

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

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

---

---

**БЮЛЛЕТЕНЬ**  
**ПОЧВЕННОГО ИНСТИТУТА**  
**имени В.В. ДОКУЧАЕВА**

**Выпуск 110**

**Москва**  
**2022**

<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 110**

**Moscow  
2022**

<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”, 2022 г.

© Federal Research Centre “V.V. Dokuchaev Soil Science Institute”, 2022

## СОДЕРЖАНИЕ

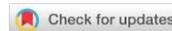
Гранулометрический состав почв конечно-моренной гряды Верхневолжского постледникового района (Восточно-Европейская равнина, Тверская область) <i>Шеин Е.В., Иванов Д.А., Болотов А.Г., Дембовецкий А.В.</i> ..... 5	5
Об оптимизации размещения сети датчиков интернета вещей на пахотных угодьях <i>Савин И.Ю., Блохин Ю.И.</i> ..... 22	22
Изменение мелиоративного состояния орошаемых земель в Волгоградской области за 2001–2018 годы <i>Горохова И.Н., Панкова Е.И.</i> ..... 51	51
Развитие концептуальной основы охраны и рационального использования почв в Европейском союзе <i>Иванов А.Л., Столбовой В.С., Гребенников А.М.</i> ..... 90	90
Массоперенос химических элементов и их соединений в агроценозах <i>Борисочкина Т.И., Котельникова А.Д., Рогова О.Б.</i> ..... 114	114
Оценка рисков палеобиозагрязнений ландшафтов при деградации криолитозоны на примере оленьих пастбищ Республики Саха (Якутия) <i>Васильев Т.А.</i> ..... 148	148
О работах Почвенного института им. В.В. Докучаева в Узбекистане <i>Панкова Е.И., Ямнова И.А., Назарова Л.Ф., Соловьев Д.А., Исаев В.А.</i> ..... 167	167

## CONTENTS

Granulometric composition of the finite moraine ridge soils of the Upper Volga postglacial region (East European plain, Tver region) <i>Shein E.V., Ivanov D.A., Bolotov A.G., Dembovetskiy A.V.</i> .....	5
On optimizing the deployment of an internet of things sensor network for soil and crop monitoring on arable plots <i>Savin I.Yu., Blokhin Yu.I.</i> .....	22
Changes in the rehabilitation status of irrigated lands in the Volgograd Oblast during 2001–2018 <i>Gorokhova I.N., Pankova E.I.</i> .....	51
Development of the conceptual framework for soil protection and management in the European Union <i>Ivanov A.L., Stolbovoy V.S., Grebennikov A.M.</i> .....	90
The mass transfer of chemical elements and of their compounds in agrocenoses <i>Borisochkina T.I., Kotelnikova A.D., Rogova O.B.</i> .....	114
Risk assessment of paleo-bio-contamination of landscapes resulting from permafrost degradation by the example of reindeer pastures in the Republic of Sakha (Yakutia) <i>Vasiliev T.A.</i> .....	148
On the works of the Dokuchaev Soil Science Institute in Uzbekistan <i>Pankova E.I., Yamnova I.A., Nazarova L.F., Soloviev D.A., Isaev V.A.</i> .....	167

УДК 631.4

DOI: 10.19047/0136-1694-2022-110-5-21



**Ссылки для цитирования:**

Шеин Е.В., Иванов Д.А., Болотов А.Г., Дембовецкий А.В. Гранулометрический состав почв конечно-моренной гряды Верхневолжского постледникового района (Восточно-Европейская равнина, Тверская область) // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2022. Вып. 110. С. 5-21. DOI: 10.19047/0136-1694-2022-110-5-21

**Cite this article as:**

Shein E.V., Ivanov D.A., Bolotov A.G., Dembovetskiy A.V., Granulometric composition of the finite moraine ridge soils of the Upper Volga postglacial region (East European plain, Tver region), Dokuchaev Soil Bulletin, 2022, V. 110, pp. 5-21, DOI: 10.19047/0136-1694-2022-110-5-21

**Благодарность:**

Исследования проведены при финансовой поддержке РФФИ (проект № 19-29-05112 мк) – 50% и по теме госзадания: “Физические основы экологических функций почв: технологии мониторинга, прогноза и управления” – 50% ЦИТИС: 121040800146-3.

**Acknowledgments:**

The studies were carried out with the financial support of the Russian Foundation for Basic Research (scientific project No. 19-29-05112 мк) – by 50%; and by 50% – within the framework of State assignment: “Physical foundations of soils ecological functions: technologies of monitoring, forecasting and management”, CITIS: 121040800146-3.

**Гранулометрический состав почв  
конечно-моренной гряды Верхневолжского  
постледникового района (Восточно-Европейская  
равнина, Тверская область)**

© 2022 г. Е. В. Шеин<sup>1,2\*</sup>, Д. А. Иванов<sup>3\*\*</sup>,  
А. Г. Болотов<sup>1\*\*\*</sup>, А. В. Дембовецкий<sup>2\*\*\*\*</sup>

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

\*<https://orcid.org/0000-0002-0101-5293>, e-mail: [evgeny.shein@gmail.com](mailto:evgeny.shein@gmail.com),

\*\*\*<https://orcid.org/0000-0002-8264-3266>, e-mail: [agbolotov@gmail.com](mailto:agbolotov@gmail.com).

<sup>2</sup>МГУ им. М.В. Ломоносова, Россия,  
119991, Москва, Ленинские горы, 1,

\*\*\*\* <https://orcid.org/0000-0002-8568-504X>, e-mail: [avd26@yandex.ru](mailto:avd26@yandex.ru).

<sup>3</sup>Всероссийский научно-исследовательский институт мелиорированных земель – филиал Почвенного института им. В.В. Докучаева, Россия,  
170530, Тверская обл., п. Эммаусс, 27,

\*\* <https://orcid.org/0000-0002-2588-272X>, e-mail: [volok234@yandex.ru](mailto:volok234@yandex.ru).

Поступила в редакцию 29.01.2022, после доработки 07.02.2022,  
принята к публикации 24.05.2022

**Резюме:** На опытном поле ВНИИМЗ (Тверская область, пос. Эммаусс) заложена серия из 8 почвенных разрезов. Первые три разреза южного склона приурочены к транзитно-аккумулятивному, транзитному и элювиально-транзитному микроландшафту с комплексом глееватых и глеевых почв, который меняется на элювиально-аккумулятивный плосковершинный участок и аналогичные микроландшафты северного склона со слабооглееными и глееватыми дерново-подзолистыми легкосуглинистыми почвами. В отобранных, через каждые 10 см, образцах методом лазерной дифракции и ситовым (>0.25 мм) методом определяли гранулометрический состав почв. На дифференциальных кривых распределения гранулометрических частиц преобладают фракции мелкого песка с максимумом содержания диаметров 100–150 мкм и пыли (1–50 мкм), а в профиле почв выделяются три гранулометрически однородных слоя: верхний с пахотным горизонтом (0–40 см), средний (до 70–80 см) и надморенный (до 120 см). В средней части профиля почв северного склона преобладают пылеватые фракции, а в почвах южной части ландшафта наблюдается сравнительно повышенное содержание песчаной фракции (преобладает фракция тонкого песка, 50–250 мкм, на втором месте фракция крупной пыли, 10–50 мкм), что, видимо, связано с историческими процессами формирования профилей на двучленных отложениях, эрозией и, возможно, с современными агротехнологическими процессами.

**Ключевые слова:** почвенный покров, агроландшафт, лазерный дифрактометр.

## **Granulometric composition of the finite moraine ridge soils of the Upper Volga postglacial region (East European plain, Tver region)**

© 2022 E. V. Shein<sup>1,2\*</sup>, D. A. Ivanov<sup>3\*\*</sup>,  
A. G. Bolotov<sup>1\*\*\*</sup>, A. V. Dembovetskiy<sup>2\*\*\*\*</sup>

<sup>1</sup>Federal Research Centre “V.V. Dokuchaev Soil Science Institute”,  
7 Bld. 2 Pyzhevskiy per., Moscow 119017, Russian Federation,  
\*<https://orcid.org/0000-0002-0101-5293>, e-mail: [evgeny.shein@gmail.com](mailto:evgeny.shein@gmail.com),  
\*\*\*<https://orcid.org/0000-0002-8264-3266>, e-mail: [agbolotov@gmail.com](mailto:agbolotov@gmail.com).

<sup>2</sup>Lomonosov Moscow State University,  
1 Leninskie Gori, Moscow 119234, Russian Federation,  
\*\*\*\*<https://orcid.org/0000-0002-8568-504X>, e-mail: [avd26@yandex.ru](mailto:avd26@yandex.ru).

<sup>3</sup>All-Russian Research Institute of reclaimed Lands–  
V.V. Dokuchaev Soil Science Institute affiliation,  
27 Emmaus, Tver Region 170530, Russian Federation,  
\*\*<https://orcid.org/0000-0002-2588-272X>, e-mail: [volok234@yandex.ru](mailto:volok234@yandex.ru).

Received 29.01.2022, Revised 07.02.2022, Accepted 24.05.2022

**Abstract:** At the experimental field of VNIIMZ (Tver region, village Emmauss) laid a series of 8 soil sections. The first three sections of the southern slope are confined to the transit-accumulative, transit and eluvial-transit microlandscape with a complex of gleevate and gleev soils, which changes to an eluvial-accumulative flat-topped section and similar microlandscapes of the northern slope with slightly bent and gleevate sod-podzolic light loamy soils. In samples taken every 10 cm, the particle size distribution of soils was determined by laser diffraction and sieve (>0.25 mm) methods. The differential distribution curves of soil particles are dominated by fractions of fine sand with a maximum content of diameters of 100–150 µm and silt (1–50 µm). Three granulometrically homogeneous layers are distinguished in the soil profile: the upper one with an arable horizon (0–40 cm), medium (up to 70–80 cm) and super-moraine (up to 120 cm). In the middle part of the soil profile of the northern slope, silty fractions prevail; and in the soils of the southern part of the landscape, a relatively high content of the sandy fraction is observed (the fraction of fine sand, 50–250 µm, dominates, and followed by the coarse silt fraction, 10–50 µm), which, apparently associated with the historical processes of profiles development on binary deposits, erosion, and, possibly, with modern agrotechnological processes.

**Keywords:** soil cover, agricultural landscapes, laser diffractometer.

## ВВЕДЕНИЕ

Северо-западный район России сформировался в основном под действием ледниковых и постледниковых процессов пространственного перераспределения твердофазных осадков, характеризующихся супесчаным и суглинистым составом верхней метровой толщи и подстиланием глинистой красно-бурой морены ([Природообустройство Полесья, 2016](#); [Роде, 2008](#); [Воронин, Березин, 1981](#) и др.). Как правило, эти двучлены имеют специфические региональные особенности как в их историческом формировании, так и в современных режимах: водном, воздушном, тепловом, питательном и др. ([Воронин, Березин, 1981](#); [Кирюшин, 1996](#); [Зайдельман, 1991](#) и др.). Последние имеют особое значение в сельскохозяйственном использовании почв, применении агрохимикатов, оптимизации агроландшафтного обустройства. Эта зона не только неустойчивых тепловых ресурсов, но и избыточного увлажнения, приводящего к периодически застоному (застойно-промывному) водному режиму и, соответственно, дерново-подзолистым почвам с признаками гидроморфизма ([Зайдельман, 1991](#); [Зайдельман, 2011](#) и др.). Для современного ведения сельского хозяйства и понимания основных почвенно-ландшафтных процессов требуется количественное изучение и анализ состояния почвенного покрова, научно обоснованное прогнозирование функционирования почвенного покрова как основы оптимизации управления агропроизводством. Вполне понятно, что основой для исследований и анализа почвенно-ландшафтных процессов является изучение физико-механических свойств дисперсной части почвы, прежде всего ее гранулометрического состава, причем не только в поверхностных горизонтах, но и по всему профилю вплоть до моренных отложений, т. к. именно профильное распределение гранулометрического состава, наличие различных гранулометрических слоев, их мощность и переходные контактные внутрипрофильные зоны определяют особенности водного, воздушного, теплового режимов, которые в основном и формируют региональные условия управления сельскохозяйственным производством.

Цель данного исследования – количественная характеристи-

ка профилно-ландшафтных распределений гранулометрического состава почв агроландшафта конечно-моренной гряды Восточно-Европейской равнины (Тверская обл.). Задачи: (1) профилное по-слойное определение гранулометрического состава дерново-подзолистых глубокоогленных почв на двучленных отложениях, (2) определение связи профилного распределения гранулометрического состава с геоморфологией исследуемого региона и (3) выделение текстурно-характерных закономерностей распределения гранулометрических фракций агроландшафта конечно-моренной гряды Восточно-Европейской равнины (Тверская обл.).

### ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Исследования проводились на агроэкологическом полигоне ВНИИМЗ – филиала “Почвенного института им. В.В. Докучаева”, который, занимая площадь 50 га, расположен в 4 км к востоку от г. Тверь ([Иванов и др., 1999](#)), на моренном холме с относительной высотой 15 м, с четко выраженными геоморфологическими элементами: плоской вершиной, северным пологим склоном крутизной 2–3°, южными склонами (3–5°) и межхолмными депрессиями (северной и южной).

