A., Morphometric profiles of pore space in loamy soils of the forest and steppe zones of European Russia, *Eurasian Soil*

Science, 2011, Vol. 4, No. 10, pp. 1209–1221, DOI: [10.1134/S1064229311100140](https://doi.org/10.1134/S1064229311100140).

34. Stoops G., *Guidelines for analysis and description of soil and regolith thin sections*, Soil Sci. Soc. Am. Madison, Wisconsin, 2003, 184 p., DOI: [10.2136/2003.guidelinesforanalysis](https://doi.org/10.2136/2003.guidelinesforanalysis).

35. Stoops G., Micromorphology as a Tool in Soil and Regolith Studies, *Interpretation of Micromorphological Features of Soils and Regoliths*, 2018, pp. 1–19, DOI: [10.1016/b978-0-444-63522-8.00001-2](https://doi.org/10.1016/b978-0-444-63522-8.00001-2).

36. Takashimizu Y., Iiyoshi M., New parameter of roundness R: circularity corrected by aspect ratio, *Progress in Earth and Planetary Science*, 2016, Vol. 3, Article No. 2, DOI: [10.1186/s40645-015-0078-x](https://doi.org/10.1186/s40645-015-0078-x).

37. Wang Q., Hartemink A.E., Jiang Z., Jin N., Sun Z., Digital soil morphometrics of crotoquinas in a deep Alfisol derived from loess in Shenyang, China, *Geoderma*, 2017, Vol. 301, pp. 11–18, DOI: [10.1016/j.geoderma.2017.04.010](https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.04.010).

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

39. Wang Z, Liang X, Wu Z, Lin J, Huang J., A novel method for measuring anterior segment area of the eye on ultrasound biomicroscopic images using Photoshop, *PLoS ONE*, 2015, Vol. 10, Iss. 3, e0120843, DOI: [10.1371/journal.pone.0120843](https://doi.org/10.1371/journal.pone.0120843).

40. Zhao Y., Han Q., Zhao Y., Liu J., Soil pore identification with the adaptive fuzzy C-means method based on computed tomography images, *Journal of Forestry Research*, 2019, Vol. 30, pp. 1043–1052, DOI: [10.1007/s11676-018-0725-3](https://doi.org/10.1007/s11676-018-0725-3).

УДК 631.445.12

DOI: 10.19047/0136-1694-2020-104-223-240



Ссылки для цитирования:

Шишконокова Е.А., Аветов Н.А., Ананко Т.В., Герасимова М.И., Савицкая Н.В. Болотные торфяные почвы таежной и подтаежной зон Западной Сибири на цифровой модели почвенной карты России масштаба 1 : 2 500 000 в формате классификации почв России // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2020. Вып. 104. С. 223-240. DOI: 10.19047/0136-1694-2020-104-223-240

Cite this article as:

Shishkonakova E.A., Avetov N.A., Ananko T.V., Gerasimova M.I., Savitskaya N.V., Mire peat soils of the taiga and sub-taiga zones of West Siberia on a digital model of the soil map of Russia at a scale of 1 : 2 500 000 in terms of the Russian soil classification, Dokuchaev Soil Bulletin, 2020, V. 104, pp. 223-240, DOI: 10.19047/0136-1694-2020-104-223-240

**Болотные торфяные почвы таежной и
подтаежной зон Западной Сибири
на цифровой модели почвенной карты России
масштаба 1 : 2 500 000 в формате
классификации почв России**

© 2020 г. Е. А. Шишконокова^{1*}, Н. А. Аветов², Т. В. Ананко¹,
М. И. Герасимова^{1,2**}, Н. В. Савицкая¹

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

*e-mail: Shishkonakova_ea@esoil.ru,
***<https://orcid.org/0000-0002-1815-4476>,
e-mail: maria.i.gerasimova@gmail.com.

²МГУ им. М.В. Ломоносова, Россия,
119991, Москва, Ленинские горы, 1,
**e-mail: awetowna@mail.ru.

Поступила в редакцию 06.09.2020, принята к публикации 11.11.2020

Резюме: Цифровая версия почвенной карты Российской Федерации в масштабе 1 : 2 500 000 готовится на основе анализа атрибутивной части полигонов картографической базы данных торфяных почв таежной и

подтаежной зон Западной Сибири. Проведена коррекция содержания 795 полигонов общей площадью 179 483 км² из 1 711 рассмотренных, общей площадью 262 204 км². Представление о доминировании олиготрофных торфяников в Западно-Сибирской таежной области болот послужило основанием для предложения о замене в 598 полигонах общей площадью 87 250 км² преобладающих на карте мезотрофных торфяных почв на олиготрофные. Аналогичным образом предлагается замена в полигонах комплекса олиготрофных и мезотрофных торфяных почв (57 полигонов общей площадью 38 405 км²), в которых только олиготрофные торфяные почвы стали бы преобладающими. Вместе с тем в ряде полигонов, приуроченных в основном к подтаежной зоне, преобладающие олиготрофные почвы предлагается учитывать как мезотрофные торфяные почвы. В базе данных показанные на карте термокарстовые озера в грядово-мочажинных болотных комплексах вне криолитозоны можно не отображать, а деструктивные торфяные почвы предлагается привести в соответствие с новой трактовкой этого таксона в классификации почв. Выполненная работа должна повысить качество исследований в области оценки ресурсного потенциала торфяных почв Западной Сибири.

Ключевые слова: корректировка почвенной карты, олиготрофные торфяные почвы, мезотрофные торфяные почвы, болота Западно-Сибирской равнины.

Mire peat soils of the taiga and sub-taiga zones of West Siberia on a digital model of the soil map of Russia at a scale of 1 : 2 500 000 in terms of the Russian soil classification

E. A. Shishkonakova^{1*}, N. A. Avetov^{2}, T. V. Ananko¹,
M. I. Gerasimova^{1,2***}, N. V. Savitskaya¹**

¹*Federal Research Centre “V.V. Dokuchaev Soil Science Institute”,
7 Bld. 2 Pyzhevskiy per., Moscow 119017, Russian Federation,*

**e-mail: Shishkonakova_ea@esoil.ru,
***<https://orcid.org/0000-0002-1815-4476>,
e-mail: maria.i.gerasimova@gmail.com.*

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

Received 06.09.2020, Accepted 11.11.2020

Abstract: A digital version of the soil map of the Russian Federation, scale 1 : 2.5 M, is being prepared based on the analysis of the attributes of polygons with peat soils in the West-Siberian taiga and sub-taiga zones. The correction was performed in 795 polygons (with the total area of 179 483 km²) out of 1 711 polygons considered (with the total area of 262 204 km²). The currently formulated idea of the dominance of oligotrophic bogs in the West Siberian taiga region of mires served as the basis for suggestion to replace the mesotrophic peat soils by oligotrophic ones in 598 polygons of the total area of 87 250 km². Similarly, the polygons of microcatenas comprising oligotrophic and mesotrophic peat soils (57 polygons, total area of 38 405 km²) were modified: only oligotrophic peat soils were considered to be the dominant ones there. At the same time, a number of polygons with prevailing oligotrophic soils, confined mainly to the sub-taiga zone were proposed to be replaced by polygons with mesotrophic peat soils. The thermokarst pools in ridge-hollow mire complexes that were shown on the soil map of Russia beyond the permafrost zone were eliminated from the map database; the mapping of destructive peat soils was rearranged in accordance with the new interpretation of this taxon in the Russian soil classification. This work should improve the quality of research in the field of assessing the resource potential of peat soils in West Siberia.

Keywords: Soil map updating, oligotrophic peat soils, mesotrophic peat soils, mires of West-Siberian Plain.

ВВЕДЕНИЕ

Одним из главных достижений российской почвенной картографии XX в. следует, бесспорно, считать Почвенную карту РСФСР ([ПКРФ](#)), вышедшую под редакцией В.М. Фридланда в 1988 г. Она выступила своего рода итогом более чем столетнего развития отечественного докучаевского почвоведения и одновременно уникальным по географическому охвату проектом, позволившим получить актуальное для конца 1980-х годов представление о пространственном распределении почв ([Конюшков и др., 2020](#)). Поскольку со дня издания карты прошло немало времени, появились новые материалы о почвах и почвенном покрове, опубликованы версии субстантивно-генетической Классификации почв России 2004 г. и 2008 г. (КПР), Почвенный институт имени В.В. Докучаева начал работу по созданию цифровой модели Поч-

венной карты РФ с обновленным содержанием в формате КПР. Первые результаты этой работы представлены в ряде публикаций, в том числе по отдельным почвам, группам почв и регионам ([Ананко и др., 2017](#); [Ананко и др., 2018](#); [Герасимова и др., 2018](#); [Конюшков и др., 2019](#)). Вместе с тем в процессе этой работы возникали проблемы, связанные с неравномерной изученностью почв и почвенного покрова территории страны и трудностями в переводе почв легенды ПКРФ в номенклатуру классификации почв России. Требующие решения вопросы обнаружились при этом в отношении торфяных болотных почв, крупные ареалы которых приходится как раз на слабо исследованные в почвенном отношении районы Западно-Сибирской равнины (рис. 1).

В контексте данной статьи под болотами подразумеваются только торфяные болота и болотные почвы с мощностью торфа более полуметра, представленные в легенде ПКРФ в двух блоках: в списке собственно почвенных единиц (основная легенда) и в списке почвенных комплексов из комбинаций почв первого списка. В основной легенде выделены торфяные болотные деградирующие, торфяные болотные верховые, торфяные переходные и торфяные низинные почвы. В легенду включены также торфяные солончаковатые почвы и почвы болот Западной Камчатки с прослоями пеплов, которые находятся вне объектов рассмотрения статьи. Из торфяных почв легенды две имеют полные аналоги в КПР, но с несколько иными названиями: олиготрофные и эвтрофные⁵, соответственно. Почвы переходных болот (мезотрофные) предлагается ввести в КПР, используя ботанические методы диагностики, широко применяемые торфоведами ([Инишева, 2006](#); [Аветов, Шишконокова, 2019](#)) и в некоторых зарубежных почвенных классификациях, например, в немецкой ([Bodenkundliche..., 1994](#)).

⁵ В классификации почв России использовано написание “эутрофные”.

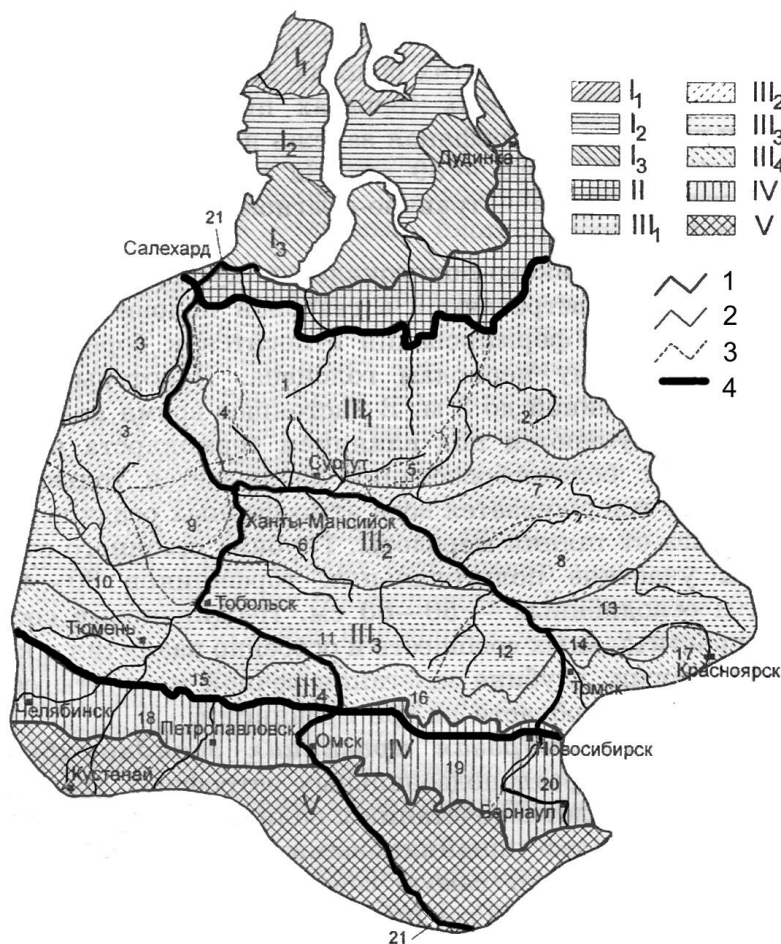


Рис. 1. Схема районирования болот Западно-Сибирской равнины с указанием района корректировки почвенной карты РФ (по [Лисс и др., 2001](#) с дополнениями).

Fig. 1. Zoning scheme of mires in West-Siberian Plain with indication of the updating area of the soil map of the Russian Federation (according to [Liss et al., 2001](#) with additions).

Болотные области: I – Западно-Сибирская тундровая пребореально-бореальных полигональных эвтрофных травяных, травя-

но-моховых, кустарничково-травяно-моховых, лишайниковых болот слабого торфонакопления; II – Западно-Сибирская лесотундровая пребореально-бореальных эвтрофно-олиготрофных бугристых кустарничково-мохово-лишайниковых, мохово-лишайниковых и травяно-моховых болот умеренного торфонакопления; III – Западно-Сибирская таежная бореально-атлантических выпуклых олиготрофных моховых болот активного заболачивания и интенсивного торфонакопления; IV – Западно-Сибирская лесостепная атлантико-суббореальных вогнутых эвтрофных травяных болот слабого заболачивания и торфонакопления.

Болотные провинции: I₁ – арктическая тундровая Западно-Сибирских эвтрофных травяных и травяно-моховых болот в сочетании с валико-полигональными комплексами и мохово-лишайниковыми пятнистыми тундрами; I₂ – типичная тундровая Западно-Сибирских эвтрофных полигональных кустарничково-осоково-моховых и некомплексных травяно-моховых болот; I₃ – южная тундровая Западно-Сибирских комплексных трещиновато-полигональных, плоско-бугристых кустарничково-моховых и некомплексных кустарничково-сфагново-лишайниковых болот; III₁ – северотаежная Западно-Сибирских олиготрофных озерково-грядовых и сосново-кустарничково-сфагновых кладиновых болот; III₂ – среднетаежная Западно-Сибирских олиготрофных грядово-мочажинных и сосново-кустарничково-сфагновых болот; III₃ – южнотаежная Западно-Сибирских олиготрофных сосново-кустарничково-сфагновых и грядово-мочажинных, мезотрофных и эвтрофных сосново-березово-осоково-гипновых (или сфагновых) и осоково-гипновых (или сфагновых) болот; III₄ – подтаежная Западно-Сибирских атлантических эвтрофных осоково-гипновых болот.