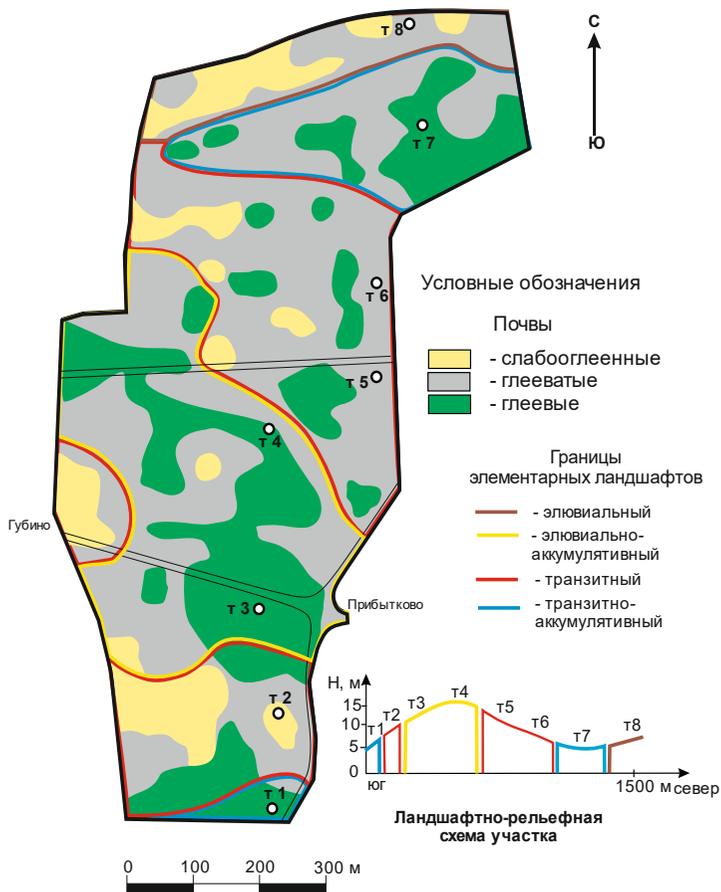
Почвообразующие породы на территории стационара – двучленные отложения. В его южной части мощность кроющего песчано-супесчаного наноса местами превышает 1.5 м. На вершине и северном склоне холма пахотные горизонты сложены супесью и легким суглинком (по морфологическому описанию), мощность легкого кроющего наноса здесь около 1 м, а в межхолмной депрессии морена местами выходит на поверхность. Почвенный покров – вариация-мозаика дерново-подзолистых почв разной степени гидроморфности. Полигон осушен гончарным дренажем со средним междренним расстоянием 30 м.

В качестве объекта исследований выбрано опытное поле ВНИИМЗ – филиала “Почвенного института им. В.В. Докучаева” (рис. 1), на котором представлены дерново-подзолистые почвы разной степени оглеения. Опытный участок расположен на осушаемых землях. Глубина закладки гончарного дренажа в среднем составляет 1 м. Междренное расстояние составляет 20 м в транзитно-аккумулятивных микроландшафтах, 30 м – в транзитных

вариантах и 40 м – в элювиальных вариантах (рис. 1). По данным за 2020–2021 гг., в начале вегетации растений (апрель – май) средний по агроландшафту уровень грунтовых вод (УГВ) находился на глубине 87 см от поверхности почвы, однако существенно различался в точках наблюдения (точки 1–3, рис. 1). На южном склоне он составлял 85–100 см, а на северном (точки 6–8) – 90–112 см. В конце мая – июне УГВ уже составлял 102–140 см и 115–110 см на южном и северном склонах при 115–130 см в центральной части. В конце засушливого сезона 2021 г. УГВ стабилизировался, составляя в среднем по ландшафту 115–125 см от поверхности почвы. Следует отметить однако, что во влажные годы (например, 2020 г.) УГВ может иметь более значительные колебания как во времени, так и по рельефу: например, в первой декаде июня наблюдалось повышение уровня грунтовых вод до 54 см от поверхности почвы (в среднем по агроландшафту). Наиболее близкое залегание грунтовых вод отмечено на вариантах северного склона (22–38 см от поверхности почвы). В конце июня и в начале июля наблюдалось снижение уровня почвенно-грунтовых вод до 76–124 и 122–196 см от поверхности почвы соответственно. В третьей декаде июля залегание грунтовых вод было наиболее близко к поверхности почвы. В среднем по агроландшафту ГВ находились на уровне 37 см от поверхности почвы. В вариантах северного склона ГВ поднялась до уровня 22–18 см, а в точке 5 отмечалось затопление посевов. В августе и сентябре 2020 г. УГВ составлял от 131 до 93 см от поверхности почвы ([Иванов и др., 2021](#)).

По трансекте с юга на север были заложены почвенные разрезы (точки 1–8). Разрез 4 расположен на вершине холма, слабо дренируемого водораздела, разрезы 1, 2, 3 – на южном склоне. Разрезы 5, 6, 7 и 8 – в средней и нижней части северного склона. Почвенными разрезами (разрезы 4 и 5) агроландшафт был охарактеризован по центральной оси (рис. 1) от дерново-подзолистых глееватых в южной части до глубокооогленных в северной части на двучленах разной мощности.

Особенности морфологии почв этого агроландшафта состоят в характере залегания почвенно-генетических горизонтов и глубине моренных отложений.



**Рис. 1.** Карта-схема почвенно-ландшафтных условий опытного поля ВНИИМЗ с рельефной характеристикой юго-северной катены почвенных разрезов (точки 1–8).

**Fig. 1.** Map of soil and landscape conditions of the VNIIMZ experimental field with relief characteristics of soil pits (points 1–8) along the south-northern catena.

Отметим, что в исследованных почвах моренного ландшафта подзолистые горизонты выражены слабо, и нельзя выделить отдельный элювиальный горизонт. В центральной части (на бут-

ровом повышении) залегают в комплексе с агрогумусовыми глеевыми почвами в основном агродерново-подзолисто-глеевые почвы с профилем (индексация горизонтов выполнена по классификации почв России 2004 г.): Р (0–21 см) пахотный, легкосуглинистый, темно-серый, агрегатная структура не выражена, Pad (21–30) – плотнее Р, выражено агрогенное уплотнение, BTg (30–46) – светлее, отмечаются отдельные примазки и светло-красные помазки, BTg<sub>2</sub> (47–90) – светло-голубые пятна оглеения, наиболее часто встречаются с глубины 70 см, постепенный переход к красноватобурой морене. В этой части тяжелосуглинистая, карбонатная морена, которая на большей части опытного поля залегают на глубине 1.5–1.7 м, поднимается до глубины 1.0–1.2 м. Агродерново-подзолисто-глеевые и глееватые почвы, как указывалось, приурочены к средней части склона и к бугровой повышенной. Междреннее расстояние – 28–30 м, смешанный тип водного питания (атмосферные осадки и намывные склоновые воды), УГВ – 1.3–1.7 м в сухой период, 0.6–0.7 м во влажный.

В северной части моренные отложения подходят ближе к поверхности (на глубине 30–39 см), подстилая горизонты Р (0–25 см) пахотный, легкий суглинок темно-серого цвета, Pad (21–30), BTg<sub>2</sub> осветленный, надморенный с отдельными малозаметными признаками оглеения в виде примазок и пятен, которые наиболее интенсивно встречаются при приближении к зоне морены. К плоской части агроландшафта и к его северной части склона приурочены в основном глубокооглеенные почвы.

Агрогумусовая глеевая почва приурочена к нижней части склона. Пятна и другие следы оглеения встречаются по всему профилю. Междреннее расстояние в этой части ландшафта составляет 18–20 м, водное питание за счет намывных склоновых и почвенно-грунтовых вод.

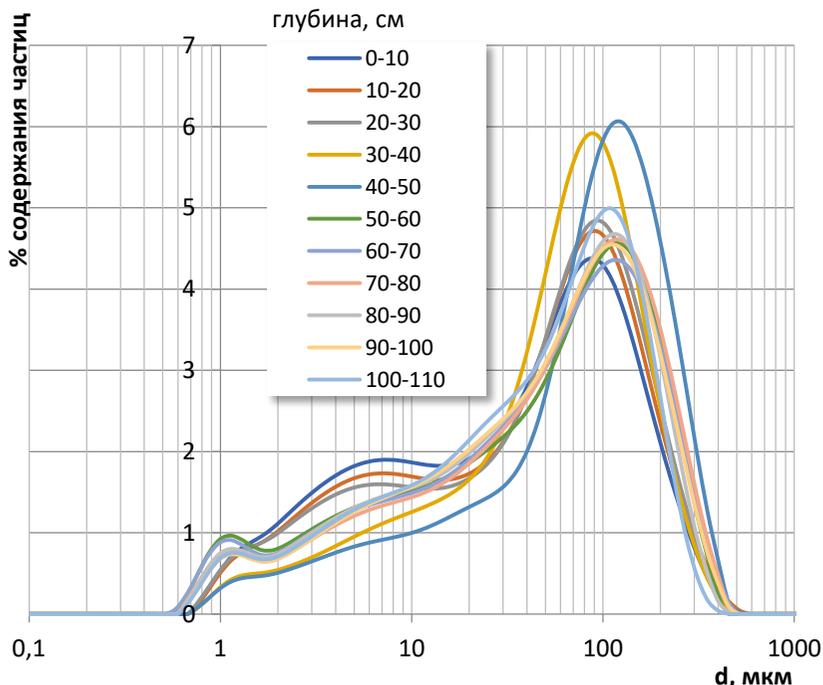
Метод лазерной дифракции (ЛД). Пробоподготовка образцов почв к гранулометрическому анализу методом ЛД проведена на ультразвуковом диспергаторе зондового типа Digital Sonifier S-250D (Branson Ultrasonics, США) при энергии ультразвука равной 450 Дж/мл.

Гранулометрический анализ проводился в два этапа. На первом этапе (ситовой метод) растирали навеску почвы 20 г и

пропускали через сито 1 мм. Затем к фракции меньше 1 мм добавляли 30 мл дистиллированной воды и подвергали суспензию диспергированию ультразвуком в течение 5 мин с мощностью 60% на ультразвуковом диспергаторе. Заметим, что химические диспергирующие реактивы не добавляли, а диспергацию проводили лишь физическим методом ультразвуковой обработки, поскольку такой метод считается общепринятым для разделения микроагрегатов до уровня элементарных почвенных частиц, не разрушая последние ([North, 1976](#)). После ультразвуковой обработки суспензию пропускали через сито с диаметром отверстий 0.25 мм. Оставшуюся фракцию > 0.25 мм выпаривали и высушивали при 105 °С. Затем рассчитывали процент гравия 1–3 мм и фракцию крупного песка 0.25–1 мм (ISO 13320 – [Particle size analysis, 2009](#); [Eshel et al., 2004](#); [Теории и методы физики почв, 2007](#)). На втором этапе проводили анализ гранулометрических частиц размером менее 0.25 мм на лазерном дифрактометре Mastersizer 3000E (Великобритания). К навеске от 250 до 400 мг, в зависимости от содержания песчаных частиц, добавляли 30 мл дистиллированной воды и обрабатывали ультразвуком в течение 5 мин. Полученную суспензию анализировали на лазерном дифрактометре в 3 повторностях.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Прежде всего рассмотрим профильные дифференциальные послойные распределения гранулометрических элементов в почвенном профиле на вершине холма на примере разреза 4 (рис. 2). Следует отметить положения горизонтальных участков и экстремумов (межфракционных переломов) на этих кривых, указывающих на предположительное окончание одной фракции определенного диапазона размеров и начало следующей. Так, на рисунке 2 видно увеличение глинистых частиц размером < 2 мкм с небольшим максимумом (1 мкм) для большинства слоев, постепенное увеличение фракции пыли от 2 до 50 мкм без выраженного максимума и явное доминирование песчаной фракции с диаметром более 50 мкм при максимуме содержания частиц с размером 100–110 мкм.



**Рис. 2.** Дифференциальные кривые послойного (по 10 см) профильного распределения гранулометрического состава почв (в качестве примера приведен грансостав разреза 4 на центральном бугровом повышении).

**Fig. 2.** Differential curves of the layered (10 cm layer by layer) profile distribution of the particle size composition of soils (the particle size distribution in the soil pit 4 located on the central hillock rise was taken as an example).

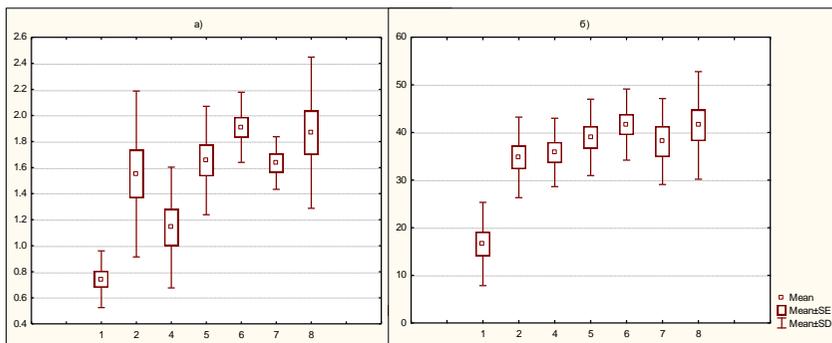
Совершенно ясно, что доминирует песчаная фракция (4.5–6%) во всех исследованных 10-см слоях с максимумом в слоях 30–50 см, где ее максимальное содержание достигает 6%. При углублении, с 60 см, содержание пыли немного увеличивается, но также увеличивается содержание среднего и крупного песка, как будет показано ниже, т. е. при приближении к моренному слою содержание песчаных частиц в целом возрастает. Пик распределения песчаных частиц достаточно узкий, что указывает на “отмытость и

отсортированность” песчаных частиц размерами 100–110 мкм. При этом в верхней части профиля, вплоть до 30 см, существенно выражена и фракция пыли, что отмечал А.А. Роде ([Роде, 2008](#)) для супесчаных почв Полесья. Подобные распределения гранулометрических элементов характерны и для других почвенных разрезов. Однако при сравнительной характеристике распределения гранулометрических фракций проявляются и другие особенности, связанные, видимо, как с особенностями постледникового формирования рельефа, так и с эрозионной деятельностью и агротехническими условиями использования почвенного покрова в сельскохозяйственных целях.

Распределение содержания тонких фракций хорошо иллюстрируется на рисунке 3, на котором в виде Vox & Wisker представлены величины содержания ила (рис. 3а), общее содержание пыли (рис. 3б) и их варьирование вдоль трансекты. Заметное варьирование глинистых частиц наблюдается на южном склоне (точка 2), а также в средней и нижней части северного склона бугра (точки 4, 8). При этом с увеличением содержания пылеватой фракции от вершины бугра вниз по северному склону трансекты стандартное отклонение остается практически неизменным и варьирование пыли по профилю не так заметно.

По дифференциальным кривым были рассчитаны основные гранулометрические фракции по классификации Качинского с учетом фракций, полученных ситовым методом (рис. 4). Из диаграмм видно, как изменялось содержание основных фракций (по классификации Качинского) при сравнении распределений содержаний фракций в профилях почв ([Теории и методы, 2007](#); [Воронин, Березин, 1981](#) и др.). По классификации Н.А. Качинского, гранулометрический состав южного склона меняется от песка связного и супесей до суглинка легкого, а для почв северного склона происходит смена в ряду суглинок средний – супесь – суглинок легкий. Обратим внимание на суммарное содержание фракций ила и пыли (частиц < 50 мкм) в профилях исследуемых почв. Заметим, что содержание пыли к вершине холма исследуемой территории возрастает от 18 до 43%. Еще более заметное увеличение содержания тонких частиц (пыли) к разрезам 6 и 8, где в верхних слоях (0–40 см) содержание пыли может превышать 50%.

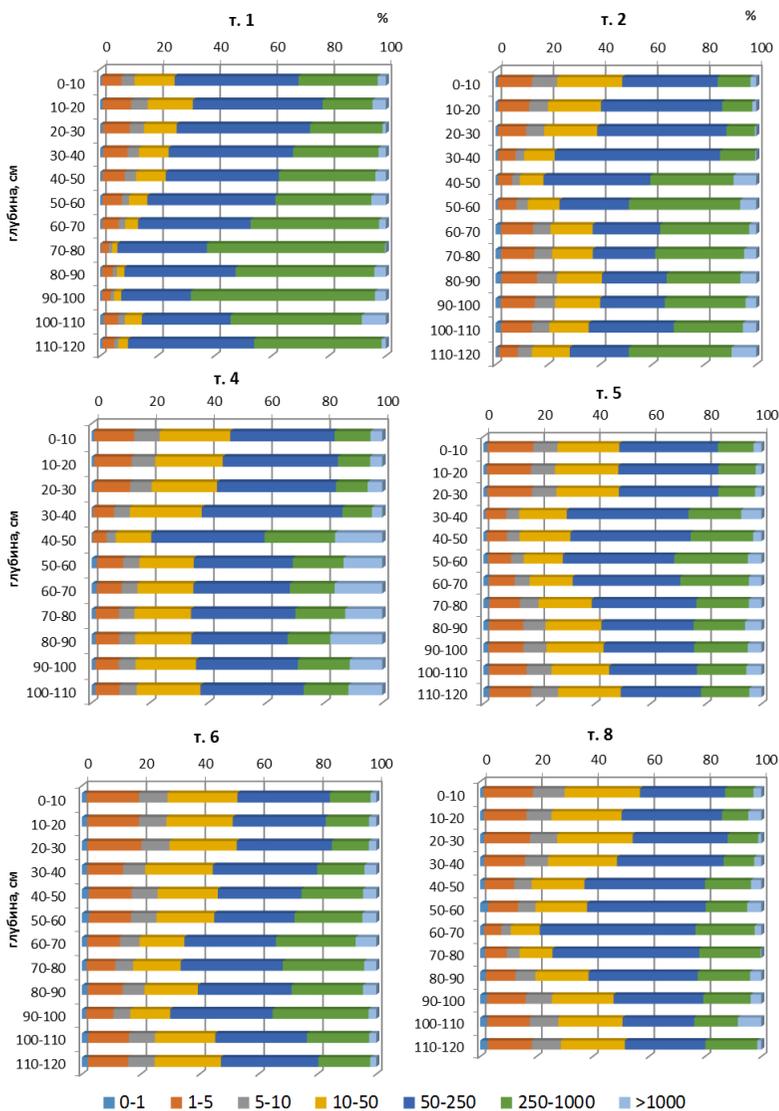
В разрезах южной части трансекты начинают проявляться фракции крупного (500–1 000 мкм) и среднего песка (250–500 мкм).



**Рис. 3.** Статистики (среднее, ошибка среднего и стандартное отклонение) содержания фракции ила (а) и пыли (б) по профилю почвенных разрезов (нумерация сохранена как на рис. 1) по трансекте опытного поля.

**Fig. 3.** Statistics (mean, mean error and standard deviation) of the content of the fraction of silt (а) and dust (б) on the profile of soil sections (numbering is preserved as in Fig. 1) on the transect of the experimental field.

Таким образом, вдоль по северному склону постепенно начинают возрастать фракции пыли при уменьшении относительного содержания песка. Естественен вопрос – с чем это связано? Отметим два факта, которые могут помочь в причинно-следственном обсуждении этого вопроса. Первый факт очевиден: моренные отложения приближаются к поверхности, тем самым все в большей степени участвуя в процессе почвообразования. Второй – все большее участие в формировании гранулометрического профиля пылеватых фракций, как отмечалось выше, их содержание возрастает в разрезах № 6 и 8. Эти факты можно объяснить явлением эрозии поверхности почвы. Верхние слои почвы смываются, приближая глинистые моренные слои к поверхности, и тем самым относительно утяжеляя профиль почв.



**Рис. 4.** Профильные диаграммы распределения гранулометрических фракций с глубиной (по Н.А.Качинскому).

**Fig. 4.** Profile diagrams of particle size (fractions) distribution with depth (according to N.A. Kachinskiy).

Кроме того, эрозийные потоки несли в основном тонкие, пылеватые частицы, способствуя их накоплению на северном склоне.

Обратим внимание на второй аспект профильного распределения гранулометрических элементов – неравномерность их распределения по слоям.

Этот аспект важен в связи с тем, что почвенные слои различного грансостава формируют застойные гидрологические условия, различные гидрологические экраны, которые могут играть заметную роль в водном режиме почв, сказываться на почвенной гидрологии – водообеспеченности растений в корнеобитаемом слое. При сравнении дифференциальных кривых (рис. 2) можно выделить закономерные пики песчаных частиц с максимумом содержания 4.5–6% в диапазоне диаметров частиц 100–110 мкм. Этому максимуму мелкого песка предшествует достаточно равномерное и распределение пылеватых частиц размером от 3 до 20 мкм при их среднем содержании 1–2% и плавно возрастающее от 0 до 1.5% содержание физической глины (размер частиц < 2 мкм).

По профильным диаграммам наблюдается ярко выраженная смена почвенно-гранулометрических слоев, в основном в разрезах северного склона. Отчетливо выделяется верхний слой – до 30–40 см – с большим содержанием пылеватых частиц (45–50%) и более однородный по соотношению всех гранулометрических фракций. Затем выделяется средний опесчаненный слой – до 70–80 см – с преобладанием частиц мелкого песка (50–250 мкм) до 40–45%, а также более глубокие слои до 120 см, примыкающие к подстилающей морене, в которых наблюдается постепенное увеличение пылеватых частиц. Такая неоднородность гранулометрического профиля свойственна почвам всей трансекты, за исключением точки 1, где профиль в целом более легкого грансостава, что связано с аккумулятивными отложениями близлежащего водотока.

## ВЫВОДЫ

В профиле дерново-подзолистых глееватых почв исследованного Опытного поля ВНИИМЗ на дифференциальных кривых распределения частиц отчетливо выделяются фракции глины (< 2

мкм), пыли (2–50 мкм) и физического песка (> 50 мкм), что позволяет обоснованно использовать математические прогностические гидрологические модели с их педотрансферным сопровождением (например, SWAT) в пределах исследованной территории.

В профиле (до глубины 110 см) дерново-подзолистых почв изученного ландшафта выделяются в основном три гранулометрически однородных слоя: верхний с пахотным горизонтом (0–30 см), средний – более опесчаненный, по сравнению с выше и ниже лежащими слоями (до 70–80 см), и надморенный (до 120 см). Эти слои специфичны по содержанию гранулометрических элементов для почв южного, северного склонов и центральной части агроландшафта. Именно они должны быть учтены при формировании препроцессорного пакета свойств для гидрологической характеристики и при прогнозе гидрологии почвенного покрова (гидрологически важные слои).

Почвы склонов разной экспозиции различаются по грансоставу в пределах почвенного профиля, по гранулометрической контрастности почвенных слоев и преобладанию пылеватой и тонкопесчаной фракций. Так, в средней части профиля почв северного склона преобладают пылеватые фракции, а в почвах южной части ландшафта наблюдается сравнительно повышенное содержание песчаной фракции (преобладает фракция тонкого песка, 50–250 мкм, на втором месте фракция крупной пыли, 10–50 мкм), что, видимо, связано с историческими процессами формирования профилей на двучленных отложениях, эрозией и, возможно, с современными агротехнологическими процессами.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Воронин А.Д., Березин П.Н.* Применение седиграфа для гранулометрического анализа почв и грунтов // Почвоведение. 1981. № 5. С. 56–64.
2. *Зайдельман Ф.Р.* Эколого-мелиоративное почвоведение гумидных ландшафтов. М.: Агропромиздат, 1991. 320 с.
3. *Зайдельман Ф.Р.* Фермеру и садоводу о почвах, их экологии и повышении плодородия. М.: КРАСАНД, 2011. 272 с.
4. *Иванов Д.А.* и др. Разработать теоретические основы ландшафтно-мелиоративного природообустройства агрогеосистем гумидной зоны на основе результатов мониторинга состояния их природной среды и

дистанционного зондирования Земли. Тема 0651-2019-0005 (руководитель темы: Иванов Д.А.). Отчет о научно-исследовательской работе ФГБНУ ВНИИМЗ, 2021.

5. *Иванов Д.А., Корнеева Е.М., Салихов Р.А., Петрова Л.И., Пугачева Л.В., Рублюк М.В.* Создание ландшафтного полигона нового поколения // *Земледелие*. 1999. № 6. С. 15–16.

6. *Кирюшин В.И.* Экологические основы земледелия. М.: Колос, 1996. 366 с.

7. *Природообустройство Полесья*. Полесья севера и северо-востока Европейской части России. Т. 2. / под общ. ред. Ю.А. Мажайского, А.Н. Рокочинского, Ф.Р. Зайдельмана и др. Рязань: Мещерский ф-л ФГБНУ “ВНИИГиМ имени А.Н. Костякова”, 2019. 340 с.

8. *Роде А.А.* Подзолообразовательный процесс. Избр. труды. Т. 2. М.: Россельхозиздат, 2008. 479 с.

9. Теории и методы физики почв / под ред. *Шеина Е.В., Л.О. Карпачевского*. М.: “Гриф и Ко”, 2007. 616 с.

10. *Eshel G.G., Levy J., Mingelgrin U., Singer M.J.* Critical evaluation of the use of laser diffraction for particle-size distribution analysis // *Soil Sci. Soc Am. J.* 2004. Vol. 68. P. 736–743.

11. ISO 13320 – Particle size analysis – Laser diffraction methods. Geneva, Switzerland: ISO. 2009.

12. *Ryżak M., Sochan A.* Simple Method for Estimating Particle Numbers Using a Laser Diffractometer // *Pol. J. Environ. Stud.* 2013. Vol. 22. No. 1. P. 213–218.

13. *North P.F.* Towards an absolute measurement of soil structural stability using ultrasound // *J. Soil Sci.* 1976. Vol. 27. P. 451–459. DOI: [10.1111/j.1365-2389.1976.tb02014.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.1976.tb02014.x).

## REFERENCES

1. Voronin A.D., Berezin P.N., *Primenenie sedigrafa dlya granulometricheskogo analiza pochv i gruntov* (Application of sedigraph for granulometric analysis of soils and soils), *Pochvovedenie*, 1981, No. 5, pp. 56–64.

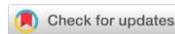
2. Zaidel'man F.R., *Ekologo-meliorativnoe pochvovedenie gumidnykh landshaftov* (Ecological and reclamation soil science of humid landscapes), Moscow: Agropromizdat, 1991, 320 p.

3. Zaidel'man F.R., *Fermeru i sadovodu o pochvakh, ikh ekologii i povyshenii plodorodiya* (Farmer and gardener about soils, their ecology and increasing fertility), Moscow: KRASAND, 2011, 272 p.