Болотные округа: 1 – Сургутско-Полесский; 2 – Вахский; 3 – Сосьвинский; 4 – Обь-Назымский; 5 – Аганский; 6 – Салымо-Юганский; 7 – Тым-Вахский; 8 – Кеть-Тымский; 9 – Кондинский; 10 – Тавдинский; 11 – Васюганский; 12 – Бакчарский; 13 – Кеть-Чулымский; 14 – Обь-Чулымский; 15 – Северотоболо-Ишимский; 16 – Северобарабинский; 17 – Чулымский; 18 – Южнотоболо-Ишимский; 19 – Южнобарабинский; 20 – Барнаульский; 21 – Ир-

тышско-Обский.

Границы: 1 – областей; 2 – провинций; 3 – округов; 4 – границы района корректировки полигонов торфяных почв таежной и подтаежной зон Западно-Сибирской равнины.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Предложения по корректировке полигонов болотных почв и их комплексов на ПКРФ были разработаны для центральных районов Западно-Сибирской равнины, в том числе всей ее таежной зоны, подтайги и северной лесостепи (рис. 1). Изменения вносились только в атрибутивную базу данных с сохранением контурной части карты. Корректировка содержания полигонов болотных почв проводилась на основании сопоставления его на ПКРФ с ареалами болот по следующим картографическим материалам: карта [“Растительность Западно-Сибирской равнины” \(1976\)](#), фондовые картографические материалы производственного геологического объединения “Торфгеология”, карта районирования болотных систем в монографии [О.Л. Лисс с соавторами \(2001\)](#), серия тематических карт [Атласа ХМАО-Югры \(2004\)](#) и почвенная карта участка Салым-Иртышского междуречья площадью 3 636 км² в масштабе 1 : 200 000 ([Аветов и др., 2017](#)). Привлекались также общие сведения о географии разных типов болот в Западной Сибири, данные маршрутных исследований Н.А. Аветова и Е.А. Шишкова в ХМАО-Югре и некоторых прилегающих к округу районах ЯНАО и Томской области, спутниковые изображения заболоченных территорий (Landsat).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Проводившиеся с середины 50-х годов XX в. интенсивные болотоведческие исследования в центре Западной Сибири, сначала силами производственного геологического объединения “Торфгеология”, а затем и ряда крупнейших научных учреждений России (Московский университет, Гидрологический институт (Санкт-Петербург), Томский университет, Институт географии СО АН СССР), позволили сформировать общие представления о регионально-зональных закономерностях распределения различных

типов болот, строении торфяных залежей, их эволюции в голоцене. О масштабах развернувшихся работ свидетельствуют, например, такие данные: участниками экспедиции Гидрологического института было изучено около 4 000 буровых скважин ([Усова, 2017](#)), а коллективом кафедры геоботаники МГУ за первые пять лет деятельности западносибирского отряда под руководством С.Н. Тюремнова был выполнен спорово-пыльцевой и ботанический анализ приблизительно 2 000 образцов торфа ([Тюремнов и др., 1971](#)). Большое значение имели публикация карты “Растительность Западно-Сибирской равнины” в масштабе 1 : 1 500 000 ([1976](#)) и, несколько позже, выход в свет монографии “Растительный покров Западно-Сибирской равнины” ([Ильина и др., 1985](#)). Вопросам заболачивания территории среднетаежной подзоны Западной Сибири были посвящены фундаментальные исследования [Н.А. Караваевой \(1982\)](#). В свою очередь, итоги изучения болот региона в XX в. были подведены в монографии “Болотные системы Западной Сибири, их природоохранное значение” ([Лисс и др., 2001](#)).

На основании проведенных исследований было установлено абсолютное господство в таежной зоне Западной Сибири олиготрофных болот. Согласно выполненному О.Л. Лисс с соавторами ([2001](#)) районированию болотных систем Западно-Сибирской равнины, из 14 округов таежной зоны, образующих в этой системе Западно-Сибирскую таежную болотную область, мезотрофные переходные болота преобладают только в одном, наименьшем по площади – Обь-Чулымском округе, в то время как в семи округах они не упоминаются даже в качестве сопутствующих компонентов. Важно отметить, что округа с наибольшей заболоченностью (до 90%) в северной половине таежной зоны одновременно характеризуются и максимальным участием верхового торфа в строении торфяных залежей. В частности, в Сургутско-Полесском округе на долю верхового торфа приходится 80% от общих запасов, в Вахском и Тым-Вахском – 95%, в Салымо-Юганском – 78% ([Лисс и др., 2001](#); [Атлас ХМАО-Югры, 2004](#)). Учитывая, что развитие болот в голоцене поступательно шло от эвтрофных к олиготрофным, а мощность торфяников в среднем превышает 2 м ([Лисс и др., 2001](#)), залегание переходных и низинных торфов в

большинстве случаев находится за пределами профиля, т. е. глубже 50 см, поскольку ниже следует органогенная порода – ТТ (см. [Классификация..., 2004](#), с. 42). По данным Н.А. Караваевой, одной из главных причин такой стратиграфии торфяных отложений в Сургутском Полесье была чрезвычайно быстрая смена фаз торфообразования на начальном временном отрезке развития болот в голоцене. Так, эвтрофная фаза длилась всего 280 лет, мезотрофная – 1 400, в то время как олиготрофная продолжается уже 6 000 лет ([Караваева, 1982](#)).

Материалы О.Л. Лисс, полученные на основе анализа спутниковых изображений в процессе подготовки карты болот в Атлас ХМАО-Югры, свидетельствуют, что общая площадь болот (без учета Иртышской и Обской пойм) в границах ХМАО-Югры составляет 185 707 км², из которых на верховые болота приходится 172 170 км² (92.7%). Близки к этим значениям и соотношения между болотными торфяными почвами, выявленные в ходе почвенного картографирования в бассейне реки Большой Салым в масштабе 1 : 200 000, согласно которым верховые, переходные и низинные почвы занимают соответственно 41.9%, 2.8%, 2.4% ([Аветов и др., 2017](#)), т. е. доля верховых почв от общей площади болотных почв достигает 89%.

Вместе с тем доля переходных болот возрастает в южнотаежной подзоне, где они закономерно занимают периферийные части крупных болотных массивов, что, в свою очередь, проявляется в некотором снижении участия верховых торфов по сравнению с вышерассмотренными залежами севера таежной зоны. Так, в южнотаежной подзоне на долю верхового торфа от общих запасов приходится в Васюганском болотном округе 59%, в Бачкарском – 40%, а в Кеть-Чулымском – 50% ([Лисс и др., 2001](#)). Южнее, в подтаежной зоне, ведущая роль в формировании болотных ландшафтов переходит к мезотрофным и эвтрофным болотам, причем их почти исключительное доминирование наблюдается в слабо заболоченных районах с небольшими по размерам (100–1 000 га) болотами. В этом отношении показателен Северотоболо-Ишимский округ: при заболоченности территории менее 22% низинный торф формирует 94% запасов торфяных залежей, в то время как в рас-

положенном к востоку от него Северобарабинском округе (со средней степенью заболоченности около 40%) – только 42%.

Специального рассмотрения заслуживает вопрос о генезисе озер и озерков, широко распространенных среди бореальных верховых болот Западной Сибири. В настоящее время в литературе господствует мнение об их внутриболотном происхождении, в соответствии с которым подавляющее большинство озерков и малых озер на верховых (в некоторых случаях переходных) болотах генетически связано с процессами, сопровождающими болотообразование и торфонакопление ([Караваева, 1982](#); [Лисс и др., 2001](#); [Атлас ХМАО-Югры, 2004](#); [Belyea, Lancaster, 2002](#); [Comas et al., 2005](#); [Karofeld et al., 2015](#)). Н.А. Караваева ([1982](#)) рассматривала их в качестве неотъемлемого компонента болот в рамках предложенного ею представления о “регрессивно-топяной” эволюции. Одним из промежуточных звеньев на пути формирования озерков на верховых болотах служат “черные” или регрессивные мочажины, способные к обводнению во влажные периоды ([Karofeld et al., 2015](#)) и к постепенной трансформации в постоянные озерки ([Лисс и др., 2001](#)). В связи с этим следует отметить, что почвы “черных мочажин”, согласно предложениям Н.А. Аветова и Е.А. Шишкова (2019), также могут в дальнейшем найти свое место на почвенных картах в качестве компонентов отображаемых почвенных комплексов. В любом случае следует признать целесообразным исключение термина “термокарстовые озера” из названия грядово-озерковых комплексов в почвенных полигонах бореальных болот вне ареала многолетнемерзлых пород. В то же время термокарстовые озерки (озера) являются характерным элементом комплексов мерзлотных болот в зоне лесотундры и прилегающих районов северной тайги. Они повсеместно сопровождают болотные плоско- и крупнобугристые комплексы в местах их распространения.

Наконец, еще одним аспектом корректировки карты стало разночтение, обусловленное присутствием в ее легенде торфяных болотных деградирующих почв. По-видимому, развитие этих почв связывали с явлениями регресса и сопутствующей им минерализации, в разных формах обнаруживаемых как в тундровых, так и в бореальных болотах. Н.А. Караваева ([1982](#)), в частности, отмеча-

ла, что минерализованные торфяники занимают в подзоне средней тайги ограниченные площади внутри массивов сильно обводненных болот. В современной классификации к упомянутой почвенной разности, на первый взгляд, близок по смыслу подтип деструктивных почв, выделенный в рамках типа торфяных олиготрофных почв ([КПР, 2004](#)). Его описание, однако, ограничивает происхождение деструктивных подтипов случаями отрыва торфяной залежи от грунтовых вод “в результате нарастания торфа вверх и мерзлотного выпучивания торфяных бугров”. Приуроченность деструктивных почв к мерзлым буграм вызывает необходимость их удаления из районов распространения бореальных болот ([КПР, 2004](#)). Соответственно, деструктивные болота сохраняются только в области многолетнемерзлых пород.

Следуя приведенным выше данным, касающимся распределения болот в центре Западно-Сибирской равнины, на ПКРФ предлагается внести изменения в содержание полигонов торфяных болотных почв в БД. В северной половине таежной зоны исправления носили ясно выраженный однонаправленный характер и были связаны с устранением избыточно отображенных полигонов торфяных мезотрофных почв переходных болот, занимающих, как было показано выше, около 10% заболоченных территорий. Они были заменены ареалами олиготрофных почв (табл. 1). Количество исправляемых с понижением трофности полигонов позволяет говорить об исходных диспропорциях между олиготрофными и мезотрофными болотными почвами на почвенной карте. Из 1 188 полигонов мезотрофных почв (общей площадью 131 406 км²) были исправлены путем замены основной (Soil 0 в БД) мезотрофной почвы на олиготрофную 598 полигонов (общей площадью 87 250 км²). Кроме того, в 135 полигонов площадью 13 786 км², в которых сохранены преобладающими мезотрофные почвы, следует добавить в качестве сопутствующих (Soil 1) олиготрофные почвы. Корректировка содержания других полигонов имела несопоставимо меньшие масштабы и не носила такого системного характера.

Таблица 1. Результаты корректировки содержания полигонов торфяных почв центра Западной Сибири (по основной (первой) почве, без учета изменений сопутствующих почв)

Table 1. Results of correction of peat soil polygons in the centre of West Siberia (for the main (first) soil, without taking into account changes of accompanying soils)

Названия почв в полигонах БД	Всего подвергнутых корректировке полигонов БД		Полигоны БД без изменения		Полигоны БД с повышением трофности*		Полигоны БД с понижением трофности**	
	Количество	Площадь, км ²	Количество	Площадь, км ²	Количество	Площадь, км ²	Количество	Площадь, км ²
Торфяные олиготрофные	343	62 510	265	23 897	78	38 613	–	–
Торфяные олиготрофные и торфяные мезотрофные	110	59 217	49	19 671	4	1 141	57	38 405
Торфяные мезотрофные	1 188	131 406	558	35 714	32	8 442	598	87 250
Торфяные мезотрофные и торфяные эвтрофные	6	1 963	–	–	–	–	6	1 963
Торфяные эвтрофные	64	7 108	44	3 439	–	–	20	3 669
ИТОГО	1 711	262 204	916	82 721	114	48 196	681	131 287

Примечание. * – в полигонах БД с повышением трофности олиготрофные торфяные почвы переведены в мезотрофные или эвтрофные, мезотрофные – в эвтрофные.

** – в полигонах БД с понижением трофности мезотрофные торфяные почвы переведены в олиготрофные; эвтрофные – в мезотрофные или олиготрофные.

В южных районах таежной зоны, а тем более в подтайге и лесостепи, процесс корректировки содержания полигонов болотных почв в значительной степени представляет собой анализ каждого почвенного полигона без определенно выраженных трендов по степени трофности торфяных почв. В подтаежной и лесостепной зонах Западной Сибири олиготрофные болота занимают почти исключительно центральные части крупных массивов, в то время как мелкие болота площадью 100–1000 га, не учитываемые в масштабе 1 : 2 500 000 (даже в виде сопутствующих компонентов при их доле в составе почвенного покрова менее 10%), представлены только эвтрофными и мезотрофными типами, что *a priori* приводит к некоторому завышению участия олиготрофных почв.

Из болотных грядово-озерковых комплексов, расположенных вне криолитозоны, следует исключить “термокарстовые озера”. Из 71 полигона торфяных олиготрофных и торфяных мезотрофных почв “с мелкими термокарстовыми озерами” общей площадью 83 542 км² в 68 полигонах площадью 82 074 км² может быть осуществлено указанное исправление. В то же время 3 полигона на севере таежной зоны, имеющие совокупную площадь 1 468 км² и входящие в пределы криолитозоны, были оставлены без изменений.

Следует отметить, что помимо изъятия из названия болотного комплекса “термокарстовых озер”, эта группа полигонов одновременно была подвергнута корректировке и в отношении “понижения” их трофности: в 43 полигонах общей площадью 63 065 км² мезотрофные фоновые компоненты (Soil 0 в БД) были заменены на олиготрофные.

В 14 полигонах общей площадью 104 99 км², расположенных за пределами криолитозоны, из названий был исключен подтиповой признак “деградирующие” (деструктивные) торфяные почвы. Поскольку на ПКРФ деградирующие почвы присутствуют только в качестве сопутствующего компонента, указанные здесь полигоны с изменениями основной почвы учтены в таблице.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предлагается корректировка содержания полигонов торфяных болотных почв центральной части Западно-Сибирской равни-

ны, способствующая приведению в соответствие их отображения на Почвенной карте РСФСР М 1 : 2.5 млн с современными знаниями о закономерностях распространения различных типов болот.