4. Ivanov D.A., *To develop the theoretical foundations of landscape-reclamation environmental management of agroecosystems of the humid zone based on the results of monitoring the state of their natural environment and remote sensing of the Earth*. Topic 0651-2019-0005 (research director: Ivanov D.A.). Research report, 2021.
5. Ivanov D.A., Korneeva E.M., Salikhov R.A., Petrova L.I., Pugacheva L.V., Rublyuk M.V., *Sozdanie landshaftnogo poligona novogo pokoleniya (Create a new generation landscape polygon)*, *Zemledelie*, 1999, No. 6, pp. 15–16.
6. Kiryushin V.I., *Ecological foundations of agriculture*, Moscow: Kolos, 1996, 366 p.
7. Mazhaiskiy Yu.A., Rokochinskiy A.N., Zaidel'man F.R. (Eds) et al., *Prirodoobustroistvo Poles'ya. Poles'ya severa i severo-vostoka Evropeiskoi chasti Rossii. T. 2 (Environmental management in Polesye. Fields of the north and north-east of the European part of Russia, Vol. 2)*, Ryazan: Meshcherskii f-l FGBNU “VNIIGiM imeni A.N. Kostyakova”, 2019, 340 p.
8. Rode A.A., *Podzoloobrazovatel'nyi protsess (Podzol formation process)*, Moscow: Rossel'khozizdat, 2008, Vol. 2, 479 p.
9. Shein E.V., Karpachevskiy L.O. (Eds), *Teorii i metody fiziki pochv (Theories and methods of soil physics)*, Moscow: “Grif i Ko”, 2007, 616 p.
10. Eshel G.G., Levy J., Mingelgrin U., Singer M.J., Critical evaluation of the use of laser diffraction for partial-size distribution analysis, *Soil Sci. Soc Am.J.*, 2004, Vol. 68, pp. 736–743.
11. *ISO 13320 – Particle size analysis – Laser diffraction methods*, Geneva, Switzerland: ISO, 2009.
12. Ryzak M., Sochan A., A simple method for estimating particle numbers using a laser diffractometer, *Pol. J. Environ. Stud.*, 2013, Vol. 22, No. 1, pp. 213–218.
13. North P.F., Towards an absolute measurement of soil structural stability using ultrasound, *J. Soil Sci.*, 1976, Vol. 27, pp. 451–459, DOI: [10.1111/j.1365-2389.1976.tb02014.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.1976.tb02014.x).

УДК 631.4

DOI: 10.19047/0136-1694-2022-110-22-50



### Ссылки для цитирования:

Савин И.Ю., Блохин Ю.И. Об оптимизации размещения сети датчиков интернета вещей на пахотных угодьях // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2022. Вып. 110. С. 22-50. DOI: 10.19047/0136-1694-2022-110-22-50

### Cite this article as:

Savin I.Yu., Blokhin Yu.I. On optimizing the deployment of an internet of things sensor network for soil and crop monitoring on arable plots, Dokuchaev Soil Bulletin, 2022, V. 110, pp. 22-50, DOI: 10.19047/0136-1694-2022-110-22-50

### Благодарность:

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российской Федерации (соглашение с Минобрнауки России № 075-15-2020-805 от 02 октября 2020 г.).

### Acknowledgments:

The study was financially supported by Ministry of Education and Science of the Russian Federation (agreement No. 075-15-2020-805 from October 2, 2020).

## Об оптимизации размещения сети датчиков интернета вещей для мониторинга почв и посевов на пахотных угодьях

© 2022 г. И. Ю. Савин<sup>1,2\*</sup>, Ю. И. Блохин<sup>3\*\*</sup>

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

\* <https://orcid.org/0000-0002-8739-5441>, e-mail: [savin\\_iyu@esoil.ru](mailto:savin_iyu@esoil.ru)

\*\* e-mail: [blohin3k4@gmail.com](mailto:blohin3k4@gmail.com)

<sup>2</sup>Российский университет дружбы народов, Россия,  
117198, Москва, ул. Миклухо-Маклая, 6.

<sup>3</sup>Агрофизический научно-исследовательский институт,  
195220, Санкт-Петербург, Гражданский просп., д. 14.

Поступила в редакцию 16.03.2022, после доработки 30.03.2022,  
принята к публикации 24.05.2022

**Резюме:** Одним из направлений цифровизации в сельском хозяйстве является внедрение технологий интернета вещей. Оно выражается в создании и использовании специализированных датчиков свойств почв и посевов, которые размещаются на полях. Размещение подобных датчиков в пространстве должно позволить охарактеризовать все микронеоднородности параметров плодородия почв на поле. То есть их количество и пространственное размещение должно быть оптимальным, с одной стороны, с точки зрения затрат на их приобретение и эксплуатацию, а с другой стороны, с точки зрения точности интерполяции получаемых с их помощью данных на всю территорию поля. Показано, что использование карт состояния посевов, полученных по спутниковым данным, и выделение по ним рабочих участков (management zones) может приводить к значительным ошибкам при интерполяции результатов мониторинга в отдельных точках на все поле. Предложен подход для оптимизации размещения датчиков, основанный на использовании карт пестроты плодородия почв полей, которые являются результатом доработки, обновления и уточнения традиционно составленных почвенных карт на основе данных дистанционного зондирования высокого или сверхвысокого пространственного разрешения. Возможности использования подхода продемонстрированы на примере тестового поля.

**Ключевые слова:** пространственное варьирование почв, NDVI, спутниковый мониторинг почв, спутниковый мониторинг посевов, датчики свойств почв и посевов.

## On optimizing the deployment of an internet of things sensor network for soil and crop monitoring on arable plots

© 2022 I. Yu. Savin<sup>1,2\*</sup>, Yu. I. Blokhin<sup>3\*</sup>

<sup>1</sup>Federal Research Centre “V.V. Dokuchaev Soil Science Institute”,  
7 Bld. 2 Pyzhevskiy per., Moscow 119017, Russian Federation,  
\*<https://orcid.org/0000-0002-8739-5441>, e-mail: [savin\\_iyu@esoil.ru](mailto:savin_iyu@esoil.ru),  
\*\*e-mail: [blohin3k4@gmail.com](mailto:blohin3k4@gmail.com).

<sup>2</sup>Institute of Environmental Engineering of RUDN University,  
8/2 Miklukho-Maklaya Str., Moscow 117198, Russian Federation.

<sup>3</sup>Agrophysical Research Institute,  
14 Grazhdansky prospect, Sankt-Peterburg 195220, Russian Federation

Received 16.03.2022, Revised 30.03.2022, Accepted 24.05.2022

**Abstract:** One of the main stream of digitalization in agriculture is the introduction of Internet of Things technologies, which is expressed in the creation and use of specialized sensors that are placed in the fields. The placement of such sensors within agricultural plot should make it possible to characterize all the microvariability of soil fertility parameters in the field. That is, their number and spatial location should be optimal, on the one hand, in terms of costs of their acquisition and operation, and, on the other hand, in terms of accuracy of interpolation of data obtained with their help to the entire plot. It has been shown that the use of crop condition maps obtained on the basis of satellite data and the separation based on them of management zones can lead to significant errors in the interpolation of monitoring results, obtained in separate points, on the whole plot. An approach for optimization of sensor placement is proposed based on the use of soil fertility mapping, which is the result of refinement, updating and clarification of traditionally drawn soil maps on the basis of high spatial resolution remote sensing data. The possibilities of using the approach are demonstrated by the example of a test plot in Leningrad region of Russia.

**Keywords:** precise agriculture, soil sensors, soil spatial variability, internet of things in agriculture, Sentinel-2.

## ВВЕДЕНИЕ

В последние годы наблюдается активное внедрение цифровых технологий в сельское хозяйство ([Иванов и др., 2018](#)). Оно идет во многих направлениях: в области создания специализированных роботов, автоматизации технологических процессов, создании систем принятия управленческих решений ([E-agriculture in action, 2017](#); [Ведомственный проект..., 2019](#)).

Одним из направлений цифровизации в сельском хозяйстве является внедрение технологий интернета вещей (Internet of Things (IoT)). Оно выражается в создании и использовании специализированных датчиков, которые размещаются на полях, на отдельных сельскохозяйственных растениях и животных. С помощью беспроводных технологий передачи данных полученная информация может передаваться на сервер или облако с целью получения в режиме реального времени информации об их состоянии, которая может оперативно использоваться для принятия управленческих решений, например, для коррекции агротехники возделывания сельскохозяйственных культур ([Elijah et al., 2018](#)).

Одним из направлений использования технологий IoT в земледелии и растениеводстве является создание датчиков, которые собирают различные данные о параметрах почв и посевов в режиме реального времени, представляющих интерес в практике точного земледелия ([Viscarra Rossel, Bouma, 2016](#); [Shafi et al., 2019](#); [Maloku et al., 2021](#)). Чаще всего подобные датчики в точном земледелии устанавливаются непосредственно на сельскохозяйственную технику ([Patrício, Rieder, 2018](#); [Morais et al., 2021](#)). Однако в качестве отдельного направления развивается использование стационарных или полустационарных датчиков, которые размещаются на поле постоянно или меняют свое местоположение каждый сезон ([Placidi et al., 2021](#)).

При размещении IoT системы на поле необходимо достичь его максимального покрытия, при этом развернув минимальное количество сенсорных узлов (СУ) и сохранив надежную радиокommunikацию между ними. Необходимо применять стратегию размещения СУ на конкретном поле с учетом локальных условий/требований и оптимальные подходы к размещению СУ с учетом пространственной неоднородности параметров почв или растений. Использование большого количества СУ (несколько десятков), распределенных на поле случайным образом или равномерно, приводит к увеличению нагрузки на ретрансляторы СУ, что увеличивает время рабочего цикла и, следовательно, ведет к уменьшению энергоэффективности системы, изменению топологии сети и увеличению стоимости сервисного обслуживания.

Из-за особенностей сельскохозяйственного сектора использование проводных систем для сбора информации практически неосуществимо, поэтому иногда размещают СУ под поверхностью земли, не мешая работе сельскохозяйственной техники.

Размещение подобных датчиков в пространстве должно позволить охарактеризовать все микронеоднородности параметров плодородия почв на поле. То есть количество датчиков и их пространственное размещение должно быть оптимальным, с одной стороны, с точки зрения затрат на их приобретение и эксплуатацию, а с другой стороны, с точки зрения точности интерполяции получаемых с их помощью данных на всю территорию поля ([Visalini et al., 2019](#)).

Существует множество подходов к планированию размещения датчиков, основывающихся на различных методах: многомерное измерение свойств на основе тестовой площадки с использованием максимального проецирования на минимальное одномерное пространство для линейных обратных задач (testbed-based multimetric quality measurement, using maximal projection on the minimum Eigenspace for linear inverse problems), смоделированных как невыпуклая задача и выпуклая релаксация с использованием бокс-ограничений (a nonconvex problem and a convex relaxation using box constraints), и другие ([Kaiwartya et al., 2016](#); [Jiang et al., 2016](#); [Manohar et al., 2018](#)).

Изучались различные подходы к размещению датчиков для приложений точного земледелия (ТЗ), и было замечено, что выбор подхода существенно влияет на общую эффективность ([Gupta et al., 2015](#); [Sakai et al., 2015](#)). Однако установка большого количества датчиков невозможна из-за соображений стоимости и проблем с большими данными. Таким образом, задача оптимального размещения датчиков является ключевой в точном земледелии. Точно так же, как и проблема выбора оптимального датчика для размещения в СУ вызывает значительный интерес.

В литературе изучено множество подходов к разреженному размещению датчиков (sparse sensor placement). Наиболее распространен эвристический подход с использованием комбинаторного поиска методом перебора ([Cohen et al., 2006](#); [Naeem et al., 2009](#); [Rebai et al., 2015](#); [Manohar et al., 2018](#)). Эти методы достаточно хороши для задач среднего масштаба хозяйств.

В исследованиях ([Jamali-Rad et al., 2014](#)) размещение датчика на поле моделировалось как линейная обратная задача, и наиболее оптимальное решение было получено с помощью эффективных вычислений ([Shamiah et al., 2010](#); [Shen, Varshney, 2014](#); [Chepuri, Leus, 2015](#)).

В качестве одного из принципов определения мест оптимального размещения датчиков на поле предлагается использовать анализ неоднородностей изображения посевов на поле по данным дистанционного зондирования (ДДЗ) ([Prudnikova et al., 2019](#); [Железова, 2020](#)). В качестве показателя неоднородности используют в основном данные об NDVI (Normalized Difference Vegetation In-

dex). Считается, что NDVI отражает фактическую неоднородность посевов и зоны постоянно низких или постоянно высоких значений, отражает зоны с разным уровнем плодородия.

С другой стороны, известно, что существует много факторов, которые влияют на величину NDVI. Значения NDVI выходят на плато при густых посевах. Выраженность пространственного варьирования NDVI сильно зависит от типа возделываемой культуры и ее чувствительности к пространственным изменениям почв поля, а также от метеорологических условий сезона вегетации ([Савин и др., 2021](#)). Это все приводит к тому, что при использовании карт NDVI в качестве основы для планирования размещения датчиков на поле возникают неопределенности и ошибки, которые существенно снижают эффективность использования технологий IoT.

В качестве альтернативы предлагается выделение “зон управления” на основе применения электромагнитных датчиков, перемещаемых по полю на автомобиле (<https://cropwatch.unl.edu/documents/On-the-Go%20Vehicle-Based%20Soil%20Sensors%20-%20EC178.pdf>). Разместив датчики в зонах управления, было бы возможно осуществлять мониторинг параметров плодородия всего поля. Но известно, что свойства почв, которые определяют сигнал, фиксируемый подобными датчиками, сильно меняются как в пространстве (горизонтальном и вертикальном), так и во времени. Это означает, что для создания подобных карт необходимы дополнительные исследования с учетом сезонной и многолетней динамики состояния посевов.

Теоретически более логичным выглядит размещение датчиков на поле на базе информации о почвах поля, их пространственном “микротоварьировании” (варьировании параметров плодородия почв на малых расстояниях). Ведь именно микротоварьирование почв на поле определяет во многом пестроту их плодородия и пространственную изменчивость состояния посевов на поле. Пространственное варьирование почв во многом контролирует процессы перераспределения и трансформации питательных веществ, энергии и влаги, необходимых для роста растений ([Савин, 2016](#)).

Однако до сих пор детальных исследований связи состояния посевов с пространственным варьированием почв полей недоста-

точно, чтобы решить проблему оптимального размещения датчиков параметров плодородия почв на поле. В данной статье приведены результаты исследований в этом направлении.

## ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

### *2.1. Тестовый участок*

Исследования проводились на примере тестового поля Меньковского стационара АФИ (Ленинградская область). Расположение тестового поля показано на рисунке 1.

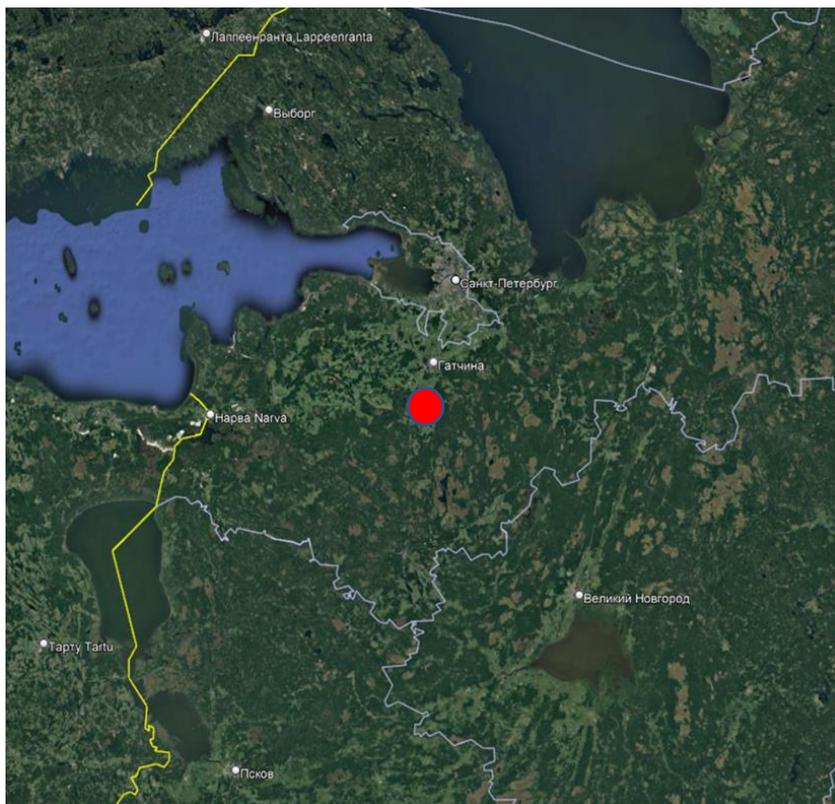
Поле является достаточно неоднородным с точки зрения выраженности микрорельефа и пространственного варьирования почв. На нем преобладают дерново-слабоподзолистые среднеокультуренные легкосуглинистые почвы (мощность пахотного слоя – 22 см, содержание гумуса – 2.07%,  $pH_{KCl}$  – 5.7; содержание обменного кальция 8.38 мМоль/100 г, магния – 2.88 мМоль/100 г, подвижных соединений фосфора и калия – 565 и 140 мг/кг, аммонийного и нитратного азота 12.37 и 8.21 мг/кг соответственно).

На почвенной карте хозяйства также показаны оглеенные и смытые разновидности почвы в качестве сопутствующих дерново-слабоподзолистым. При этом почвенная карта хозяйства не отражает те неоднородности свойств почв, которые могут приводить к неоднородностям посевов сельскохозяйственных культур, а именно: влажность и гидроморфность почв, содержание в них питательных веществ, плотность и оструктуренность почв. Это, впрочем, не является недостатком конкретной почвенной карты хозяйства, а характерно для всех традиционно составленных почвенных карт ([Савин, 2016](#)).

### *2.2. IoT-система*

На тестовом поле планируется размещение IoT-системы, которая с помощью аппаратного обеспечения может адаптировать процесс сбора данных широкого спектра датчиков, используемых в полевых условиях, обеспечивая высокую степень детализации и, таким образом, лучше описывая пространственную изменчивость, на которую обычно направлена практика ТЗ, с возможностью использования различных протоколов связи. Система включает ав-

томатическую метеостанцию (IoT АМС), координатор беспроводной сенсорной сети (БСС) и сеть СУ.



**Рис. 1.** Расположение тестового поля (красный значок).

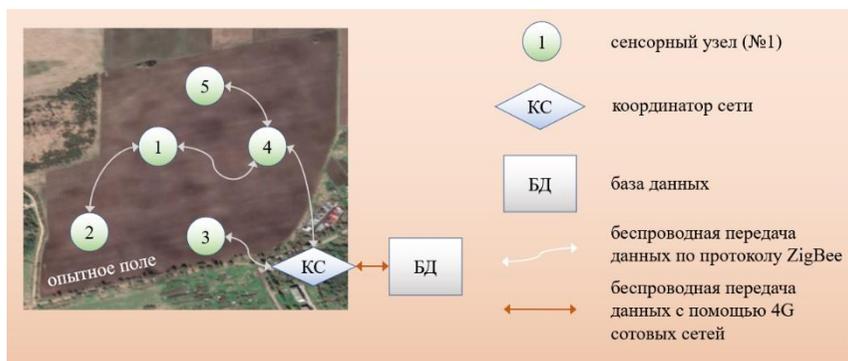
**Fig. 1.** Test plot location (red circle).

Предложенная конфигурация позволяет скрыто устанавливать узел на поле под поверхностью земли, не опасаясь повреждений от наземной техники и людей. С помощью выдвижной антенны осуществляется связь между узлами и базовой станцией, размещенной над поверхностью земли в удалении от поля, избегая таким образом проблем с радиокommunikациями в почве.

Мониторинг метеоусловий, температуры и влажности почвы осуществляется через централизованную архитектуру передачи данных БСС, включающую три основных элемента: сенсорные узлы с датчиками, координатор (или шлюз) для сбора и передачи данных, интернет-сервер с базой данных. IoT-система включает СУ, использующие энергоэффективный стандарт передачи данных ZigBee и реализующие топологию типа “mesh” (ячеистая топология) (рис. 2).

Координатор БСС – устройство с интернет-каналом передачи данных для мониторинга метеорологических параметров – оснащен датчиками, обычно используемыми на метеостанциях, измеряющими температуру воздуха и относительную влажность, датчиками солнечной радиации, датчиками скорости и направления ветра, температуры поверхности почвы, фотосинтетически активной радиации (ФАР), количества атмосферных осадков.

Метеоданные передаются каждые 10 минут на сервер (периодичность опроса настраивается) и отображаются на специальном сайте. IoT АМС оснащена солнечной батареей и аккумулятором с высокой разрядной характеристикой и эксплуатационной устойчивостью, обеспечивающими полную автономность системы, а также направленной антенной для усиления сигнала мобильного 4G интернета в диапазоне частот 1 700–2 700 МГц при удалении станции от вышек оператора на 10 км.



**Рис. 2.** Архитектура передачи данных в сенсорной сети.

**Fig. 2.** Data transfer architecture in a sensor network.

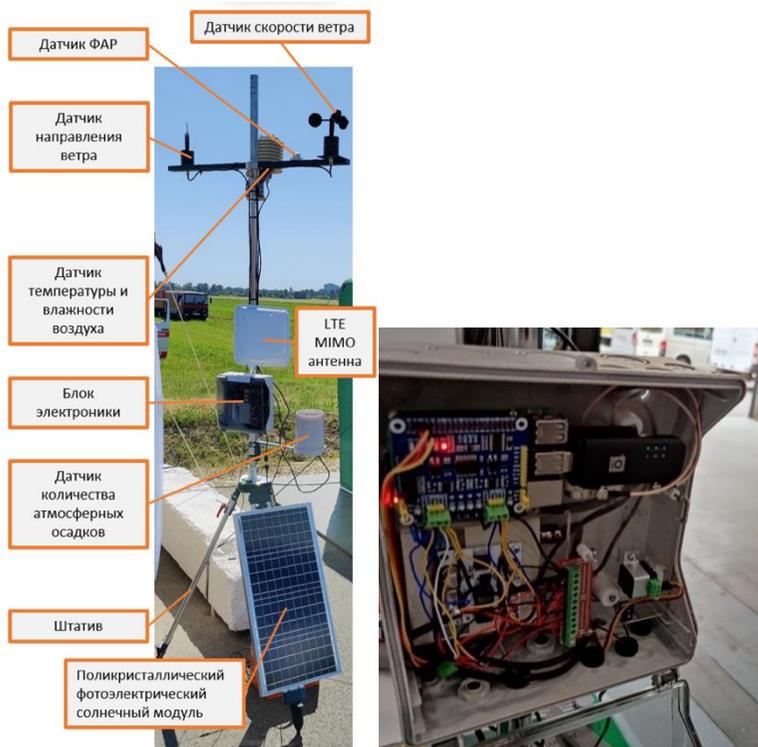
Основное преимущество системы заключается в том, что разработанная аппаратная и программная архитектура для регистрации, обработки и хранения данных позволяет подключать другие датчики, используя стандартные беспроводные (ZigBee, LoRa) или проводные интерфейсы (I<sup>2</sup>C, SDI-12, UART, RS-232 и RS-485) (рис. 3).

Экспериментальный образец сенсорного узла включает: скважинный влагомер почвы (двухканальный для пахотного слоя 0–20 см и/или пятиканальный для слоя 0–100 см), ZigBee-маршрутизатор ETRX357HR-LRS, микроконтроллер ADUC845, аккумулятор Delta DT 1218 и внешнюю антенну (рис. 3). Микроконтроллер ADUC845 при синхронизации от кварцевого резонатора 32.768 кГц достигает максимальной производительности 12.58 MIPS (млн инструкций в секунду), имеет 10 каналов ввода аналоговых сигналов и 24 цифровых входа, что вполне достаточно для работы в роли центрального контроллера СУ. В режиме бездействия между измерениями микроконвертор потребляет не более 20 мкА.

Часы реального времени на базе Maxim DS1307, подключенные к ADUC845 позволяют синхронизировать время выхода из режима покоя, управление реле, сбора и передачи данных СУ в сети.

Аккумулятор Delta DT 1218 емкостью 18 Ач позволяет снабжать СУ электропитанием в течение вегетационного периода без подзарядки, а также подключать к СУ различные датчики и устройства, требующие напряжение питания 12 В. Функционирование датчиков обеспечено стабилизацией напряжения +5В вне зависимости от заряда аккумулятора. ZigBee-модуль ETRX357 имеет выходную мощность 20 дБ, чувствительность -106 дБ и скорость передачи данных до 250 кБ/с. Для установки надежного беспроводного ZigBee соединения между СУ и координатором используется антенна Interline HORIZON (Польша) с диапазоном частот 2.4–2.5 ГГц, поддерживающая все общие стандарты IEEE 802.11 b/g/n, со встроенным пропускающим полосовым фильтром для ограничения помех, создаваемых другими передатчиками. Коэффициент усиления антенны – 7 дБ.

Для обработки и передачи данных координатор оснащен микрокомпьютером Raspberry Pi 3 Model B+ совместно с модулем расширения 2-Channel Isolated RS485 Expansion HAT, обеспечивающим подключение метеодатчиков.



**Рис. 3.** Структурная схема и блок электроники IoT АМС.  
**Fig. 3.** Block diagram and electronics block of IoT AMS.

Было предложено множество методик для увеличения времени автономной работы БСС и увеличения энергоэффективности рабочего цикла ([Borrero, Zabalo, 2020](#)). Как правило, они заключались в подборе электронных компонентов с низким энергопотреблением и в определении оптимального порядка выполнения рабо-

чего цикла и уходе в режим сна (или режим ожидания, или “сон” в кавычках). Для СУ разработан энергоэффективный рабочий цикл, позволяющий производить поочередный сбор и передачу данных (рис. 4).



**Рис. 4.** Порядок выполнения работы сенсорных узлов.

**Fig. 4.** Order of operation of the sensor nodes.

БСС может работать в различных полевых условиях, с учетом особенностей рельефа конкретного участка местности и погодных условиях. Каждый СУ обладает высокой надежностью и автономностью, а его компоненты характеризуются степенью герметизации, соответствующей индексу защиты IP65.

### 2.3. Анализ спутниковых данных

На первом этапе исследований было проведено уточнение почвенной карты тестового поля. В качестве основы была использована традиционно составленная почвенная карта хозяйства в масштабе 1 : 25 000, которая была создана и векторизована специалистами АФИ.

Контурная часть почвенной карты была детализирована на основе визуального анализа изображения открытой поверхности почв поля на спутниковых данных Sentinel-2. В качестве основы использовался синтез, состоящий из 3 каналов Sentinel-2 (1-й, 3-й и 5-й). Для надежности дешифрирования почв использовались

изображения открытой поверхности почв поля, полученные в два срока съемки (7 и 24 апреля 2019 г.).

Анализ неоднородностей посевов на тестовом поле проводился также по спутниковым данным Sentinel-2. Были отобраны все безоблачные сцены на тестовое поле, полученные с момента начала эксплуатации спутника (с 2015 г. до августа 2021 г.). Всего было отобрано 35 сцен (по одной – в 2015, 2016 и 2017 гг., 10 сцен – в 2018 г., 7 сцен – в 2019 г., 11 сцен – в 2020 г. и 4 сцены – в 2021 г.).