В основном это касается выделенных в таежной зоне многочисленных полигонов мезотрофных торфяных почв (598) общей площадью 87 250 км² с заменой основной почвы на олиготрофную. В меньшем, но также весьма значительном объеме были изменены полигоны грядово-мочажинных комплексов олиготрофных и мезотрофных почв: в этом случае в 57 полигонах общей площадью 38 405 км² в качестве единственного основного компонента была введена олиготрофная торфяная почва. Внесенные исправления отражают сформировавшееся в настоящее время представление о доминировании в таежной зоне Западной Сибири болот верхового типа. Вместе с тем 78 полигонов олиготрофных почв общей площадью 38 613 км², занимающих преимущественно южные районы таежной, подтаежную и лесостепную зоны были пересмотрены в сторону повышения трофности и соответствующей замены основного компонента – олиготрофной торфяной почвы на мезотрофную.

В ходе проведенной работы были также устранены показанные на ПКРФ вне зоны распространения многолетнемерзлых пород термокарстовые озера (озерки), а деструктивные торфяные почвы аналогичным образом были исключены из районов, расположенных за пределами криолитозоны.

Выполненная работа может придать импульс сразу нескольким важным направлениям исследований в почвоведении и экологии, связанным с необходимостью оценки ресурсного потенциала различных типов болот на Западно-Сибирской равнине в целом. Во-первых, открывается возможность для уточнения расчетов баланса углерода и, следовательно, оценки влияния различных типов болот на глобальные климатические изменения. Во-вторых, несомненную актуальность представляет дифференцированное, в зависимости от распространения тех или иных торфяных почв, рассмотрение возможностей сельскохозяйственного развития в подтаежной зоне и некоторых районах южнотаежной подзоны Западной Сибири с учетом происходящего потепления. В-третьих, оценка ресурсов дикорастущих пищевых растений болот важна с

точки зрения выявления приоритетных направлений охраны территорий проживания коренных народов центра Западной Сибири – ханты, манси, ненцев – ведущих традиционную хозяйственную деятельность. Между тем, согласно данным [О.М. Завалишиной \(2002\)](#), ценность торфяных почв по этому показателю по 100-балльной шкале резко контрастирует, составляя у олиготрофных почв 8–12 баллов, у мезотрофных – 3–11, а у эвтрофных –1–2 балла.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Аветов Н.А., Аветян С.А., Маречек М.С., Цейц М.А.* Анализ строения и состава почвенного покрова Салым-Иртышского междуречья на основе актуализированной почвенной среднемасштабной карты // Вестник Московского университета. Сер. 17: Почвоведение. 2017. № 1. С. 3–8.
2. *Аветов Н.А., Шишконокова Е.А.* Некоторые аспекты систематики и диагностики торфяных почв бореальных болот // Почвоведение. 2019. № 8. С. 901–909.
3. *Ананко Т.В., Герасимова М.И., Конюшков Д.Е.* Опыт обновления почвенной карты РСФСР масштаба 1 : 2.5 млн в системе классификации почв России // Почвоведение. 2017. № 12. С. 1411–1420.
4. *Ананко Т.В., Герасимова М.И., Конюшков Д.Е.* Почвы горных территорий в классификации почв России // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2018. Вып. 92. С. 122–146. DOI: [10.19047/0136-1694-2018-92-122-146](#).
5. Атлас Ханты-Мансийского автономного округа – Югры. Природа и экология. Т. 2. Ханты-Мансийск – Москва, 2004. 152 с.
6. *Герасимова М.И., Ананко Т.В., Конюшков Д.Е.* Предложения к классификации почв России по итогам анализа Почвенной карты РСФСР масштаба 1 : 2.5 млн (1988) // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2018. Вып. 95. С. 58–70. DOI: [10.19047/0136-1694-2018-95-58-70](#).
7. *Завалишина О.М.* Почвы средней тайги Западно-Сибирской низменности и их комплексная качественная оценка по дикоросам: Автореф. дис. ... канд. с.-х. наук. 06.01.03. Барнаул, 2002. 19 с.
8. *Ильина И.С., Лапина Е.И., Лавренко Н.Н. и др.* Растительный покров Западно-Сибирской равнины. Новосибирск: Наука, 1985. 251 с.
9. *Инишева Л.И.* Торфяные почвы: их генезис и классификация // Почвоведение. 2006. № 7. С. 781–794.
10. *Караева Н.А.* Заболачивание и эволюция почв. М.: Наука, 1982. 296

с.

11. Классификация и диагностика почв России. Смоленск: Ойкумена, 2004. 342 с.
12. Конюшков Д.Е., Герасимова М.И., Ананко Т.В. Корреляция дерново-карбонатных почв на почвенной карте РСФСР масштаба 1 : 2.5 млн и в системе классификации почв России // Почвоведение. 2019. № 3. С. 276–289.
13. Конюшков Д.Е., Ананко Т.В., Герасимова М.И., Лебедева И.И. Актуализация содержания почвенной карты РСФСР масштаба 2.5 млн в формате классификации почв России для создания новой цифровой карты // Бюллетень Почвенного института им. В.В. Докучаева. 2020. Вып. 102. С. 21–48. DOI: [10.19047/0136-1694-2020-102-21-48](https://doi.org/10.19047/0136-1694-2020-102-21-48).
14. Лисс О.Л., Абрамова Л.И., Аветов Н.А. и др. Болотные системы Западной Сибири и их природоохранное значение. Тула: Гриф и К, 2001. 584 с.
15. Почвенная карта РСФСР. М 1 : 2 500 000 / Под. ред. В.М. Фридланда. М.: ГУГК, 1988. 16 листов.
16. Растительность Западно-Сибирской равнины. Карта М 1 : 1 500 000 / Под. ред. И.С. Ильиной. М.: ГУГК, 1976. 4 листа.
17. Тюремнов С.Н., Лисс О.Л., Куликова Г.Г. Торфяные отложения левобережного Приобья северной части Томской области // Природные условия Западной Сибири. Вып. 1. М.: Изд-во Московского ун-та, 1971. С. 65–76.
18. Усова Л.И. Использование материалов аэрофотосъемки при исследовании болот в Государственном гидрологическом институте // Материалы конференции “VIII Галкинские чтения”. СПб.: СПбГЭТУ “ЛЭТИ”, 2017. С. 117–120.
19. Belyea L.R., Lancaster J. Inferring landscape dynamics of bog pools from scaling relationship and spatial patterns // J. Ecol. 2002. Vol. 90. P. 223–234.
20. Bodenkundliche Kartieranleitung (AG Boden), Hannover, 1994. 392 s.
21. Comas X., Slater L., Reeve A. Stratigraphic controls on pool formation in a domed bog inferred from ground penetrating radar (GRP) // J. Hydrol. 2005. Vol. 315. P. 40–51.
22. Karofeld E., Rivis R., Tõnisson H., Vellak K. Rapid changes in plant assemblages on mud-bottom hollows in raised bog: a sixteen-year study // Mires and Peat. 2015. Vol. 16. Art. 11. P. 1–13.

REFERENCES

1. Avetov N.A., Avetyan S.A., Marechek M.S., Tseits M.A., Analiz stroeniya i sostava pochvennogo pokrova Salym-Irtyshskogo mezhdurech'ya na osnove

aktualizirovannoi pochvennoi srednemasshtabnoi karty (Analysis of structure and composition of the soil cover of the Salym-Irtysh interfluvium on the basis of updated soil medium-scale map), *Vestnik Moskovskogo universiteta, Ser. 17: Pochvovedenie*, 2017, No. 1, pp. 3–8.

2. Avetov N.A., Shishkonakova E.A., Nekotorye aspekty sistematiki i diagnostiki torfyanykh pochv boreal'nykh bolot (Some aspects of systematics and diagnostics of peat soils in boreal mires), *Pochvovedenie*, 2019, No. 8, pp. 901–909.

3. Ananko T.V., Gerasimova M.I., Konyushkov D.E., Opyt obnovleniya pochvennoi karty RSFSR masshtaba 1 : 2.5 mln v sisteme klassifikatsii pochv Rossii (Experience of updating the 1 : 2.5 million scale soil map of the RSFSR in the Russian soil classification system), *Pochvovedenie*, 2017, No. 12, pp. 1411–1420.

4. Ananko T.V., Gerasimova M.I., Konyushkov D.E., The soils of mountainous territories, *Dokuchaev Soil Bulletin*, 2018, Vol. 92, pp. 122–146, DOI: [10.19047/0136-1694-2018-92-122-146](https://doi.org/10.19047/0136-1694-2018-92-122-146).

5. *Atlas Khanty-Mansiiskogo avtonomnogo okruga – Yugry* (Atlas of the Khanty-Mansi Autonomous Okrug-Yugra), In: *Priroda i jekologija* (Nature and Ecology), Vol. 2, Hanty-Mansijsk – Moscow, 2004, 152 p.

6. Gerasimova M.I., Ananko T.V., Konyushkov D.E., Proposals to the Russian soil classification system on the basis of the analysis of the Soil map of the Russian Federation (1 : 2.5 M scale, 1988), *Dokuchaev Soil Bulletin*, 2018, No. 95, pp. 58–70, DOI: [10.19047/0136-1694-2018-95-58-70](https://doi.org/10.19047/0136-1694-2018-95-58-70).

7. Zavalishina O.M., *Pochvy srednei taigi Zapadno-Sibirskoi nizmennosti i ikh kompleksnaya kachestvennaya otsenka po dikorosam: Avtoref. dis. ... kand. s.-kh. nauk* (Soils of the middle taiga of the West Siberian lowland and their complex qualitative assessment by wild food plants, Extended abstract of Cand. agri. sci. thesis), 06.01.03, Barnaul, 2002, 19 p.

8. Il'ina I.S., Lapshina E.I., Lavrenko N.N. et al., *Rastitel'nyi pokrov Zapadno-Sibirskoi ravniny* (Vegetation cover of West Siberian Plain, Novosibirsk: Nauka, 1985, 251 p.

9. Inisheva L.I., Torfyanye pochvy: ikh genezis i klassifikatsiya (Peat soils: their genesis and classification), *Pochvovedenie*, 2006, No 7, pp. 781–794.

10. Karavaeva N.A., *Zabolachivanie i evolyutsiya pochv* (Paludification and soil evolution), Moscow: Nauka, 1982, 296 p.

11. Shishov L.L., Tonkonogov V.D., Lebedeva I.I., Gerasimova M.I. (Eds), *Klassifikatsiya i diagnostika pochv Rossii* (Classification and diagnostics of Russian soils), Smolensk: Oikumena, 2004, 342 p.

12. Konyushkov D.E., Gerasimova M.I., Ananko T.V., Korrelyatsiya dernovo-karbonatnykh pochv na pochvennoi karte RSFSR masshtaba 1 : 2.5 mln i v sisteme klassifikatsii pochv Rossi (Correlation of sod-carbonate soils on the

soil map of the RSFSR, scale 1: 2.5 million, and in the Russian soil classification system), *Pochvovedenie*, 2019, No. 3, pp. 276–289.

13. Konyushkov D.E., Ananko T.V., Gerasimova M.I., Lebedeva I.I., Actualization of the contents of the soil map of Russian Federation (1 : 2.5 M scale) in the format of the classification system of Russian soils for the development of the new digital map of Russia., *Dokuchaev Soil Bulletin*, 2020, Vol. 102, pp. 21–48, DOI: [10.19047/0136-1694-2020-102-21-48](https://doi.org/10.19047/0136-1694-2020-102-21-48).

14. Liss O.L., Abramova L.I., Avetov N.A. et al., *Bolotnye sistemy Zapadnoi Sibiri i ikh prirodookhrannoe znachenie* (Mire systems of West Siberia and their environmental significance), Tula: Grif i K, 2001, 584 p.

15. Friedland V.M. (Ed.), *Pochvennaya karta RSFSR M 1 : 2 500 000* (Soil map of the Russian Federation 1 : 2.5 M scale), Moscow: GUGK, 1988, 16 sheets.

16. Il'ina I.S. (Ed.), *Rastitel'nost' Zapadno-Sibirskoi ravniny. Karta M 1 : 1 500 000* (Vegetation of West Siberian Plain. Map 1.5 M scale), Moscow: GUGK, 1976, 4 sheets.

17. Tyuremnov S.N., Liss O.L., Kulikova G.G., Torfyanye otlozheniya levoberezhnogo Priob'ya severnoi chasti Tomskoi oblasti i (Peat deposits of the left-bank Ob area in the Northern part of the Tomsk region), *Prirodnye usloviya Zapadnoj Sibiri*, Iss. 1, Moscow: Izdatelstvo Moskovskogo universiteta, 1971, pp. 65–76.

18. Usova L.I., Ispol'zovanie materialov aerofotos'emki pri issledovanii bolot v Gosudarstvennom gidrologicheskom institute (Use of aerial photography materials in the study of mires in the State hydrological Institute), *Proc. Conf. "VIII Galkinskie chteniya"* (Proceedings of the 8th Conference in Memoriam of Ekaterina Alexeevna Galkina), Saint-Petersburg: SPbGETU "LETI", 2017, pp. 117–120.

19. Belyea L.R., Lancaster J., Inferring landscape dynamics of bog pools from scaling relationship and spatial patterns, *J. Ecol.*, 2002, Vol. 90, pp. 223–234.

20. *Bodenkundliche Kartieranleitung*, AG Boden (Soil Mapping Guide), Hannover, 1994, 392 p.

21. Comas X., Slater L., Reeve A., Stratigraphic controls on pool formation in a domed bog inferred from ground penetrating radar (GRP), *J. Hydrol.*, 2005, Vol. 315, pp. 40–51.

22. Karofeld E., Rivis R., Tönisson H., Vellak K., Rapid changes in plant assemblages on mud-bottom hollows in raised bog: a sixteen-year study, *Mires and Peat*, 2015, Vol. 16, Art. 11, pp. 1–13.

УДК 631.4

DOI: 10.19047/0136-1694-2020-104-241-269



Ссылки для цитирования:

Укарханова Д.Т., Московченко Д.В., Юртаев А.А. К вопросу об изучении пылевидных образований в городских экосистемах // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2020. Вып. 104. С. 241-269.
DOI: 10.19047/0136-1694-2020-104-241-269

Cite this article as:

Ukarkhanova D.T., Moskovchenko D.V., Yurtaev A.A., On the question of studying dust-like formations in urban ecosystems, Dokuchaev Soil Bulletin, 2020, V. 104, pp. 241-269, DOI: 10.19047/0136-1694-2020-104-241-269

Благодарность:

Исследования выполнены при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-05-50062.

Acknowledgments:

The studies were carried out with the financial support of the Russian Foundation for Basic Research (RFBR) in the framework of the scientific project No. 19-05-50062.

К вопросу об изучении пылевидных образований в городских экосистемах

© 2020 г. Д. Т. Укарханова^{1*}, Д. В. Московченко^{1,2**},
А. А. Юртаев^{1***}

¹Тюменский государственный университет, Россия,
625003, г. Тюмень ул. Володарского, 6,

*<https://orcid.org/0000-0002-6138-6651>, e-mail: d.t.ukarkhanova@utmn.ru,

***<https://orcid.org/0000-0003-1780-2598>, e-mail: a.a.yurtaev@utmn.ru.

²Тюменский научный центр СО РАН, Россия,
625026, г. Тюмень, ул. Малыгина, 86,

**<https://orcid.org/0000-0001-6338-7669>, e-mail:
moskovchenko1965@gmail.com.

Поступила в редакцию 04.07.2020, принята к публикации 11.11.2020

Резюме: По данным Всемирной организации охраны здоровья, более 80% жителей городов подвергаются риску из-за недостаточного качества атмосферного воздуха. Загрязнение атмосферного воздуха является причиной приблизительно 4.2 миллиона смертей в год. Цель работы – дать обзор научных статей, касающихся запыленности природных сред

города. Были проанализированы статьи зарубежных и российских исследователей – дано определение городской дорожной пыли, рассмотрены главные техногенные и природные источники генерации пылевых частиц в городе, физические и химические свойства дорожной пыли, их зависимости от климата, типа дорог и архитектуры города, влияние процессов фотолиза на физико-химические показатели мелкодисперсных частиц. Особое внимание уделено негативному влиянию частиц пыли PM_{2.5} и PM₁₀ на здоровье человека и окружающую среду. Рассмотрен вопрос отсутствия в российской научной практике официально признанной методологии пробоотбора осевшей пыли при обновлении нормативной документации по методике отбора мелкодисперсных частиц, взвешенных в воздухе. Дана рекомендация по созданию нормативной базы, регулирующей процедуры пробоотбора и анализа дорожной пыли, являющейся геоиндикатором состояния окружающей среды, что подтверждается многочисленными выводами как зарубежных, так и некоторых отечественных исследователей.

Ключевые слова: PM_{2.5}, PM₁₀, мелкодисперсные частицы, пробоотбор.

On the question of studying dust-like formations in urban ecosystems

D. T. Ukarkhanova^{1*}, D. V. Moskovchenko^{1,2**}, A. A. Yurtaev^{1***}

¹University of Tyumen,

6 Volodarskogo str., Tyumen 625003, Russian Federation,

*<https://orcid.org/0000-0002-6138-6651>, e-mail: d.t.ukarkhanova@utmn.ru,

***<https://orcid.org/0000-0003-1780-2598>, e-mail: a.a.yurtaev@utmn.ru.

²Tyumen Scientific Centre SB RAS,

86 Malygina, Tyumen 625026, Russian Federation,

**<https://orcid.org/0000-0001-6338-7669>, e-mail:

moskovchenko1965@gmail.com.

Received 04.07.2020, Accepted 11.11.2020

Abstract: According to the World Health Organization, more than 80% of urban residents are at risk due to unsatisfactory air quality and air pollution, which causes approximately 4.2 million deaths per year. The purpose of the work is to give an overview of scientific articles related to the dustiness of the city's natural environments. The articles of foreign and Russian researchers were analyzed – the definition of urban road dust was given; the primary technogenic and natural sources of dust particle generation in the city, the

physical and chemical properties of road dust, their dependence on climate, the type of roads and city architecture, the effect of photolysis on physical-chemical characteristics of dust particles are reviewed as well. Particular attention is paid to the negative impact of dust particles PM_{2.5} and PM₁₀ on human health and the environment. The question of the absence in Russian scientific practice an officially recognized methodology for the settled dust sampling with updating the regulatory documentation on the methodology for the sampling of fine particles suspended in the air is considered. Recommendations are given on the creation of the regulatory framework governing the sampling and analysis of road dust, which is confirmed by the numerous conclusions of both foreign and some domestic researchers as an environmental geo-indicator.

Keywords: PM_{2.5}, PM₁₀, ultrafine particles, sampling.

INTRODUCTION

The study of the role of microparticles in the formation of a comfortable and safe environment in cities is currently an urgent scientific and practical problem.

Long-term studies performed by WHO confirm that high concentrations of airborne pollutants increase urban mortality. In the scientific literature the abbreviation PM (from “particulate matter”) is a universally recognized designation for dust particles, the number after PM indicates the maximum particle diameter in micrometers – PM₁, PM_{2.5}, PM₁₀ ([Amato et al., 2011](#)).

SOURCES OF STREET DUST

Sources of dust particles in urban conditions can be both technogenic – erosion of the roadway, road cleaning machines and brake pads, construction machines ([Kupiainen et al., 2007](#)), and natural – weathering of urban soils, volcanic ash, etc ([Mazzei et al., 2008](#)).

Technogenic sources associated with the functioning of transport can be divided into two subspecies:

- non-exhaust sources are not related to vehicle emissions, while dust particles are formed during mechanical abrasion: tire wear, brakes and road surface and road dust suspension ([Rogge et al., 1993](#));
- exhaust sources associated with vehicle exhausts produce small particles with a diameter of < 2.5 µm and ultrafine particles (UFP) with a diameter of < 0.1 µm with a central core of elemental carbon, on

which organic and inorganic compounds are absorbed the – so-called soluble organic fraction (SOF), which includes partially burnt fuel, residues of lubricating oil, tar-like particles and polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) ([Thorpe et al., 2008](#); [Murakami et al., 2005](#)).

The analysis of the data obtained in a number of European cities showed that the PM shares from non-exhaust and exhaust sources in the total volume of dust emissions associated with traffic are approximately equal ([Querol et al., 2004](#)).

In foreign studies, fine particles settled on the outer impermeable urban surfaces (roadway, pavement, roofs and walls of buildings, etc) are combined with the term “urban street dust” ([Charlesworth et al., 2003](#)). Road dust is listed separately, since transport communications are an important source and factor in the transformation of dust.

Road dust is considered to be a multi-component mixture of dust particles of different fractions deposited on road and roadside impermeable surfaces formed as a result of physical and chemical processes of natural (erosion of open ground, the ingress of plant materials on the roadway, etc) and anthropogenic (abrasion of the roadway, wear and tear of vehicles, the use of deicing reagents, incomplete combustion of fuel and etc) origin. Road dust particles accumulate toxic metals, metalloids and organic compounds on their surface and carry them billowing into the air by wind or air currents generated by traffic ([Chow et al., 1996](#); [Varrica et al., 2003](#); [Amato et al., 2009a](#); [Kosheleva et al., 2018](#)).

Primary sources of road dust were listed in various surveys and include vehicle wear, construction work and roadsides, road maintenance activities, precipitation, plant materials, etc ([Amato et al., 2014](#); [Boulter, 2005](#); [Denier van der Gon, 2013](#); [EPA, 2011](#)).

Due to the activation of airflow near the motorways, the dust content is also high there. Moderate winds (> 10 m/sec.) can carry particles of 1 mm in size and even larger ones through the air, as well as briefly lift and transport them in an airstream (so-called “saltation”). Particles < 0.05 mm can be carried even by weak winds. At a low wind speed of 2–3 m/sec., the smallest particles rise from the road surface because of the action of turbulent vortices near the ground and particles up to 1–2 microns in size do not settle under the influence of gravity ([Viana et al., 2006](#); [Charron, Harrison, 2005](#)). Motor vehicle traffic leads to blowing dust from the roadway, which generates about 37%

PM₁₀, 15% PM_{2.5} and 3% of the road transport emissions ([Viana et al., 2006](#); [Amato et al., 2009a](#); [Chen et al., 2012](#)).

The amount and chemical composition of road dust depends on the intensity of roadside soils erosion, the volume of emissions from mobile sources, the abrasion of road surfaces and markings, tires and brake pads wear, the corrosion of vehicles metal parts, as well as the traffic conditions, including the speed limit and a number of manoeuvres associated with stopping ([Murakami et al., 2007](#); [Irvine et al., 2009](#); [Nazzari et al., 2013](#)).

Different traffic flows affect the enrichment level of road dust for two reasons. The first one is “mechanical” – the higher speeds and blowing rates at highways intensify abrasion and weathering processes, which resulted in an increased proportion of large particles in settled dust comparing with small streets. In opposite, a large number of traffic lights, traffic jams and public transport stops on small and medium streets cause frequent interruptions and intensified abrasion of brake pads, tires and pavement, that increases proportion of fine particles in dust samples. Therefore, congestion and traffic lights, slowing the traffic flow to 20 km/h, lead to an increase in total traffic emissions by 30% ([Putaud et al., 2004](#); [Bityukova, Mozgunov, 2019](#); [Matisakov et al., 2016](#)). The second reason is “chemical”; the chemical composition of various types of fuels used for vehicles differs, as well as exhaust gases. The share of passenger transport (buses, trolleybuses, minibuses, etc) is larger on small and medium-sized intra-quarter roads, than on highways, where trucks and personal cars are dominant. Thus, when conducting ecogeochemical assessments of the impact of transport on the environment and ecogeochemical monitoring of urban areas it is necessary to study not only large highways, but also small and medium streets, where the traffic flow and wind speeds are lower and PM₁₀ and PM₁ accumulate concentrated heavy metals. Among them the most intensively accumulated ones are poorly studied in urban landscapes Sb, Cd, Ag ([Varrica et al., 2003](#); [Amato et al., 2009](#), [Wei et al., 2010](#)).

ROAD DUST – PHYSICAL AND CHEMICAL PROPERTIES

Road dust may be used as an informative geoindicator for geochemical assesment of cities in the warm-season, in the absence of snow cover or year-round. The analysis of studies on the chemical

composition of road dust is becoming increasingly relevant, chemical and isotopic composition of dust allows tracking the primary sources of elements in the urban environment ([Varrica et al., 2003](#); [Ladonin, Plyskina, 2009](#)). Some studies are focused on mineralogical and granulometric composition properties of road dust ([DUST..., 2014](#)).

At the elemental level, the distribution of Cd, Pb, Zn, Cu, Ni, Cr, Mn, Fe is studied better than of Sb, Bi, Mo, Ag, As ([Day, 1975](#); [Duggan, 1977](#); [Varrica et al., 2003](#); [Ahmed, Ishiga, 2006](#); [Amato et al., 2009b](#); [Quiroz et al., 2013](#)). The maximum concentrations of Zn, Cu, and Cd are found in dust settled near the curbstone; at the distance of 1 m from curbstone concentrations of Pb, Fe, and Ni reach their maximum. Exhaust gases contain Cu, Pb, Sr, motor oil – Fe, Mo, Zn, Cu, Pb, Sb; tire abrasion is the source of Cd, Mn, Fe, Zn, Pb, Co, Ni, Cr, Cu and Sb, brake pad wear – Fe, Cu, Sb, Mn, Zn, Ti, Pb ([Limbeck, Puls, 2011](#); [Adachi, Tainosho, 2004](#); [Iijima et al., 2007](#); [Gietl et al., 2010](#); [Quiroz et al., 2013](#)).

In Russia the accumulation of heavy metals and metalloids in road dust was studied only in several cities – in the Perm Territory, Ekaterinburg, in the Selenga River Basin (the Republic of Buryatiya), Voronezh and some areas of Moscow ([Kaigorodov et al., 2009](#); [Ladonin, Plyaskina, 2009](#); [Fedotov et al., 2014](#); [Vlasov et al., 2015](#); [Bityukova et al., 2016](#); [Sereda, 2015](#); [Prokof'eva et al., 2017](#); [Ladonin et al., 2018](#); [Seleznev, 2018](#); [Kasimov et al., 2019b](#)).

Urban road dust created by vehicle traffic is a depot for polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs), widely spread in urban environments; one of the main sources of PAHs is the incomplete combustion of fuel in internal combustion engines.

Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) are persistent and ubiquitous pollutants in urban environments. Some PAHs, such as benzo[a]pyrene, benzo[a]anthracene, benzo[b]fluoranthene, benzo[k]fluoranthene, chrysene, dibenzo[a,h]anthracene and indeno [1,2,3-cd]pyrene, it is reported to be toxic and mutagenic ([Nisbet, LaGoy, 1992](#); [USEPA, 1993](#); [Soltany et al., 2015](#)), while benzo[b]fluoranthene is recognized as a carcinogen ([Baird et al., 2005](#)).

Most international studies of PAHs in road dust have focused on chemical characteristics based on fraction size, seasonal variations, types of road surfaces, traffic intensity, types of vehicles, speed and

other aspects of the urban environment, with particular attention being paid to Tokyo metropolitan areas, Japan ([Murakami et al., 2005](#)), Dalian, China ([Wang et al., 2009](#)), Cairo, Egypt ([Hassanien, Abdel-Latif, 2008](#)), Ulsan, South Korea ([Dong, Lee, 2009](#)), Guangzhou, China ([Wang et al., 2011](#)), Sydney, Australia ([Nguyen al., 2014](#)) and Esfahan, Iran ([Soltani et al., 2015](#)).

The Russian history of studying the pollution of PAHs of settled dust particles is relatively short, and performed by a research group led by Academician N.I. Kasimov, studied the differentiation of benzo[a]pyrene in the dust of various types of roads in the administrative districts of Moscow and Alushta. A hazardous environmental situation characterizes Moscow road dust pollution, the average content of benzo[a]pyrene in the dust is 264 ng/g, which is 13.2 times more than the maximum permissible concentration for soils, and corresponds to an extremely dangerous environmental situation. The pollution level is exceptionally high in the northern, central and eastern parts of the city, mainly in the courtyards of residential buildings. The dust of the main highways and the Third Transport Ring is less polluted due to renewal of the road dust substance as a result of frequent sweeping and washing of the roadbed by city services ([Kasimov et al., 2017](#); [Vlasov et al., 2018](#); [Kasimov et al., 2019](#)). The average content of benzo[a]pyrene in road dust in Alushta as a whole is 97.3 ng/g, and of the PM10 fraction – 238.2 ng/g, which exceeds the maximum permissible concentration by 5 and 12 times, respectively ([Bezberdaya et al., 2017](#)).