В 2015 г. на поле возделывалась яровая пшеница, в 2016 г. – картофель, в 2017 г. – яровой ячмень, в 2018 г. – яровая пшеница, в 2019 г. – картофель, в 2020 г. – яровой ячмень и в 2021 г. – яровая пшеница.

Предварительно была проведена атмосферная коррекция всех отобранных изображений с использованием алгоритма Sen2Cor в среде SNAP (<https://step.esa.int/main/toolboxes/snap/>).

После этого были вычислены значения NDVI для тестового поля для всех отобранных для анализа сцен. Индекс NDVI использовался в качестве индикатора неоднородностей растительности на тестовом поле, как это делается в системах точного земледелия и во многих исследованиях в области спутникового мониторинга посевов (Atzberger, 2013).

Сцены NDVI за разные сроки были совмещены с выделами уточненной карты почв. Рассчитывалось среднее значение NDVI для выделов почвенной карты и статистические параметры распределения NDVI в каждом выделе. Далее оценивалась статистическая значимость разницы среднего NDVI в выделах разных почв на поле.

Дополнительно проводился пространственный попарный корреляционный анализ значений NDVI на поле в разные даты съемки.

Анализ данных NDVI проводился с учетом неоднородностей, появляющихся на поле из-за его обработки в момент съемки или его разбивки на разные участки в разные годы. Данные анализировались для однородных по состоянию поля участков (распаханная часть, под сорняками или стерней, под посевами разных культур).

Полученные данные послужили основой для анализа пространственной устойчивости NDVI во времени, а также для оценки связи пространственного варьирования NDVI с почвами.

Анализ изображений Sentinel-2 проводился с использованием SNAP (<https://step.esa.int/main/toolboxes/snap/>). Результаты в виде карт NDVI импортировались в пакет прикладных программ ILWIS (<https://www.itc.nl/ilwis/>), в котором осуществлялся анализ связей индекса с почвенными выделами и корреляционный анализ.

Для статистического анализа данных использовался пакет программ Statistica v.6.0.

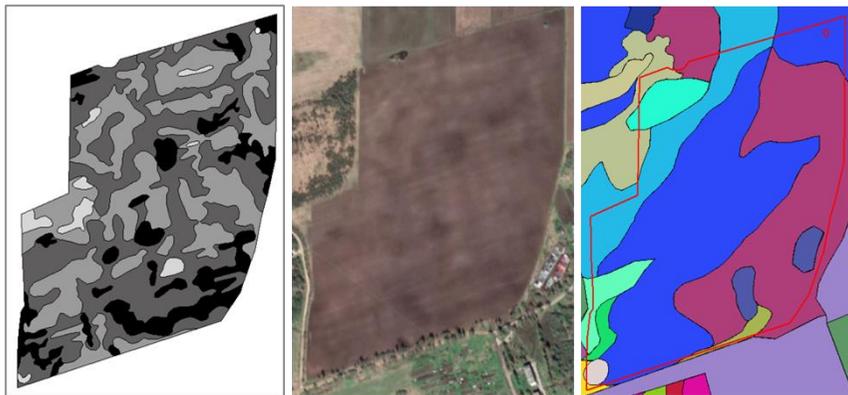
## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На рисунке 5 представлены результаты уточнения почвенной карты на территорию тестового поля. Полученная карта отличается большей детальностью. Это связано с тем, что на традиционных картах многие небольшие по площади неоднородности почвенного покрова генерализуются (Savin, 2019). Кроме того, при обновлении почвенной карты авторы опирались на неоднородности изображения открытой поверхности почв на космических снимках высокого разрешения.

Эти неоднородности на территории исследований связаны с гидроморфностью почв, различным содержанием в их пахотном горизонте гумуса и припахиванием нижележащих низкоплодородных почвенных горизонтов (A<sub>2</sub>, B) при небольшой мощности гумусового горизонта, то есть связаны с теми свойствами почв, которые во многом и определяют их плодородие.

Почва 1 на рисунке 5 – это разновидности почв с низким плодородием, невысоким содержанием гумуса в пахотном горизонте, с припахиванием нижележащих почвенных горизонтов, с наименьшим гидроморфизмом из всех почв поля. Почва 4 содержит больше всего гумуса в пахотном горизонте, она более плодородна, без припахивания нижележащих горизонтов, но одновременно и более гидроморфна. Почвы 2 и 3 являются промежуточными между почвами 1 и 4 по уровню плодородия и уровню гидроморфности. Таким образом, по уровню плодородия почвы поля ранжируются в следующий ряд по его возрастанию: почва 4 >

почва 3 > почва 2 > почва 1. Одновременно в этом же ряду наблюдается уменьшение степени гидроморфности почв.

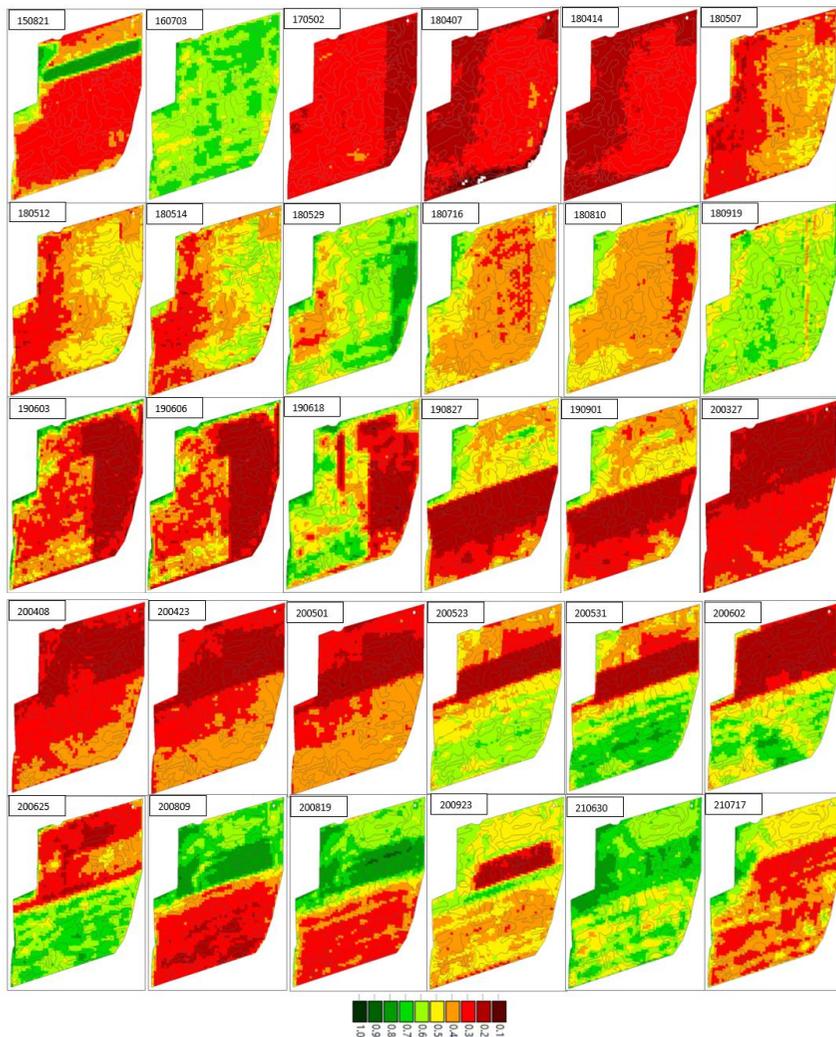


**Рис. 5.** Неоднородности почв тестового поля (слева) (светло-серый – почва 1, серый – почва 2, темно-серый – почва 3 и черный цвет – почва 4), их изображение на космическом снимке высокого разрешения (в центре) и контурная часть традиционно составленной почвенной карты (справа) (граница тестового поля показана красной линией).

**Fig. 5.** Soil heterogeneities of the test field (on the left) (light gray colour – soil 1, gray – soil 2, dark gray – soil 3, and black – soil 4), their visualization on the high-resolution satellite image (in the centre) and the contour part of the traditionally drawn soil map (on the right) (the boundary of the test field is shown with a red line).

Карты NDVI тестового поля, рассчитанные для разных сроков съемки, представлены на рисунке 6.

На карты наложены границы уточненной почвенной карты поля (серые линии). Сравнение карт между собой демонстрирует большую вариабельность величины NDVI на тестовом поле. Значения индекса меняются от 0.2–0.3 (для открытой поверхности почв) до 0.8–0.9 (для густых посевов в фазу их максимального развития). Даже карты NDVI, полученные с интервалом в несколько дней, различаются между собой.



**Рис. 6.** Изображения NDVI тестового поля, полученных в разные сроки съемки (формат даты YYMMDD).

**Fig. 6.** NDVI images of the test field obtained at different dates of acquisition (date format YYMMDD).

Чем больше разница во времени между получением спутниковых данных, тем менее похожи соответствующие карты NDVI между собой. Также визуально наблюдаются четкие различия между картами, полученными в разные годы.

На рисунке 7 представлены осредненные для 4 почв тестового поля значения NDVI для всех сроков спутниковой съемки (s1 соответствует почве 1, s2 – почве 2, s3 – почве 3 и s4 – почве 4 поля).



**Рис. 7.** Осредненные значения NDVI Sentinel-2 для отдельных почв поля за разные сроки съемки (в формате YYMMDD). Первая буква означает состояние поверхности поля; n – открытая поверхность почвы, p – культурная растительность, c – сорная растительность. Обозначение почв приведено в тексте статьи.

**Fig. 7.** Average values of Sentinel-2 NDVI for individual soils of the field for different survey periods (in YYMMDD format). The first letter indicates the state of the field surface; n – open soil surface, p – crop vegetation, c – weed vegetation). The designation of soils is given in the text of the article.

На наиболее плодородной почве 4 значения NDVI в среднем выше, чем на остальных почвах, и постепенно уменьшаются, достигая минимума на почве 1. Эта закономерность сохраняется для всех сроков съемки, когда на поле были посеы. Но интенсивность уменьшения и абсолютные величины NDVI в каждом случае различаются.

При открытой поверхности почв или в присутствии стерни разница NDVI между почвами статистически недостоверна. А при наличии на поверхности почв сорной растительности вышеописанная закономерность в большинстве случаев изменяется. Постепенное падение значений NDVI от почвы 4 к почве 3 и далее к почве 2 сменяется их ростом для почвы 1. Иногда значения NDVI на почве 1 превышают значения этого индекса на почве 4.

Результаты пространственного корреляционного анализа между картами NDVI тестового поля, построенные для разных сроков съемки, представлены в таблице 1.

Случаи высокой корреляции между картами NDVI разных лет практически отсутствуют (за исключением дат, когда поверхность поля была без растительности). Как правило, достаточно хорошо коррелируют между собой карты NDVI смежных сроков съемки. Присутствие случаев отрицательной корреляции обусловлено частичной обработкой поля в момент съемки.

Уровень корреляции между картами одного года также разный для разных лет. Так, наиболее высокая корреляция отмечается между картами 2020 г., меньше – в 2018 г. и еще меньше – в 2019 г.

Пространственные неоднородности NDVI на тестовом поле оказались гораздо более детальными, чем выделы традиционно составленной почвенной карты. Это подтверждает ранее сделанный вывод о том, что традиционная почвенная карта не отражает всех параметров плодородия почв, а только часть из них ([Савин, 2016](#)).

Поэтому использование обычной почвенной карты в качестве основы для планирования размещения датчиков IoT на поле вряд ли оправданно. Почвенная карта не отражает те неоднородности почвенного покрова, которые важны именно для растениеводства, так как она базируется на классификации почв, в основе которой лежат свойства почв, которые часто не важны для практических целей. Такие же проблемы могут возникнуть и при использовании почвенных карт с отражением структуры почвенного покрова ([Фридланд, 1972](#)).