Road dust is not only the main depot for polycyclic aromatic hydrocarbons (PAH), but also for substances converted (transformed) from PAH – transformed PAH products (TPPs) (Gan et al., 2009; Gupta and Gupta, 2015). TPPs can occur directly or indirectly in the process of fuel combustion and post-emission conversion and PAH degradation ([Albinet et al., 2006, 2007](#)). Currently there is a growing research interest in the distribution and transformation of PAHs in the environment due to the harmful effects of these pollutants on human health and the environment. Some of the TPPs have been studied and recognized as carcinogenic, mutagenic and oncogenic ([Abdel-Shafy, Mansour, 2016](#); [IARC, 1987](#)). Several studies have confirmed the hypothesis that the toxic effects of PAHs and TPPs are affected by the

processes of their post-emission transformation and degradation ([Gan et al., 2009](#); [Jia et al., 2014](#)).

Some TPP species, such as oxygenated PAHs (OPAH) and nitrated PAHs (NPAH), are potentially more toxic than their parental PAHs. NPAHs such as nitropyrene and dinitropyrene have a direct mutagenic effect on living organisms ([Albinet et al., 2006, 2007](#)). However, there is a lack of research on the origin and transformation of TPP after emission ([Achten, Andersson, 2015](#); [Albinet et al., 2007](#)), especially in road dust, although there is a high potential for harmful effects of TPP by inhalation.

Photolysis is one of the key processes by which PAHs and TPPs can transform and decompose in dust particles that cover urban road surfaces ([Gupta, Gupta, 2015](#); [Zhang et al., 2010](#)). Photolysis is the process of splitting chemical bonds due to the absorption of solar radiation ([Vione et al., 2006](#)). Because of the conjugated π -orbital electron systems, PAHs are classified as photoactive pollutants and are capable of absorbing photons ([Jia et al., 2015](#)). PAHs can absorb solar electromagnetic radiation in the UV and visible wavelength ranges of 280–400 nm and 400–760 nm, respectively ([Arfsten et al., 1996](#); [Fu et al., 2012](#); [Mallakin et al., 2000](#); [Yu et al., 2006](#)).

Activated PAHs can then undergo photophysical and photochemical processes, especially in the presence of coexisting molecules such as oxygen, ozone, hydrogen and NO_x, followed by the formation of various TPPs. Transformation and degradation processes often lead to the formation of oxygenated PAHs, nitro-PAHs, aldehydes, ketones, carboxylic acid and phenols ([Gbeddy et al., 2019](#)). According to our knowledge, no studies have been conducted to evaluate the photoconversion and degradation of PAHs and TPPs on road surfaces. Existing studies are mainly related to soil and particles suspended in the atmosphere, whose compositional characteristics differ from settled dust particles.

DEPENDENCE ON SEASONAL PATTERNS AND CITY LANDSCAPE/TYPE OF ROADS

The ratio and composition of the PM_{0.1}, PM₁ and PM_{2.5} fractions prevailing in the cities are highly dependent on

meteorological conditions and vary according to the seasons ([Zhang et al., 2013](#)).

Seasonal variations of dust load indicators in the urban environment depend on the climatic conditions. In countries with a snowy winter, the maximum dust load occurs in spring months after snowmelt, when particles of sand, salt, chemicals and road surfaces, worn out with studded tires, are directly released to the urban environment in a short time. In dry and hot climate the maximum dust load is recorded in summer, in the hottest and driest months ([Thorpe et al., 2008](#)).

Sources of road dust vary significantly with a diversity of factors, such as the industrial specialization of the city, population, development of urban and housing infrastructure and the number of vehicles, etc, so the research results obtained in one city is unlikely to be representative of the situation in another ([Vermette et al., 1991](#); [Amato et al., 2011](#)); however, in several studies the composition of road dust pollutants was analyzed depending on the size of the city ([Ferguson, Ryan, 1984](#); [Charlesworth, 2003](#)).

In the study, performed by Ferguson and Ryan in 1984, 26 elements were found in street dust samples obtained in London (UK), New York (USA), Halifax (Canada), Christchurch (New Zealand) and Kingston (Jamaica). Cities were divided into two groups: large (London and New York) and small (Halifax, Christchurch and Kingston). The elements were separated into two groups as well: those that come mainly from the soil (for example, Al, K, Na, Th, Ce, La, Sm and Ti), and those that mainly come from other sources, including construction work, worn tires, vehicles emissions and salt (Ca, Cd, Pb, Cr, Zn, Cu and Au). Some rules were revealed: the first group elements are less concentrated in London and New York than in other cities, while the opposite is true for the second group of elements; concentrations of most elements increase with decreasing dust particle size.

INFLUENCE ON HEALTH

The main reason for the large amount of street dust research that has been accumulated over the past three decades in the foreign scientific literature – at least in developed regions of the world – is the

concern about the potential effects of exposure by inhalation, ingestion and skin contact. Numerous studies have tried to establish various aspects of this problem, both for home and outdoor dust: the number and size of dust particles in the environment of the house/street, the deposition rate on the surface of the house/city, the rate of transfer into the human body, sources and the chemical composition of house/street dust, effects on the behaviour of children living in urban areas with high levels of toxic chemicals, etc ([Pope, 2009](#)).

In an urban atmosphere small particles have a negative effect primarily on the health of older people, pregnant women and children, who are most susceptible to them. The finely divided chemical constituents of PM have a strong health effect due to their carcinogenic or mutagenic nature. Most studies have shown that exceeding the permissible levels of PM₁₀ and PM_{2.5} in the air affects health due to the chemical composition of dust particles. Dust particles bypass the protective mechanisms of the body, penetrate deep into the respiratory system and carry a mixture of substances harmful to human health (heavy metals, polyarenes, etc).

Currently, the main attention is paid to the environmentally most dangerous PM_{0.1} and PM₁, penetrating into the pulmonary alveoli and bronchioles; less dangerous are PM_{1–2.5}, which enter the lungs and bronchi, as well as PM_{2.5–10}, which are retained by the upper respiratory tract ([Tager, 2005](#)). Reducing the size of aerosols increases the risk of mutagenesis, the maximum of which is fixed for PM_{2.5} and dust of a smaller diameter ([Pagano et al., 1996](#)). The list of diseases, the occurrence of which is associated with exposure to fine dust particles are given in Table 1.

Due to rapid urbanization, urban dust pollution is becoming a serious environmental problem in China and countries in the Asian region ([Wang et al., 2008](#); [Long et al., 2016](#)). Most studies in this region have established a correlation between increased concentrations of toxic elements in street dust and the observed frequency of a particular effect in a population, mainly the dustiness of cities is identified as one of the factors that increase the proportion of lung cancer patients ([He et al., 2001](#); [Hu et al., 2011](#)).

Table 1. Diseases associated with exposure to fine particles

Diseases	References
Pneumonia	Adar et al., 2007a Araujo, 2010 Brook, 2008 Driscoll, 2000 Dye et al., 2001
High blood pressure	Baccarelli et al., 2011 Bartoli et al., 2009 Hoffmann et al., 2012 Schwartz et al., 2012 Zanobetti et al., 2014
Microvascular impairment	Brauner et al., 2008
Increased blood coagulation and the likelihood of thrombosis	Baccarelli et al., 2007, 2008 Bind et al., 2012 Bonzini et al., 2010 Carlsten et al., 2007 Gilmour et al., 2005 Nemmar et al., 2002
Acceleration of atherosclerosis	Adar et al., 2010 Allen et al., 2009 Araujo et al., 2008 Bauer et al., 2010 Bhatnagar, 2006 Sun et al., 2005, 2008 Suwa et al., 2002 Tzeng et al., 2007
Oncology	Nafstad et al., 2003 Pope III et al., 2002 Tango et al., 1994
Premature birth	Bell et al., 2010 Kloog et al., 2012
Asthma	Acosta et al., 2011 Dominici et al., 2006
Diseases of children	Gent et al., 2009 Nicolai et al., 2003 Zheng et al., 2010
Diseases of the elderly	Adamkiewicz et al., 2004 Adar et al., 2007 Brook et al., 2010

ENVIRONMENTAL INFLUENCE

Soil formation

In urban ecosystems, the profile-forming process conducted under the influence of natural factors is often accompanied by a constant or periodic supply of material to the soil surface, which leads to the soil profile upward grow and to the formation of a layered stratum of different thickness and composition ([Aparin, Sukhacheva, 2015](#)).

Near motorways, where the process of dust transfer is intense, the possibility arises of not only the ingress of dust into the soil but also the formation of soil horizons from dust-aerosol deposition. The process of fine and coarse dust particles accumulation on urban surfaces is significantly accelerated with low-quality street cleaning and violation of the norms and rules of landscape planning ([Klepikova et al., 2016](#); [Vlasov et al., 2019](#)).

In urban areas, there are few source materials for soil formation, the role of dust as a soil-forming material is especially high – settled dust particles must be considered as starting soil material, and their effect on the properties of urban soils should be studied ([Kwasowski et al., 2009](#); [Prokofieva et al., 2015](#)). The settled dust particles can be treated as fundamentally new mineral phases, the genesis of which has been actively studied in recent decades. Ephemeral quasi-soil bodies, urban soils are characterized mainly by relatively small age, the dependence of the mineral composition on the geological structure of the territory, a wide granulometric composition, the presence of organic matter, and a variety of technogenic particles ([Wei et al., 2010](#)). Dust deposition processes in the urban environment are involved in the formation of substance flows at all stages, being both a source of pollution and a transit and depositing medium ([Prokof'eva et al., 2015](#)).

Plants

Due to this dustiness of the urban environment, plants suffer first of all from stomata covering with dust particles, which leads to changes in cells/tissues, leaf necrosis, pigment loss and chlorosis. Long-term deposits of dust on the surface of the leaves alter photochemistry, leading to a delay in crown growth. Currently, there are studies on the abrasive effects of dust, especially at high wind speeds, supporting secondary effects, such as the growth of plant diseases and pests since the pro-

tective cuticle of a leaf has been physically removed. Changes in the chemical composition of the soil due to dust deposition lead to a change in the nutritional value of the soil ([Grafkina et al., 2016](#); [Grantz et al., 2003](#); [Leonard et al., 2016](#)).

Particles of road dust enriched with heavy metals and PAHs can be washed away by water in urban bodies of water, which results in acidification and general inhibition of aquatic biota ([Boonyatumanond et al., 2006](#)).

STUDY METHODOLOGY

In Russia, there are no regulations governing the study of urban settled dust and an assessment of its environmental parameters. In this regard, researchers use proprietary techniques that are based on principles developed by the US Environmental Protection Agency (EPA USA). The procedure for the selection of dusty formations deposited on the surface of the roadway is carried out with a brush and a scoop by sweeping from the road surface along a regular grid of 600–800 m ([Vlasov et al., 2017](#); [Kasimov et al., 2017](#); [Kosheleva et al., 2018](#); [Kasimov et al., 2019](#)).

In foreign research practice, in addition to EPA procedures, their variations are applied – vacuum suction usage, the method of collecting wet dust samples, etc. A description of dust deposition sampling methods is presented in Table 2.

When studying the properties of urban dust, as a rule, researchers applied the analytical methods used in the study of soils - determining the composition, gross content of heavy metals and metalloids, pol-yarenes, radionuclides, polycyclic aromatic hydrocarbons, electrical conductivity, pH, the amount of organic matter.

The quantification of resuspension of road dust in an urban environment is carried out using mathematical modelling (Multilinear Engine, PMF2). Statistical processing of the obtained data and the identification of possible sources of heavy metals and PAHs make extensive use of factor and cluster analysis in combination with correlation dependence analysis ([Lu et al., 2010](#)).

Table 2. Classification and description of dust sampling methods

Method	Largest fraction	Method summary	Sources
AP-42	75 μ m	- Collection of dust material from the road surface using a brush/whisk/broom and a vacuum cleaner - Sieving in the laboratory to determine the fraction - Using the AP-42 emission model to calculate the emission factor depending on traffic and type of road surface	EPA, 1993a EPA, 1993b EPA, 2011
PI-SWERL/Mini PI-SWERL	PM10	- A device which is a sealed cylinder with two circular rings (inner diameter = 39 cm, outer diameter = 51 cm), which rotates at the height of 6 cm above the road surface. - Dust and sand are mobilized using a vortex created by rotating rings. - The concentration of dust in the chamber that spans the rings is measured using light scattering, which is used as a substitute for the indicator of mass concentration of solid particles.	Etyemezian et al., 2007 China, James, 2012
Vacuum method	PM10	- Collection of dust material from the road surface using a vacuum suction with integrated PM10 inlet - Air is sucked into the deposition chamber - PM10 particles are deposited on the filter	Amato et al., 2013
Wet dust sampler	2 mm	- Dust particles are washed off with high-pressure water from a selected section of the road - Using compressed air, contaminated water is sucked into the inner container	Lundberg et al., 2019

In Russian studies, for the data interpretation a technique is used based on the calculation of concentration, enrichment, and total pollution factors ([Vlasov et al., 2017](#); [Kasimov et al., 2017](#); [Kasimov et al., 2019](#)).

In Russia, the methodological aspects of sampling and studying atmospheric pollutant samples are regulated by the normative document RD 52.04.186-89 adopted by the State Hydromet Committee and the USSR Ministry of Health in the late 1980s. Despite its updating in 2016, this document does not reflect all the current specifics of studying the dusty formations of the urban environment; however, this problem has been developed since the time when this document was approved, 30 years ago.

In 2010 by the resolution of the Chief State Sanitary Doctor of the Russian Federation of April 19, 2010 (No. 26 GN 2.1.6.2604-10, supplement No. 8 GN 2.1.6.1338-2003) the regulation “Maximum permissible concentrations (MPC) of pollutants in the atmospheric air of populated areas” was approved and supposed to limit the maximum permissible concentration of suspended particles PM₁₀ and PM_{2.5} in atmosphere.

In the FSBI “Main Geophysical Observatory named after A.I. Voeikova” (FSBI “GGO”) and in the regulatory document (approved by Roshydromet RD 52.04.830–2015) “Mass concentration of suspended particles PM₁₀ and PM_{2.5} in atmospheric air” there is a detailed description of the method for measuring the concentration of suspended dust particles. When choosing a method, the authors tend to recommend the gravimetric method developed by the European Commission for Standardization (CEN) for sampling and measuring suspended particles PM, recognized in the EU as a reference.