**Таблица 1.** Пространственная корреляция между сценами NDVI тестового поля, полученными в разные даты съемки

**Table 1.** Spatial correlation between NDVI test field scenes acquired on different shooting dates

	150821	160703	170502	180407	180414	180507	180512	180514	180529	180716	180810	180919	190424	190603	190606	190618	190721	190827	190901	200327	200408	200423	200501	200523	200531	200602	200625	200809	200819	200923	210418	210511	210630	210717
150821	1	0.24	-0.19	-0.39	-0.2	0.09	0	0.09	0.21	0.54	0.33	-0.12	0.18	0.39	0.31	0.08	-0.28	0.64	0.58	0.09	0.09	0.01	0.05	-0.06	-0.04	-0.13	0.13	0.45	0.34	-0.02	0.11	0.43	0.22	0.34
160703	0.24	1	0.04	0.02	0.28	0.4	0.41	0.44	0.6	0.1	0.15	0.32	0.09	0.33	0.38	0.42	-0.21	0.31	0.33	0.31	0.4	0.4	0.39	0.31	0.28	0.13	0.38	-0.07	0.04	0.24	0.05	0.1	0.45	0.26
170502	-0.19	0.04	1	0.18	0.19	0.21	0.22	0.23	0.17	-0.12	-0.03	0.16	0.02	0.12	0.14	0.14	-0.02	0.03	0.08	0.07	0.17	0.2	0.19	0.21	0.18	0.19	0.07	-0.11	-0.14	0.1	-0.02	-0.08	-0.06	-0.17
180407	-0.39	0.02	0.18	1	0.46	0.28	0.33	0.3	0.25	-0.4	-0.11	0.27	-0.07	-0.06	0.02	0.14	0.36	-0.3	-0.22	-0.13	-0.04	0.11	0.19	0.25	0.24	0.1	0.1	-0.24	-0.17	0.06	-0.05	-0.13	-0.02	-0.18
180414	-0.2	0.18	0.19	0.46	1	0.61	0.7	0.67	0.56	-0.38	-0.1	0.34	-0.03	0.15	0.2	0.19	0.04	-0.02	0.05	0.14	0.23	0.32	0.33	0.28	0.29	0.21	0.18	-0.29	-0.13	0.22	-0.01	-0.09	0.13	-0.05
180507	0.09	0.4	0.21	0.28	0.61	1	0.72	0.72	0.67	-0.13	0.02	0.32	0.09	0.35	0.36	0.29	-0.13	0.25	0.28	0.19	0.32	0.37	0.42	0.32	0.3	0.26	0.26	-0.11	0	0.21	0.05	0.09	0.2	0.03
180512	0	0.41	0.22	0.33	0.7	0.72	1	0.81	0.71	-0.25	-0.03	0.38	0.07	0.3	0.34	0.31	-0.09	0.19	0.23	0.21	0.34	0.37	0.39	0.31	0.33	0.33	0.29	-0.2	-0.09	0.25	0.04	0.06	0.23	0.05
180514	0.09	0.44	0.23	0.3	0.67	0.72	0.81	1	0.76	-0.15	0.07	0.33	0.08	0.41	0.4	0.37	-0.12	0.31	0.33	0.19	0.36	0.4	0.38	0.34	0.32	0.33	0.32	-0.15	-0.01	0.27	0.07	0.1	0.3	0.15
180529	0.21	0.6	0.17	0.25	0.56	0.67	0.71	0.76	1	-0.05	0.33	0.36	0.13	0.51	0.52	0.5	-0.33	0.5	0.54	0.29	0.52	0.58	0.57	0.43	0.4	0.17	0.41	-0.16	-0.05	0.31	0.05	0.1	0.43	0.2
180716	0.54	0.1	-0.12	-0.4	-0.38	-0.13	-0.25	-0.15	-0.05	1	0.35	-0.12	0.17	0.41	0.4	0.29	-0.1	0.42	0.35	-0.02	0	-0.1	-0.17	-0.14	-0.22	-0.1	0.09	0.52	0.45	0.16	0.1	0.35	0.28	0.47
180810	0.33	0.15	-0.03	-0.11	-0.1	0.02	-0.03	0.07	0.33	0.35	1	0.04	0.18	0.52	0.49	0.4	-0.36	0.56	0.57	0.1	0.31	0.35	0.27	0.18	0.13	-0.19	0.14	0.07	0.07	0.17	0.05	0.16	0.19	0.15
180919	-0.12	0.32	0.16	0.27	0.34	0.32	0.38	0.33	0.36	-0.12	0.04	1	0.07	0.26	0.29	0.28	0.14	0.01	0.08	0.09	0.18	0.18	0.22	0.25	0.25	0.17	0.23	-0.12	0	0.19	0.02	0	0.16	0.04
190424	0.18	0.09	0.02	-0.07	-0.03	0.09	0.07	0.08	0.13	0.17	0.18	0.07	1	0.21	0.24	0.18	-0.08	0.19	0.21	0.03	0.11	0.14	0.12	0.07	0.07	0.03	0.09	0.09	0.09	0.07	0.03	0.15	0.12	0.11
190603	0.39	0.33	0.12	-0.06	0.15	0.35	0.3	0.41	0.51	0.41	0.52	0.26	0.21	1	0.79	0.56	-0.23	0.57	0.57	0.11	0.33	0.3	0.25	0.21	0.15	0.08	0.27	0.22	0.27	0.36	0.07	0.29	0.37	0.34
190606	0.31	0.38	0.14	0.02	0.2	0.36	0.34	0.4	0.52	0.4	0.49	0.29	0.24	0.79	1	0.68	-0.18	0.47	0.49	0.11	0.37	0.33	0.27	0.22	0.18	0.09	0.32	0.18	0.2	0.4	0.06	0.28	0.38	0.3
190618	0.08	0.42	0.14	0.14	0.19	0.29	0.31	0.37	0.5	0.29	0.4	0.28	0.18	0.56	0.68	1	-0.07	0.3	0.34	0.04	0.3	0.37	0.28	0.27	0.22	0.16	0.36	0.08	0.12	0.42	0.05	0.16	0.56	0.39
190721	-0.28	-0.21	-0.02	0.36	0.04	-0.13	-0.09	-0.12	-0.33	-0.1	-0.36	0.14	-0.08	-0.23	-0.18	-0.07	1	-0.53	-0.51	-0.43	-0.55	-0.46	-0.35	-0.11	-0.06	0.15	-0.01	0.16	0.21	-0.06	0.01	0.08	-0.07	0.08
190827	0.64	0.31	0.03	-0.3	-0.02	0.25	0.19	0.31	0.5	0.42	0.56	0.01	0.19	0.57	0.47	0.3	-0.53	1	0.87	0.3	0.45	0.39	0.31	0.2	0.18	0.02	0.27	0.16	0.09	0.09	0.11	0.26	0.3	0.29
190901	0.58	0.33	0.08	-0.22	0.03	0.28	0.23	0.33	0.54	0.35	0.57	0.08	0.21	0.57	0.49	0.34	-0.51	0.87	1	0.3	0.5	0.51	0.43	0.33	0.31	0.12	0.28	0.07	-0.01	0.03	0.04	0.2	0.25	0.18
200327	0.09	0.31	0.07	-0.13	0.14	0.19	0.21	0.19	0.29	-0.02	0.1	0.09	0.03	0.11	0.11	0.04	-0.43	0.3	0.3	1	0.5	0.36	0.27	0.27	0.27	0.2	0.23	-0.28	-0.28	0.02	0	-0.16	0.07	-0.06
200408	0.09	0.4	0.17	-0.04	0.23	0.32	0.34	0.36	0.52	0	0.31	0.18	0.11	0.33	0.37	0.3	-0.55	0.45	0.5	0.5	1	0.62	0.45	0.39	0.4	0.19	0.29	-0.29	-0.28	0.13	-0.02	-0.11	0.21	-0.03
200423	0.01	0.4	0.2	0.11	0.32	0.37	0.37	0.4	0.58	-0.1	0.35	0.18	0.14	0.3	0.33	0.37	-0.46	0.39	0.51	0.36	0.62	1	0.69	0.58	0.55	0.24	0.31	-0.39	-0.39	0.05	-0.04	-0.15	0.18	-0.12
200501	0.05	0.39	0.19	0.33	0.42	0.39	0.38	0.57	-0.17	0.27	0.22	0.12	0.25	0.27	0.28	-0.35	0.31	0.43	0.27	0.45	0.69	1	0.6	0.58	0.21	0.32	-0.37	-0.38	-0.02	-0.04	-0.1	0.12	-0.18	
200523	-0.06	0.31	0.21	0.25	0.28	0.32	0.31	0.34	0.43	-0.14	0.18	0.25	0.07	0.21	0.22	0.27	-0.11	0.2	0.33	0.27	0.39	0.58	0.6	1	0.74	0.49	0.55	-0.41	-0.45	-0.16	-0.12	-0.17	0.07	-0.21
200531	-0.04	0.28	0.18	0.24	0.29	0.3	0.33	0.32	0.4	-0.22	0.13	0.25	0.07	0.15	0.18	0.22	-0.06	0.18	0.31	0.27	0.4	0.55	0.58	0.74	1	0.53	0.63	-0.51	-0.56	-0.24	-0.09	-0.17	0.03	-0.23
200602	-0.15	0.13	0.19	0.1	0.21	0.26	0.33	0.33	0.37	-0.1	-0.19	0.17	0.03	0.08	0.09	0.16	0.15	0.02	0.12	0.2	0.19	0.24	0.21	0.49	0.53	1	0.44	-0.3	-0.19	-0.14	-0.06	-0.09	0.01	-0.1
200625	0.13	0.38	0.07	0.1	0.18	0.26	0.29	0.31	0.41	0.09	0.14	0.23	0.09	0.27	0.32	0.36	0.01	0.27	0.28	0.23	0.29	0.31	0.32	0.55	0.63	0.44	1	0.23	0.25	-0.12	-0.07	-0.05	0.27	0.15
200809	0.45	-0.07	-0.11	-0.24	-0.19	-0.11	-0.2	-0.15	-0.16	0.52	0.07	-0.12	0.09	0.22	0.18	0.08	0.16	0.16	0.07	-0.28	-0.29	-0.39	-0.37	-0.41	-0.51	-0.3	-0.23	1	0.27	0.25	0.13	0.49	0.2	0.42
200819	0.34	0.04	-0.14	-0.17	-0.13	0	-0.09	-0.01	-0.05	0.45	0.07	0	0.09	0.27	0.2	0.12	0.09	-0.01	-0.28	-0.28	-0.39	-0.38	-0.45	-0.56	-0.29	-0.25	0.7	1	0.37	0.19	0.45	0.26	0.51	
200923	-0.02	0.24	0.1	0.06	0.22	0.21	0.25	0.27	0.31	0.16	0.17	0.19	0.07	0.36	0.4	0.42	-0.06	0.09	0.03	0.02	0.13	0.05	-0.02	-0.16	-0.24	-0.14	0.12	0.25	0.37	1	0.14	0.17	0.48	0.4
210418	0.11	0.05	-0.02	-0.05	-0.01	0.05	0.04	0.07	0.05	0.1	0.05	0.02	0.03	0.07	0.06	0.05	0.01	0.11	0.04	0	-0.02	-0.04	-0.04	-0.12	-0.09	-0.06	-0.07	0.13	0.19	0.14	1	0.32	0.07	0.13
210511	0.43	0.1	-0.08	-0.13	-0.09	0.09	0.06	0.1	0.1	0.35	0.16	0	0.15	0.29	0.28	0.16	0.08	0.26	0.2	-0.16	-0.11	-0.15	-0.1	-0.17	-0.17	-0.09	-0.05	0.49	0.45	0.17	0.32	1	0.22	0.3
210630	0.22	0.45	-0.06	-0.02	0.13	0.2	0.23	0.3	0.43	0.28	0.19	0.16	0.12	0.37	0.38	0.56	0.07	0.3	0.25	0.07	0.21	0.18	0.12	0.07	0.03	0.01	0.27	0.2	0.26	0.48	0.07	0.22	1	0.7
210717	0.34	0.26	-0.17	-0.18	-0.05	0.03	0.05	0.15	0.2	0.47	0.15																							

На этих картах предпринимается попытка отразить особенности пространственного микроразнообразия почв, но при этом остается проблема базирования на классификации почв и появляется проблема неопределенности пространственной локализации элементарных почвенных ареалов, которые на карте показываются в виде почвенных комбинаций.

С учетом специфики преобладающих на тестовом поле почв (сильное варьирование гидроморфности почв, небольшая исходная мощность гумусового горизонта, наличие участков с припаханными нижележащими горизонтами) более точно отразить пространственные неоднородности почвенного плодородия можно путем коррекции (детализации и уточнения границ) традиционно составленной почвенной карты на основе анализа изображения открытой поверхности пашни по данным дистанционного зондирования. Выявленные выделы не всегда соответствуют классификационным выделам почв, но они более точно отражают пространственное варьирование именно тех свойств почв, которые предопределяют их плодородие.

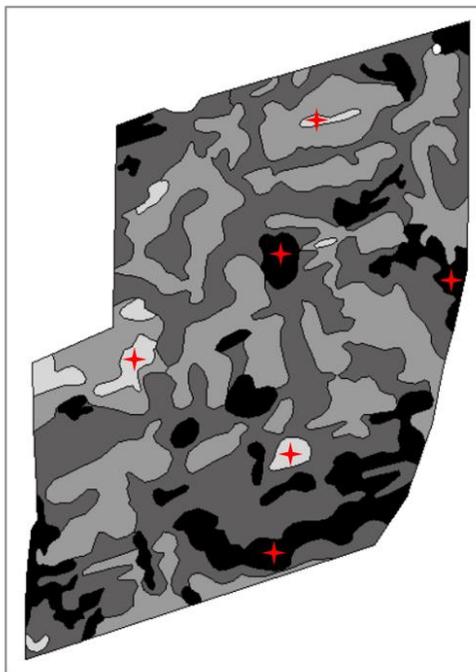
Это полностью подтвердилось анализом карт NDVI, полученных по данным Sentinel-2 в разные сроки съемки и в разные годы. Полученные данные показывают, что при наличии на поле в момент съемки посевов наблюдается устойчивая закономерность более высоких значений NDVI (большей надземной фитомассы) на наиболее плодородных почвах поля и их более низких значений в ареалах самых низкоплодородных почв. Выраженность этой закономерности варьирует в зависимости от вида возделываемых культур, стадии их развития и, по всей вероятности, от метеорологических условий года. После уборки или перед посевом культуры на поле появляется сорная растительность. Причем в отдельные годы много ее появляется и на самых неплодородных почвах поля, что, вероятно, связано с их более благоприятным режимом увлажнения при общем избытке влаги в почвах поля.