CONCLUSION

The creation and organization in the Russian Federation a monitoring system for atmospheric air pollution with suspended particles PM₁₀ and PM_{2.5} shows that the government understands the importance of controlling the dustiness of urban environments because of the harm that small particles can do to human health.

However, the attention is predominantly focused only on PM₁₀ and PM_{2.5} particles suspended in the air, while the settled ones are be-

ing ignored.

REFERENCES

1. Abdel-Shafy H.I., Mansour M.S.M., A review on polycyclic aromatic hydrocarbons: source, environmental impact, effect on human health and remediation, *Egyptian Journal of Petroleum*, 2016, Vol. 25, pp. 107–123.
2. Achten C., Andersson J.T., Overview of polycyclic aromatic compounds (PAC), *Polycycl. Aromat. Comp.*, 2015, Vol. 35, pp. 177–186.
3. Acosta J.A., Faz A., Kalbitz K. et al., Heavy metal concentrations in particle size fractions from street dust of Murcia (Spain) as the basis for risk assessment, *J. Environ. Monit.*, 2011, Vol. 13, pp. 3087–3096.
4. Adachi K., Tainosho Y., Characterization of heavy metal particles embedded in tire dust, *Environment International*, 2004, Vol. 30, pp. 1009–1017.
5. Adamkiewicz G., Ebelt S., Syring M., Slater J., Speizer F.E., Schwartz J. et al., Association between air pollution exposure and exhaled nitric oxide in an elderly population, *Thorax*, 2004, Vol. 59, pp. 204–209.
6. Adar S.D., Adamkiewicz G., Gold D.R., Schwartz J., Coull B.A., Suh H., Ambient and microenvironmental particles and exhaled nitric oxide before and after a group bus trip, *Environ Health Perspect*, 2007a, Vol. 115, No. 4, pp. 507–512, DOI: [10.1289/ehp.9386](https://doi.org/10.1289/ehp.9386).
7. Adar S.D., Klein R., Klein B.E., Szpiro A.A., Cotch M.F., Wong T.Y. et al., Air pollution and the microvasculature: a cross-sectional assessment of in vivo retinal images in the population-based multi-ethnic study of atherosclerosis (MESA), *PLoS Med*, 2010, 7:e1000372, DOI: [10.1371/journal.pmed.1000372](https://doi.org/10.1371/journal.pmed.1000372).
8. Adar S.D., Gold D.R., Coull B.A., Schwartz J., Stone P.H., Suh H., Focused Exposures to Airborne Traffic Particles and Heart Rate Variability in the Elderly, *Epidemiology*, 2007b, Vol. 18 (1), pp. 95–103, DOI: [10.1097/01.ede.0000249409.81050.46](https://doi.org/10.1097/01.ede.0000249409.81050.46).
9. Ahmed F., Ishiga H., Trace metal concentrations in street dusts of Dhaka city, Bangladesh, *Atmospheric Environment*, 2006, Vol. 40, pp. 3835–3844.
10. Albinet A. et al., Simultaneous analysis of oxygenated and nitrated polycyclic aromatic hydrocarbons on standard reference material 1649a (urban dust) and on natural ambient air samples by gas chromatography-mass spectrometry with negative ion chemical ionization, *J. Chromatogr*, 2006, No. 1121, pp. 106–113.
11. Albinet A. et al., Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) nitrated PAHs and oxygenated PAHs in ambient air of the Marseilles area (South of France): concentrations and sources, *Sci. Total Environ.*, 2007, Vol. 384, pp. 280–292.

12. Allen R.W., Criqui M.H., Diez Roux A.V., Allison M., Shea S., Detrano R. et al., Fine particulate matter air pollution, proximity to traffic, and aortic atherosclerosis, *Epidemiology*, 2009, Vol. 20, pp. 254–264.
13. Amato F., Pandolfi M., Viana M., Querol X., Alastuey A., Moreno T., Spatial and chemical patterns of PM10 in road dust deposited in urban environment, *Atmospheric Environment*, 2009, Vol. 43, pp. 1650–1659, DOI: [10.1016/j.atmosenv.2008.12.009](https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2008.12.009).
14. Amato F., Cassee F.R., Denier van der Gon H.A.C., Gehrig R., Gustafsson M., Hafner W. et al., Urban air quality: The challenge of traffic non-exhaust emissions, *Journal of Hazardous Materials*, 2014, Vol. 275, 31e36.
15. Amato F., Pandolfi M., Alastuey A., Lozano A., Gonzalez J.C., Querol X., Impact of traffic intensity and pavement aggregate size on road dust particles loading, *Atmospheric Environment*, 2013, Vol. 77, pp. 711–717, DOI: [10.1016/j.atmosenv.2013.05.020](https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2013.05.020).
16. Amato F., Pandolfi M., Escrig A., Querol X., Alastuey A., Pey J., Perez N., Hopke P.K., Quantifying road dust re-suspension in urban environment by multilinear engine: a comparison with PMF2, *Atmospheric Environment*, 2009a, Vol. 43, pp. 2770–2780.
17. Amato F., Pandolfi M., Moreno T., Furger M., Pey J., Alastuey A. et al., Sources and variability of inhalable road dust particles in three European cities, *Atmospheric Environment*, 2011, Vol. 45 (37), pp. 6777–6787.
18. Amato F., Pandolfi M., Viana M., Querol X., Alastuey A., Moreno T., Spatial and chemical patterns of PM10 in road dust deposited in urban environment, *Atmospheric Environment*, 2009b, Vol. 43, pp. 1650–1659.
19. Aparin B.F., Sukhacheva Y.Yu., Classification of urban soils in Russian soil classification system and international classification of soils, *Dokuchaev Soil Bulletin*, 2015, No. 79, pp. 53–72, DOI: [10.19047/0136-1694-2015-79-53-72](https://doi.org/10.19047/0136-1694-2015-79-53-72).
20. Araujo J.A., Barajas B., Kleinman M., Wang X., Bennett B.J., Gong K.W., et al., Ambient particulate pollutants in the ultrafine range promote early atherosclerosis and systemic oxidative stress, *Circ. Res.*, 2008, Vol. 102, pp. 589–596.
21. Araujo J.A., Particulate air pollution, systemic oxidative stress, inflammation, and atherosclerosis, *Air Qual. Atmos. Health*, 2010, Vol. 4, pp. 79–93.
22. Arfsten D.P. et al., The effects of near ultraviolet radiation on the toxic effects of polycyclic aromatic hydrocarbons in animals and plants: a review, *Ecotoxicol. Environ. Saf.*, 1996, Vol. 33, pp. 1–24.
23. Baccarelli A., Barretta F., Dou C., Zhang X., McCracken J.P., Díaz A. et al., Effects of particulate air pollution on blood pressure in a highly exposed

population in Beijing, China: a repeated-measure study, *Environ Health*, 2011, Vol. 10, Art. No. 108, DOI: [10.1186/1476-069X-10-108](https://doi.org/10.1186/1476-069X-10-108).

24. Baccarelli A., Martinelli I., Zanobetti A., Grillo P., Hou L.F., Bertazzi P.A. et al., Exposure to particulate air pollution and risk of deep vein thrombosis, *Arch Intern Med*, 2008, Vol. 168, pp. 920–927.

25. Baccarelli A., Zanobetti A., Martinelli I., Grillo P., Hou L., Giacomini S. et al., Effects of exposure to air pollution on blood coagulation, *J. Thromb Haemost*, 2007, Vol. 5, pp. 252–260.

26. Baird W.M., Hooven L.A., Mahadevan B., Carcinogenic polycyclic aromatic hydrocarbon DNA adducts and mechanism of action, *Environ. Mol. Mutagen.*, 2005, Vol. 45 (23), pp. 106–114.

27. Bartoli C.R., Wellenius G.A., Diaz E.A., Lawrence J., Coull B.A., Akiyama I. et al., Mechanisms of inhaled fine particulate air pollution-induced arterial blood pressure changes, *Environ Health Perspect*, 2009, Vol. 117, pp. 361–366, DOI: [10.1289/ehp.11573](https://doi.org/10.1289/ehp.11573).

28. Bauer M., Moebus S., Möhlenkamp S., Dragano N., Nonnemacher M., Fuchsluger M. et al., Urban particulate matter air pollution is associated with subclinical atherosclerosis: results from the HNR (Heinz Nixdorf Recall) study, *J. Am. Coll. Cardiol.*, 2010, Vol. 56, pp. 1803–1808.

29. Bell M.L., Belanger K., Ebisu K., Gent J.F., Lee H.J., Koutrakis P., Leaderer B.P., Prenatal Exposure to Fine Particulate Matter and Birth Weight, *Epidemiology*, 2010, Vol. 21 (6), pp. 884–891, DOI: [10.1097/ede.0b013e3181f2f405](https://doi.org/10.1097/ede.0b013e3181f2f405).

30. Bezberdaya L.A., Vlasov D.V., Tyazhelye metally v dorozhnoj pyli goroda Alushty (Heavy metals in the road dust of the city of Alushta), In: *Ekologicheskie problemy promyshlennyh gorodov: sb. nauchnyh tr. po matematike 8-j Mezhdunar. nauchno-prakt. Konf* (Proc. 8th Intern. Sci. and Pract. Conf. Ecological problems of industrial cities), Saratov: SGTU, 2017, pp. 119–123.

31. Bhatnagar A., Environmental cardiology: studying mechanistic links between pollution and heart disease, *Circ. Res.*, 2006, Vol. 99, pp. 692–705.

32. Bind M.A., Baccarelli A., Zanobetti A., Tarantini L., Suh H., Vokonas P. et al., Air pollution and markers of coagulation, inflammation, and endothelial function: associations and epigene-environment interactions in an elderly cohort, *Epidemiology*, 2012, Vol. 23, pp. 332–340.

33. Bitukova V.R., Mozgunov N.A., Spatial Features Transformation of Emission from Motor Vehicles in Moscow, *Geography, aenvironment, Sustainability*, 2019, Vol. 12 (4), pp. 57–73, DOI: [10.24057/2071-9388-2019-75](https://doi.org/10.24057/2071-9388-2019-75).

34. Bitukova V.R., Vlasov D.V., Dorohova M.F. et al., Vostok – Zapad Moskvy: prostranstvennyj analiz social'no-jekologicheskikh problem (East –

West of Moscow: a spatial analysis of socio-environmental problems), Moscow: Moscow State University, 2016, 70 p.

35. Bonzini M., Tripodi A., Artoni A., Tarantini L., Marinelli B., Bertazzi P.A. et al., Effects of inhalable particulate matter on blood coagulation, *J. Thromb Haemost.*, 2010, Vol. 8, pp. 662–668.

36. Boonyatumanond R., Wattayakorn G., Togo A., Takada H., Distribution and origins of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in riverine, estuarine, and marine sediments in Thailand, *Marine Pollution Bulletin*, 2006, Vol. 52 (8), pp. 942–956.

37. Boulter P.G., A review of emission factors and models for road vehicle non-exhaust particulate matter. Wokingham, UK: TRL Limited (TRL Report PPR065), 2005, URL:

http://ukair.defra.gov.uk/reports/cat15/0706061624_Report1_Review_of_Emission_Factors.PDF.

38. Brauner E.V., Forchhammer L., Moller P., Barregard L., Gunnarsen L., Afshari A. et al., Indoor particles affect vascular function in the aged: an air filtration-based intervention study, *Am. J. Respir. Crit. Care Med.*, 2008, Vol. 177, pp. 419–425.

39. Brook R.D., Rajagopalan S., Pope C.A., Brook J.R., Bhatnagar A., Diez-Roux A.V., Particulate Matter Air Pollution and Cardiovascular Disease: An Update to the Scientific Statement from the American Heart Association, *Circulation*, 2010, Vol. 121 (21), pp. 2331–2378, DOI: [10.1161/cir.0b013e3181dbee1](https://doi.org/10.1161/cir.0b013e3181dbee1).

40. Campbell J.A., Note on the experimental production of cancer by dust obtained from tarred roads, *The Lancet*, 1934, Vol. 223 (5762), pp. 233–234, DOI: [10.1016/s0140-6736\(01\)03258-5](https://doi.org/10.1016/s0140-6736(01)03258-5).

41. Carlsten C., Kaufman J.D., Peretz A., Trenga C.A., Sheppard L., Sullivan J.H., Coagulation markers in healthy human subjects exposed to diesel exhaust, *Thromb Res.*, 2007. Vol. 120, pp. 849–855.

42. Charlesworth S., Everett M., McCarthy R., Ordonez A., de Miguel E.A., comparative study of heavy metal concentration and distribution in deposited street dusts in a large and a small urban area: Birmingham and Coventry, West Midlands, UK, *Environment International*, 2003, Vol. 29, Iss. 5, pp. 563–579.

43. Charron A., Harrison R.M., Fine (PM_{2.5}) and Coarse (PM_{2.5-10}) Particulate Matter on a Heavily Trafficked London Highway: Sources and Processes, *Environmental Science and Technology*, 2005, Vol. 39 (20), pp. 7768–7776, DOI: [10.1021/es050462i](https://doi.org/10.1021/es050462i).

44. Chen J., Wang W., Liu H., Ren L., Determination of road dust loadings and chemical characteristics using resuspension, *Environmental Monitoring and Assessment*, 2012, Vol. 184, pp. 1693–1709.

45. China S., James D.E., Influence of pavement macrotexture on PM10 emissions from paved roads: a controlled study, *Atmospheric Environment*, 2012, Vol. 63, pp. 313–326. DOI: [10.1016/j.atmosenv.2012.09.018](https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2012.09.018).
46. Chow J., Watson J., Lu Z., Descriptive analysis of PM(2.5) and PM(10) at regionally representative locations during SJVAQS/AUSPEX, *Atmospheric Environment*, 1996, Vol. 30, Iss. 12, pp. 2079–2112.
47. Day J.P., Hart M., Robinson M.S., Lead in urban street dust, *Nature*, 1975, Vol. 253 (5490), pp. 343–345, DOI: [10.1038/253343a0](https://doi.org/10.1038/253343a0).
48. Denier van der Gon H.A.C., Gerlofs-Nijland M.E., Gehrig R., Gustafsson M., Janssen N., Harrison R.M. et al., The policy relevance of wear emissions from road transport, now and in the future-an international workshop report and consensus statement, *Journal of the Air and Waste Management Association*, 2013, Vol. 63, 136e149.
49. Dominici F., Peng R.D., Bell M.L., Pham L., McDermott A., Zeger S.L., Samet J.M., Fine particulate air pollution and hospital admission for cardiovascular and respiratory diseases, *Journal of the American Medical Association*, 2006, Vol. 295 (10), pp. 1127–1134.
50. Dong T.T.T., Lee B.-K., Characteristics, toxicity, and source apportionment of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in road dust of Ulsan, Korea, *Chemosphere*, 2009, Vol. 74, No. 9, pp. 1245–1253.
51. Driscoll K.E., TNF α and MIP-2: role in particle-induced inflammation and regulation by oxidative stress, *Toxicol. Lett.*, 2000, Vol. 112–113, pp. 177–183.
52. Duggan M.J., Williams S., Lead-in-dust in city streets, *Science of The Total Environment*, 1977, Vol. 7 (1), pp. 91–97, DOI: [10.1016/0048-9697\(77\)90019-5](https://doi.org/10.1016/0048-9697(77)90019-5).
53. DUST 2014: Book of abstracts, International conference on atmospheric dust, Catellaneta-Marina, 2014.
54. Dye J.A., Lehmann J.R., McGee J.K., Winsett D.W., Ledbetter A.D., Everitt J.I. et al., *Acute pulmonary toxicity of particulate matter filter extracts in rats: coherence with epidemiologic studies in Utah Valley residents*, 2001.
55. EPA. AP-42, Fifth Edition, Volume I, Appendix C.1: procedures for sampling surface/bulk dust loading. U.S., Environmental Protection Agency, 1993a.
56. EPA. AP-42, Fifth Edition, Volume I, Appendix C.2: procedures for laboratory analysis of surface/bulk dust loading samples. U.S., Environmental Protection Agency, 1993b.
57. EPA. AP-42, Fifth Edition, Volume I, Chapter 13.2.1: paved roads. U.S. Environmental Protection Agency, 2011.
58. Etyemezian V., Nikolich G., Ahonen S., Pitchford M., Sweeney M., Purcell R. et al., The Portable In Situ Wind Erosion Laboratory (PI-SWERL):

a new method to measure PM₁₀ potential for windblown dust properties and emissions, *Atmospheric Environment*, 2007, Vol. 41 (18), pp. 3789–3796, DOI: [10.1016/j.atmosenv.2007.01.018](https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2007.01.018).

59. Fedotov P.S., Ermolin M.S., Karandashev V.K., Ladonin D.V., Characterization of size, morphology and elemental composition of nano-, submicron and micron particles of street dust separated using field-flow fractionation in a rotating coiled column, *Talanta*, 2014, Vol. 130, pp. 1–7.

60. Fergusson J., Ryan D., The elemental composition of street dust from large and small urban areas related to city type, source and particle size, *Science of The Total Environment*, 1984, Vol. 34 (1–2), pp. 101–116, DOI: [10.1016/0048-9697\(84\)90044-5](https://doi.org/10.1016/0048-9697(84)90044-5).

61. Fu P.P. et al., Phototoxicity and environmental transformation of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs)-light-induced reactive oxygen species, lipid peroxidation, and DNA damage, *J. Environ. Sci. Health C Environ. Carcinog. Ecotoxicol. Rev.*, 2012, Vol. 30, pp. 1–41.

62. Gan S. et al., Remediation of soils contaminated with polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs), *J. Hazard Mater*, 2009, Vol. 172, pp. 532–549.

63. Gbeddy G. et al., Transformation and degradation of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in urban road surfaces: influential factors, implications and recommendations, *Environ. Pollut.*, 2019, Vol. 257, 113510, DOI: [10.1016/j.envpol.2019.113510](https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.113510).

64. Gent J.F., Koutrakis P., Belanger K., Triche E., Holford T.R., Bracken M.B., Leaderer B.P., Symptoms and Medication Use in Children with Asthma and Traffic-Related Sources of Fine Particle Pollution, *Environmental Health Perspectives*, 2009, Vol. 117 (7), pp. 1168–1174, DOI: [10.1289/ehp.0800335](https://doi.org/10.1289/ehp.0800335).

65. Gietl J.K., Lawrence R., Thorpe A.J., Harrison R.M., Identification of brake wear particles and derivation of a quantitative tracer for brake dust at a major road, *Atmospheric Environment*, 2010, Vol. 44, pp. 141–146.

66. Gilmour P.S., Morrison E.R., Vickers M.A., Ford I., Ludlam C.A., Greaves M. et al., The procoagulant potential of environmental particles (PM₁₀), *Occup Environ Med*, 2005, Vol. 62, pp. 164–171.

67. Grafkina M.V., Azarov A.V., Dobrinskij D.R., Tihonova M.M., Analiz negativnogo vozdejstviya na jelementy jekosistemy v processe pylevydeleniya ot proezda avtomobil'nogo transporta po dorozhnym pokrytijam razlichnyh tipov (Negative impact analysis on the ecosystem' elements of the process of dust emission from the passage of automobile transport on various types of road surfaces), *Uspekhi sovremennoy nauki*, 2016, Vol. 8, No. 12, pp. 142–147.

68. Grantz D.A., Garner J.H.B., Johnson D.W., Ecological effects of particulate matter, *Environment International*, 2003, Vol. 29 (2–3), pp. 213–239, DOI: [10.1016/S0160-4120\(02\)00181-2](https://doi.org/10.1016/S0160-4120(02)00181-2).

69. Gupta H., Gupta B., Photocatalytic degradation of polycyclic aromatic hydrocarbon benzo[a]pyrene by iron oxides and identification of degradation products, *Chemosphere*, 2015, Vol. 138, pp. 924–931.
70. Hassanien M.A., Abdel-Latif N.M., Polycyclic aromatic hydrocarbons in road dust over greater, Cairo, Egypt., *J. Hazard. Mater.*, 2008, Vol. 151 (1), pp. 247–254.
71. He K., Yang F., Ma Y., Chan T., Mulawa P., The characteristics of PM_{2.5} in Beijing, China, *Atmospheric Environment*, 2001, Vol. 35 (29), pp. 4959–4970.
72. Hoffmann B., Luttmann-Gibson H., Cohen A., Zanobetti A., de Souza C., Foley C. et al., Opposing effects of particle pollution, ozone, and ambient temperature on arterial blood pressure, *Environ Health Perspect.*, 2012, Vol. 120, pp. 241–246, DOI: [10.1289/ehp.1103647](https://doi.org/10.1289/ehp.1103647).
73. Hu X., Zhang Y., Luo J., Wang T., Lian H., Ding Z., Bioaccessibility and health risk of arsenic, mercury and other metals in urban street dusts from a mega-city, Nanjing, China, *Environmental Pollution*, 2011, Vol. 159, pp. 1215–1221, DOI: [10.1016/j.envpol.2011.01.037](https://doi.org/10.1016/j.envpol.2011.01.037).
74. Iarc W.S., Monograph on the Evaluation of the Carcinogenic Risk of Chemicals to Humans Polynuclear Aromatic Compounds, Part I: Chemical, Environmental and Experimental Data, Vol. 32, Lyon, 1983.
75. Iijima A., Sato K., Yano K., Tago H., Kato M., Kimura H., Furuta N., Particle size and composition distribution analysis of automotive brake abrasion dusts for the evaluation of antimony sources of airborne particulate matter, *Atmospheric Environment*, 2007, Vol. 41, pp. 4908–4919.
76. Irvine K.N., Perrelli M.F., Ngoen-klan R., Droppo I.G., Metal levels in street sediment from an industrial city: spatial trends, chemical fractionation, and management implications, *Journal of Soils and Sediments*, 2009, Vol. 9, pp. 328–341.
77. Jia H. et al., Transformation of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) on Fe (III)-modified clay minerals: role of molecular chemistry and clay surface properties, *Appl. Catal. B. Environ.*, 2014, Vol. 154–155, pp. 238–245.
78. Jia H. et al., Exchangeable cations-mediated photodegradation of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) on smectite surface under visible light, *J. Hazard Mater.*, 2015, Vol. 287, pp. 16–23.
79. Kaigorodov R.V., Tiunova M.I., Druzhinina A.V., Zagryaznyayushhie veshchestva v pyli proezhnykh chastei dorog i v drevesnoi rastitel'nosti pridorozhnykh polos gorodskoi zony (Pollutants in the dust of roadways and the woody vegetation of roadside lanes in the urban area), *Vestnik Permskogo universiteta. Ser. Biologiya*, 2009, Vol. 10 (36), pp. 141–146.
80. Kasimov N.S., Bezberdaya L.A., Vlasov D.V., Lychagin M.Yu., Metally, metalloidy i benz[a]piren v mikrochastitsah pochvy i dorozhnoi pyli Alushty

(Metals, metalloids and benz[a]pyrene in microparticles of soils and road dust Alushta), *Pochvovedenie*, 2019, No. 12, pp. 1524–1538.

81. Kasimov N.S., Vlasov D.V., Kosheleva N.E., Ryzhov A.V., Nabelkina K.S., Bezberdaja L.A., Opyt provedeniya i informativnost' ekologo-geohimicheskogo monitoringa dorozhnoj pyli v gorodah (Experience in conducting and informative content of environmental and geochemical monitoring of road dust in cities), *Inzhenerno-jeologicheskie izyskaniya – normativno-pravovaja baza, sovremennye metody i oborudovanie Materialy dokladov Obshherossijskoj nauchno-prakticheskoy konferencii* (Proc. the All-Russian Sci. Prac. Conf.: Environmental engineering surveys – regulatory framework, modern methods and equipment), 2018, pp. 117–122.

82. Kasimov N.S., Kosheleva N.E., Nikiforova E.M., Vlasov D.V., Benzo[a]pyrene in urban environments of eastern Moscow: pollution levels and critical loads, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2017, Vol. 17, No. 3, pp. 2217–2227.

83. Kasimov N.S., Kosheleva N.E., Lychagin M.Yu. et al., *Environmental Atlas – monograph “Selenga-Baikal”*, Moscow: Lomonosov Moscow State University, 2019b.

84. Kasimov N.S., Kosheleva N.E., Vlasov D.V., Nabelkina K.S., Ryzhov A.V., Physicochemical properties of road dust in Moscow, *Geography, Environment, Sustainability*, 2019, Vol. 12, No. 4, DOI: [10.24057/2071-9388-2019-55](https://doi.org/10.24057/2071-9388-2019-55).

85. Kennaway E., Kennaway N., A Further Study of the Incidence of Cancer of the Lung and Larynx, *Br J Cancer*, 1947, Vol. 1, pp. 260–298, DOI: [10.1038/bjc.1947.24](https://doi.org/10.1038/bjc.1947.24).

86. Klepikova E.A., Vlijanie dorozhnoj pyli na fizicheskie svojstva pochv na primere goroda Moskvy (The influence of road dust on the physical properties of soils by the example of the city of Moscow), *Pochvovedenie – prodovol'stvennoj i jeologicheskoj bezopasnosti strany tezisy dokladov VII s'ezda Obschestva pochvovedov im. V.V. Dokuchaeva i Vserossijskoj s mezhdunarodnym uchastiem nauchnoj konferencii* (Abstracts of the VII Congress of the Society of Soil Scientists named after V.V. Dokuchaev and the All-Russian Conference: Soil Science – Food and Environmental Security of the Country), 2016, pp. 352–353.

87. Kloog I., Melly S.J., Ridgway W.L., Coull, B.A., Schwartz J., Using new satellite based exposure methods to study the association between pregnancy pm2.5 exposure, premature birth and birth weight in Massachusetts, *Environmental Health*, 2012, Vol. 11, Art. No. 40, DOI: [10.1186/1476-069x-11-40](https://doi.org/10.1186/1476-069x-11-40).

88. Kosheleva N.E., Nabelkina K.S., Ryzhov A.V., Vlasov D.V., Kasimov N.S., Fiziko-chimicheskie svoystva dorozhnoi pyli Moskvy (Physico-chemical

properties of road dust in Moscow), “*Snezhnyj pokrov, atmosferynye osadki, ajerozoli: tehnologija, klimat i jekologija*”, *Materialy II-oj Bajkal'skoj mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoj konferencii* (Proc. II Baikal Intern. Sci. and Pract. Conf. “Snow cover, precipitation, aerosols: technology, climate and ecology”), 2018, pp. 86–91.

89. Kupiainen K., *Road dust from pavement wear and traction sanding, Monograph of Boreal Environment Research* 26, Helsinki: Finnish Environment Institute, 2007, URL: <http://hdl.handle.net/10138/39334>.

90. Kwasowski W., Soils of traffic areas in Warsaw, In: *Technogenic soils of Poland*, Toruń: Polish Society of Soil Science, 2013, pp. 207–229.

91. Ladonin D.V., Elementy platinovoi gruppy v pochvakh i ulichnoi pyli yugo-vostochnogo administrativnogo okruga g. Moskvy (Elements of the platinum group in soils and street dust of the southeastern administrative district of Moscow), *Pochvovedenie*, 2018, No. 3, pp. 274–283.

92. Ladonin D.V., Plyaskina O.V., Izotopnyi sostav svintsy v pochvakh i ulichnoi pyli Yugo-Vostochnogo administrativnogo okruga g. Moskvy (Isotopic composition of lead in soils and street dust of the Southeastern administrative district of Moscow), *Pochvovedenie*, 2009, No. 1, pp. 106–118.

93. Leonard R.J., McArthur C., Hochuli D.F., Particulate matter deposition on roadside plants and the importance of leaf trait combinations, *Urban Forestry and Urban Greening*, 2016, Vol. 20, pp. 249–253, DOI: [10.1016/j.ufug.2016.09.008](https://doi.org/10.1016/j.ufug.2016.09.008).

94. Limbeck A., Puls C., Particulate emissions from on-road vehicles, In: *Urban airborne particulate matter: origin, chemistry, fate and health impacts*, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin, 2011, pp. 63–79.

95. Long X., Liac N., Tiead X., Cao J. et al., Urban dust in the Guanzhong Basin of China, part I: A regional distribution of dust sources retrieved using satellite data, *Science of The Total Environment*, 2016, Vol. 541, pp. 1603–1613.

96. Lu X., Wang L., Li L., Li L.Y., Lei K., Huang L., Dan K., Multivariate statistical analysis of heavy metals in street dust of Baoji, NW China, *Journal of Hazardous Materials*, 2010, Vol. 173, Iss. 1–3, pp. 744–749.

97. Lundberg J., Blomqvist G., Gustafsson M. et al., Wet Dust Sampler – a Sampling Method for Road Dust Quantification and Analyses, *Water Air Soil Pollut.*, Vol. 230, Art. No. 180, DOI: [10.1007/s11270-019-4226-6](https://doi.org/10.1007/s11270-019-4226-6).

98. Mallakin A. et al., Pathway of anthracene modification under simulated solar radiation, *Chemosphere*, 2000, Vol. 40, pp. 1435–1441.

99. Matisakov A.Zh., Duishenaliev E.U., Onolbekov A.M., Vliyanie rezhimov i intensivnosti dvizheniya avtotransporta na zagryaznennost' dorozhnoi pyli (The influence of modes and intensity of traffic on the pollution of road dust), *Nauka i obrazovanie: Sohranjaja proshloe, sozdajom budushhee sbornik statej*

III Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii (Proc. III Intern. Sci. and Pract. Conf.: “Science and Education: Saving the past, creating the future”), 2016, pp. 14–17.

100. Mazzei F., D’Alessandro A., Lucarelli F., Nava S., Prati P., Valli G. et al., Characterization of particulate matter sources in an urban environment, *Science of the Total Environment*, 2008, Vol. 401, pp. 81–89.

101. Murakami M., Nakajima F., Furumai H., Size- and density-distributions and sources of polycyclic aromatic hydrocarbons in urban road dust, *Chemosphere*, 2005, Vol. 61, pp. 783–791.

102. Murakami M., Nakajima F., Furumai H., Tomiyasu B., Owari M., Identification of particles containing chromium and lead in road dust and soakaway sediment by electron probe microanalyser, *Chemosphere*, 2007, Vol. 67, Iss. 10, pp. 2000–2010.

103. Nafstad P., Lung cancer and air pollution: a 27 year follow up of 16 209 Norwegian men, *Thorax*, 2003, Vol. 58 (12), pp. 1071–1076, DOI: [10.1136/thorax.58.12.1071](https://doi.org/10.1136/thorax.58.12.1071).

104. Nazzal Y., Rosen M.A., Al-Rawabden A.M., Assessment of metal pollution in urban road dusts from selected highways of the Greater Toronto Area in Canada, *Environmental Monitoring and Assessment*, 2013, Vol. 185, pp. 1847–1858.

105. Nemmar A., Hoylaerts M.F., Hoet P.H., Dinsdale D., Smith T., Xu H. et al., Ultrafine particles affect experimental thrombosis in an in vivo hamster model, *Am. J. Respir. Crit. Care Med.*, 2002, Vol. 166, pp. 998–1004.

106. Nguyen T.C., Loganathan P., Nguyen T.V., Vigneswaran S., Kandasamy J., Slee D., Stevenson G., Naidu R., Polycyclic aromatic hydrocarbons in road-deposited sediments, water sediments, and soils in Sydney, Australia: comparisons of concentration distribution, sources and potential toxicity, *Ecotoxicol. Environ. Saf.*, 2014, Vol. 104, pp. 339–348.

107. Nicolai T., Carr D., Weiland S.K., Duhme H., von Ehrenstein O., Wagner C., von Mutius E., Urban traffic and pollutant exposure related to respiratory outcomes and atopy in a large sample of children, *European Respiratory Journal*, 2003, Vol. 21 (6), pp. 956–963, DOI: [10.1183/09031936.03.00041103a](https://doi.org/10.1183/09031936.03.00041103a).

108. Nisbet C., LaGoy P., Toxic equivalency factors (TEFs) for polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs), *Regul. Toxicol. Pharmacol.*, 1992, Vol. 16, pp. 290–300.

109. Pagano P., De Zaiacomo T., Scarcella E., Bruni S., Calamosca M., Mutagenic activity of total and particle-sized fractions of urban particulate matter, *Environmental Science & Technology*, 1996, Vol. 30, pp. 3512–3516.

110. Pope III C.A., Lung Cancer, Cardiopulmonary Mortality, and Long-term Exposure to Fine Particulate Air Pollution, *JAMA*, 2002, Vol. 287 (9), 1132, DOI: [10.1001/jama.287.9.1132](https://doi.org/10.1001/jama.287.9.1132).
111. Prokof'eva T.V., Kiryushin A.V., Ivannikov F.A., Shishkov V.A., The importance of dust material in urban soil formation: the experience on study of two young technosols on dust depositions, *Journal of Soils and Sediments*, 2017, Vol. 2, pp. 515–524, DOI: [10.1007/s11368-016-1546-7](https://doi.org/10.1007/s11368-016-1546-7).
112. Putaud J.-P., Raes F., Van Dingenen R., Tørseth K., Wiedensohler A.A., European aerosol phenomenology – 2: Chemical characteristics of particulate matter at kerbside, urban, rural and background sites in Europe, *Atmospheric Environment*, 2004, Vol. 38 (16), pp. 2579–2595.
113. Querol X., Alastuey A., Ruiz C.R., Artinano B., Hansson H.C., Harrison R.M. et al., Speciation and origin of PM₁₀ and PM_{2.5} in selected European cities, *Atmospheric Environment*, 2004, Vol. 38, pp. 6547–6555.
114. Quiroz W., Cortes M., Astudillo F., Bravo M., Cereceda F., Vidal V., Lobos M.G., Antimony speciation in road dust and urban particulate matter in Valparaíso, Chile: analytical and environmental considerations, *Microchemical Journal*, 2013, Vol. 110, pp. 266–272.
115. Rogge W.F., Hildemann L.M., Mazurek M.A., Cass G.R., Simoneit B.R.T., Sources of Fine Organic Aerosol. 3. Road Dust, Tire Debris, and Organometallic Brake Lining Dust: Roads as Sources and Sinks, *Environmental Science and Technology*, 1993, Vol. 27 (9), pp. 1892–1904.
116. Schwartz J., Alexeeff S.E., Mordukhovich I., Gryparis A., Vokonas P., Suh H. et al., Association between long-term exposure to traffic particles and blood pressure in the Veterans Administration Normative Aging Study, *Occup. Environ. Med.*, 2012, Vol. 69, pp. 422–427.
117. Seleznev A.A., Heavy metals in the surface dust sediment of Yekaterinburg, *Izvest. Ural'sk. Gos. Gorn. Univ.*, 2018, Vol. 49 (1), pp. 46–54, DOI: [10.21440/23072091-2018-1-46-54](https://doi.org/10.21440/23072091-2018-1-46-54).
118. Sereda L.O., Ocenka ekologo-geohimicheskogo sostoyaniya pochvennogo pokrova gorodskogo okruga goroda Voronezh (Assessment of the ecological and geochemical condition of the soil cover of the urban district of the city of Voronezh), *Vestnik VGU. Seriya: Geografiya. Geoekologiya*, 2015, No. 4, pp. 59–65.
119. Soltani N., Keshavarzi B., Moore F., Tavakol T., Lahijanzadeh A.R., Jaafarzadeh N., Kermani M., Ecological and human health hazards of heavy metals and polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in road dust of Isfahan metropolis, *Iran. Sci. Total Environ.*, 2015, Vol. 505, pp. 712–723.
120. Sun Q., Wang A., Jin X., Natanzon A., Duquaine D., Brook R.D. et al., Long-term air pollution exposure and acceleration of atherosclerosis and

vascular inflammation in an animal model, *JAMA*, 2005, Vol. 294, pp. 3003–3010.

121. Sun Q., Yue P., Kirk R.I., Wang A., Moatti D., Jin X. et al., Ambient air particulate matter exposure and tissue factor expression in atherosclerosis, *Inhal. Toxicol.*, 2008, Vol. 20, pp. 127–137.

122. Suwa T., Hogg J.C., Quinlan K.B., Ohgami A., Vincent R., van Eeden S.F., Particulate air pollution induces progression of atherosclerosis, *J. Am. Coll. Cardiol.*, 2002, Vol. 39, pp. 935–942.

123. Tager I.B., Health effects of aerosols: Mechanisms and epidemiology, In: *Aerosols Handbook: Measurement, dosimetry, and health effects*, Boca Raton: CRC Press, 2005. pp. 619–696.

124. Tango T., Effect of air pollution on lung cancer: a Poisson regression model based on vital statistics, *Environ. Health Perspect.*, 1994, Vol. 102, pp. 41–45.

125. Thorpe A., Harrison R.M., Sources and properties of non-exhaust particulate matter from road traffic: A review, *Science of the Total Environment*, 2008, Vol. 400, Iss. 1–3, pp. 270–282.

126. Tzeng H.P., Yang R.S., Ueng T.H., Liu S.H., Upregulation of cyclooxygenase-2 by motorcycle exhaust particulate-induced reactive oxygen species enhances rat vascular smooth muscle cell proliferation, *Chem. Res. Toxicol.*, 2007, Vol. 20, pp. 1170–1176.

127. USEPA. AP 42, In: *Chapter 13: Miscellaneous sources* (5th ed., Vol. I), 2006, URL: <https://www3.epa.gov/ttn/chief/ap42/%20ch13/>.

128. USEPA, *Provisional Guidance for Quantitative Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons*, 1993.

129. Varrica D., Dongarra G., Sabatino G., Monna F., Inorganic geochemistry of roadway dust from the metropolitan area of Palermo, Italy, *Environmental Geology*, 2003, Vol. 44, pp. 222–230.

130. Vermette S.J., Irvine K.N., Drake J.J., Temporal variability of the elemental composition in urban street dust, *Environmental Monitoring and Assessment*, 1991, Vol. 18, pp. 69–77.

131. Viana M., Querol X., Alastuey A., Gil J.I., Mene'ndez M., Identification of PM sources by principal component analysis (PCA) coupled with wind direction data, *Chemosphere*, 2006, Vol. 65, pp. 2411–2418.

132. Vione D. et al., Photochemical reactions in the tropospheric aqueous phase and on particulate matter, *Chem. Soc. Rev.*, 2006, Vol. 35, pp. 441–453.

133. Vlasov D.V., Metally i metalloidy v chasticah PM10 dorozhnoj pyli Vostochnoj Moskvy (Metals and metalloids in PM10 Particles in east Moscow road dust), *Vestnik Rossijskogo universiteta družby narodov. Serija: Jekologija i bezopasnost' zhiznedejatel'nosti*, 2017, Vol. 25, No. 4, pp. 529–539.

134. Vlasov D.V., Bezberdaya L.A., Kasimov N.S., Tehnogennaya transformaciya svoystv pochv i dorozhnoi pyli Sevastopolya (Technogenic transformation of the properties of soils and road dust in Sevastopol), *Problemy antropogennoj transformacija prirodnoj sredy Materialy mezhdunarodnoj konferencii pamjati N.F. Rejmersa i F.R. Shtil'marka* (Proc. Intern. Conf. Devoted to the Memory for N.F. Reimers and F.R. Shtilmarka: "Problems of anthropogenic transformation of the environment"), 2019, pp. 136–139.
135. Vlasov D.V., Kasimov N.S., Kosheleva N.E., Geohimiya dorozhnoy pyli (Vostochnyi okrug Moskvy) (Geochemistry of road dust (Eastern District of Moscow)), *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 5: Geografija*, 2015, No. 1, pp. 23–33.
136. Vlasov D.V., Kosheleva N.E., Kasimov N.S., Prostranstvennaya differenciaciya benz[a]pirena v dorozhnoy pyli Moskvy (Spatial differentiation of benz[a]pyrene in Moscow road dust), *Kompleksnye problemy tehnosfernoj bezopasnosti. Aktual'nye voprosy bezopasnosti pri formirovanii kul'tury bezopasnoj zhizni Materialy XIV Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii, posvjashhennoj Godu kul'tury bezopasnosti. V 3-h chastjah* (Proc. XIV. Intern. Sci. Prac. Conf. dedicated to the Year of safety culture: Complex problems of technosphere security. Actual safety issues in the formation of a safe life culture), 2018, pp. 67–71.
137. Wang D.-G., Yang M., Jia H.-L., Zhou L., Li Y.-F., Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Urban Street Dust and Surface Soil: Comparisons of Concentration, Profile, and Source, *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 2008, Vol. 56 (2), pp. 173–180, DOI: [10.1007/s00244-008-9182-x](https://doi.org/10.1007/s00244-008-9182-x).
138. Wang S.X., Zhao Y., Chen G.C., Wang F., Aunan K., Hao J.M., Assessment of population exposure to particulate matter pollution in Chongqing, China, *Environmental Pollution*, 2008, Vol. 153, 247–256.
139. Wang W., Huang M.J., Kang Y., Wang H.S., Leung A.O., Cheung K.C., Wong M.H., Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in urban surface dust of Guangzhou, China: status, sources and human health risk assessment, *Sci. Total Environ.*, 2011, Vol. 409 (21), pp. 4519–4527, DOI: [10.1016/j.scitotenv.2011.07.030](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2011.07.030).
140. Wei B., Jiang F., Li X., Mu S., Contamination level assessment of potential toxic metals in road dust deposited in different types of urban environment, *Environmental Earth Sciences*, 2010, Vol. 61, pp. 1187–1196.
141. Wei B., Yang L., A review of heavy metal contaminations in urban soils, urban road dusts and agricultural soils from China, *Microchemical Journal*, 2010, Vol. 94 (2), pp. 99–107.

142. Yu H. et al., Photoirradiation of polycyclic aromatic hydrocarbons with UVA light – a pathway leading to the generation of reactive oxygen species, lipid peroxidation, and DNA damage, *Int. J. Environ. Res. Publ. Health*, Vol. 3, pp. 348–354.
143. Zanutti A., Luttmann-Gibson H., Horton E.S., Cohen A., Coull B.A., Hoffmann B. et al., Brachial artery responses to ambient pollution, temperature, and humidity in people with type 2 diabetes: a repeated-measures study, *Environ Health Perspect*, 2014, Vol. 122, pp. 242–248, DOI: [10.1289/ehp.1206136](https://doi.org/10.1289/ehp.1206136).
144. Zhang L. et al., Photodegradation of pyrene on soil surfaces under UV light irradiation, *J. Hazard Mater*, 2010, Vol. 173, pp. 168–172.
145. Zhang R., Jing J., Tao J., Zhao Y., Shen Z., Chemical characterization and source apportionment of PM_{2.5} in Beijing: Seasonal perspective, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2013, Vol. 13 (14), pp. 7053–707.
146. Zheng N., Liu J., Wang Q., Liang Z., Health risk assessment of heavy metal exposure to street dust in the zinc smelting district, Northeast of China, *Science of the Total Environment*, 2010, Vol. 408 (4), pp. 726–733.

Научное издание

Бюллетень Почвенного института
имени В.В. Докучаева

Выпуск 104

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 25.11.2020 г.
Подписано в печать 25.11.2020 г.
Формат 60×84/16. Бумага офсетная.
Усл. печ. л. 15,8 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