Анализ результатов пространственной корреляции между картами NDVI показывает, что для большинства возделываемых культур схожи друг с другом лишь карты NDVI соседних сроков съемки. Даже для одной культуры в разные фазы развития карты могут быть очень разными, не говоря о картах для разных культур

(рис. 7). Из этого можно заключить, что отдельное изображение NDVI (по одному сроку обследования) не может быть использовано в качестве основы для планирования размещения датчиков IoT. И даже серии изображений не позволяют однозначно выделить зоны с постоянными экстремумами NDVI, как это предлагается делать, например, в некоторых работах ([Brummel, Daniel, 2019](#); [Corti et al., 2020](#)). Прежде всего, это связано с тем, что разные культуры в разных метеоусловиях имеют различную толерантность к изменениям свойств почв и по-разному реагируют в разные фазы развития на пространственные неоднородности почв. Кроме того, на величину NDVI на поле, помимо почвенного плодородия, могут оказывать влияние и многие другие факторы (пространственное распространение сорняков, неоднородности применения удобрений и средств защиты растений в прошлые и в текущий сезоны, особенности и периодичность обработок почвы и посевов, пространственное варьирование заделки семян при севе, спектральный облик поверхности почв и др.) ([Савин и др., 2020](#); [Prudnikova et al., 2019](#)). Это подтверждается и полученными нами данными (см. рис. 7).

Таким образом, по результатам наших исследований можно сделать вывод о том, что ни традиционно составленная почвенная карта, ни карта NDVI и их временные серии не являются надежным источником данных о пространственном варьировании агрономически важных свойств почв на тестовом поле и не могут быть использованы в качестве основы для планирования размещения датчиков IoT. В качестве альтернативы представляется возможным использовать для этой цели карты пестроты плодородия почв поля, уточненные по данным дистанционного зондирования высокого разрешения. Так, например, на тестовом поле представляется оптимальным размещение нескольких датчиков (минимум 1) на самых плодородных участках поля и на самых низкоплодородных почвах. Пример подобного размещения показан на рисунке 8, где запланировано размещение датчиков в 3-кратной повторности.

В результате подобного размещения информация с датчиков может быть достаточно просто интерполирована на все поле.



**Рис. 8.** Предлагаемая схема размещения датчиков IoT на тестовом поле (красные звездочки).

**Fig. 8.** Proposed layout of IoT sensors on the test field (red asterisks).

Подобные подходы могут быть использованы на любом поле. Но методы обновления и уточнения почвенной карты под эти цели должны быть предварительно адаптированы, так как их специфика зависит во многом от структуры почвенного покрова поля, региона его расположения, метеоусловий, набора возделываемых культур и агротехники их возделывания.

## ВЫВОДЫ

Традиционно составленная почвенная карта не может являться основой для планирования размещения на поле датчиков IoT.

Отдельные сцены NDVI, полученные по данным дистанционного зондирования, а также их наборы, полученные в разные сроки и даже в разные годы, также не могут быть использованы в качестве надежной основы для планирования размещения на поле датчиков IoT.

Оптимальным выглядят подходы, основанные на картах пестроты плодородия почв полей, являющихся результатом доработки, обновления и уточнения традиционно составленных почвенных карт на основе данных дистанционного зондирования высокого или сверхвысокого разрешения.

Но эффективность этого подхода может варьировать в связи со спецификой почвенного покрова поля, региона его расположения, метеоусловий, набора возделываемых культур и агротехники их возделывания.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ведомственный проект “Цифровое сельское хозяйство”: официальное издание. М.: ФГБНУ “Росинформагротех”, 2019. 48 с.
2. Железова С.В. Научно-методическое обоснование технологий точного и ресурсосберегающего земледелия для зерновых культур в Нечерноземной зоне РФ: Дис. ... докт. с.-х. наук. М.: РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева, 2020. 415 с.
3. Иванов А.Л., Козубенко И.С., Савин И.Ю., Кирюшин В.И. Цифровое земледелие // Вестник российской сельскохозяйственной науки. 2018. № 5. С. 4–9.
4. Савин И.Ю. Классификация почв и земледелие // Бюллетень Почвенного института им. В.В. Докучаева. 2016. Вып. 84. С. 3–9. DOI: [10.19047/0136-1694-2016-84-3-9](https://doi.org/10.19047/0136-1694-2016-84-3-9).
5. Савин И.Ю., Савенкова Е.В., Кучер Д.Е., Тутукова Д.А., Бербеков С.А. Оценка контрастности почвенного покрова пахотных угодий по спутниковым данным Sentinel-2 // Почвоведение. 2021. № 11. С. 1295–1305.
6. Савин И.Ю., Шишконокова Е.А., Прудникова Е.Ю., Виндекер Г.В., Грубина П.Г., Шарычев Д.В., Щепотьев В.Н., Вернюк Ю.И., Жоголев А.В. О влиянии засоренности посевов озимой пшеницы на их спектральную отражательную способность // Сельскохозяйственная биология. 2020. Т. 55. № 1. С. 53–65.
7. Фридланд В.М. Структура почвенного покрова. М.: Мысль, 1972. 424 с.

8. *Atzberger C.* Advances in remote sensing of agriculture: Context description, Existing operational monitoring systems and Major information needs // Remote Sensing. 2013. Vol. 5(2). P. 949–981. DOI: [10.3390/rs5020949](https://doi.org/10.3390/rs5020949).
9. *Borrero J.D., Zabalo A.* An autonomous wireless device for real-time monitoring of water needs // Sensors (Switzerland). 2020. Vol. 20(7). 2078.
10. *Brummel D.* Delineation of NDVI-based soil management zones: Applications of UAS technology // Graduate Theses and Dissertations. 2019. 16977. URL: <https://lib.dr.iastate.edu/etd/16977>.
11. *Chepuri S.P., Leus G.* Continuous sensor placement // IEEE Signal Process. Lett. 2015. Vol. 22. No. 5. P. 544–548.
12. *Cohen K., Seigel S., McLaughlin T.* A heuristic approach to effective sensor placement for modelling a cylindrical wake // Comput. Fluids. 2006. Vol. 35. No. 1. P. 103–120.
13. *Corti M., Marino Gallina P., Cavalli D., Ortuani B., Cabassi G., Cola G., Vigoni A., Degano L., Bregaglio S.* Evaluation of In-Season Management Zones from High-Resolution Soil and Plant Sensors // Agronomy. 2020. Vol. 10. 1124. DOI: [10.3390/agronomy10081124](https://doi.org/10.3390/agronomy10081124).
14. E-agriculture in action, Bangkok: FAO-ITU, 2017. 118 p.
15. *Elijah O., Rahman T.A., Orikumhi I., Leow C.Y., Hindia M.N.* An Overview of Internet of Things (IoT) and Data Analytics in Agriculture: Benefits and Challenges // IEEE Internet of Things Journal. 2018. Vol. 5. No. 5. P. 3758–3773. DOI: [10.1109/JIOT.2018.2844296](https://doi.org/10.1109/JIOT.2018.2844296).
16. *Gupta H.P., Tyagi P.K., Singh M.P.* Regular node deployment for coverage in connected wireless networks // IEEE Sensors Journal. 2015. Vol. 15. No. 12. P. 7126–7134.
17. ILWIS. Программный продукт. URL: <https://www.itc.nl/ilwis/>.
18. *Jamali-Rad H., Seimonetto A., Leus G.* Sparsity-aware sensor selection: Centralized and distributed algorithms // IEEE Signal Process. Lett. 2014. Vol. 21. No. 2. P. 217–220.
19. *Jiang C., Soh Y.C., Li H.* Sensor placement by maximal projection on minimum eigenspace for linear inverse problems // IEEE Trans. Signal Process. 2016. Vol. 64. No. 21. P. 5595–5610.
20. *Kaiwartya O., Abdullah A., Cao Y., Rao R.S., Kumar S., Lobiyal D.K., Isnin I.F., Liu X., Shah R.R.* T-MQM: Testbed Based Multi-Metric Quality Measurement of Sensor Deployment for Precision Agriculture-A Case Study // IEEE Sensors Journal. 2016. Vol. 16 (23). P. 8649–8664. DOI: [10.1109/jsen.2016.2614748](https://doi.org/10.1109/jsen.2016.2614748).
21. *Maloku D., Balogh P., Bai A., Gabnai Z., Lengyel P.* Trends in scientific research on precision farming in agriculture using science mapping method // International Review of Applied Sciences and Engineering IRASE. 2020. Vol.

- 11 (3). P. 232–242. DOI: [10.1556/1848.2020.00086](https://doi.org/10.1556/1848.2020.00086).
22. *Manohar K., Brunton B.N., Kutz J.N., Brunton S.L.* Data-driven sparse sensor placement for reconstruction // *IEEE Control Syst. Mag.* 2018. Vol. 38. No. 3. P. 63–86.
23. *Morais R., Mendes J., Silva R., Silva N., Sousa J., Peres E.A.* Versatile, Low-Power and Low-Cost IoT Device for Field Data Gathering in Precision Agriculture Practices // *Agriculture.* 2021. Vol. 11. 619.
24. *Naeem M., Xue S., Lee D.* Cross-entropy optimization for sensor selection problems // *Proc. 9<sup>th</sup> Int. Symp. Commun. Inf. Technol.* 2009. P. 396–401.
25. *Patrício D.I., Rieder R.* Computer vision and artificial intelligence in precision agriculture for grain crops: A systematic re-view // *Comput. Electron. Agric.* 2018. Vol. 153. P. 69–81.
26. *Placidi P., Morbidelli R., Fortunati D., Papini N., Gobbi F., Scorzoni A.* Monitoring Soil and Ambient Parameters in the IoT Precision Agriculture Scenario: An Original Modeling Approach Dedicated to Low-Cost Soil Water Content Sensors // *Sensors.* 2021. Vol. 21. 5110. DOI: [10.3390/s21155110](https://doi.org/10.3390/s21155110).
27. *Prudnikova E., Savin I., Vindeker G., Grubina P., Shishkonakova E., Sharychev D.* Influence of Soil Background on Spectral Reflectance of Winter Wheat Crop Canopy // *Remote Sens.* 2019. Vol. 11. 1932. DOI: [10.3390/rs11161932](https://doi.org/10.3390/rs11161932).
28. *Rebai M., Snoussi H., Hnaïen F., Khoukhi L.* Sensor deployment optimization methods to achieve both coverage and connectivity in wireless sensor networks // *Comput. Oper. Res.* 2015. Vol. 59. P. 11–21.
29. *Sakai K., Sun M.T., Ku W.S., Lai T.H., Vasilakos A.V.* A framework for the optimal k-coverage deployment patterns of wireless sensors // *IEEE Sensors J.* 2015. Vol. 15. No. 12. P. 7273–7283.
30. *Savin I.Yu.* The scale problem in modern soil mapping // *Dokuchaev Soil Bulletin.* 2019. Vol. 97. P. 5–20. DOI: [10.19047/0136-1694-2019-97-5-20](https://doi.org/10.19047/0136-1694-2019-97-5-20).
31. *Shafi U., Mumtaz R., García-Nieto J., Hassan S.A., Zaidi S.A.R., Iqbal N.* Precision Agriculture Techniques and Practices: From Considerations to Applications // *Sensors.* 2019. Vol. 19. 3796.
32. *Shamiah M., Banarjee S., Vikalo H.* Greedy sensor selection: Leveraging submodularity // *Proc. 49th IEEE Conf. Decis. Control.* 2010. P. 2572–2577.
33. *Shen X., Varshney P.K.* Sensor selection based on generalized information gain for target tracking in large sensor networks // *IEEE Trans. Signal Process.* 2014. Vol. 62. No. 2. P. 363–375.
34. STEP. Программный продукт. URL: <https://step.esa.int/main/toolboxes/snap/>.
35. University of Nebraska information letter. URL: <https://cropwatch.unl.edu/documents/On-the-Go%20Vehicle-Based%20Soil%20Sensors%20-%20EC178.pdf>.

36. Visalini K., Subathra B., Srinivasan S., Palmieri G., Bekiroglu K., Thiyaku S. Sensor Placement Algorithm with Range Constraints for Precision Agriculture // IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine. 2019. Vol. 34(6). P. 4–15. DOI: [10.1109/maes.2019.2921177](https://doi.org/10.1109/maes.2019.2921177).
37. Viscarra Rossel R.A., Bouma J. Soil sensing: A new paradigm for agriculture // Agricultural Systems. 2016. Vol. 148. P. 71–74. DOI: [10.1016/j.agsy.2016.07.001](https://doi.org/10.1016/j.agsy.2016.07.001).

## REFERENCES

1. *Vedomstvennyj proekt “Cifrovoe sel'skoe hozyajstvo”*: oficial'noe izdanie (Departmental project “Digital Agriculture”: official publication), Moscow: FGBNU “Rosinformagrotekh”, 2019, 48 p.
2. Zhelezova S.V., *Nauchno-metodicheskoe obosnovanie tekhnologij tochnogo i resursosberegayushchego zemledeliya dlya zernovyh kul'tur v Nechernozemnoj zone RF: Diss. ... dokt. s.-kh. nauk* (Scientific and methodological substantiation of precision and resource-saving farming technologies for grain crops in the Non-Chernozem zone of the Russian Federation: Dr. agric. sci. thesis), Moscow: RGAU-MSKHA im. K.A. Timiryazeva, 2020. 415 p.
3. Ivanov A.L., Kozubenko I.S., Savin I.Yu., Kiryushin V.I., Cifrovoe zemledelie (Digital agriculture), *Vestnik rossijskoj sel'skohozyajstvennoj nauki*, 2018, No. 5, pp. 4–9.
4. Savin I.Yu., The Classification of Soils and Agriculture, *Dokuchaev Soil Bulletin*, 2016, Vol. 84, pp. 3–9, DOI: [10.19047/0136-1694-2016-84-3-9](https://doi.org/10.19047/0136-1694-2016-84-3-9).
5. Savin I. Yu., Savenkova E.V., Kucher D.E., Tutukova D.A., Berbekov S.A., Ocenka kontrastnosti pochvennogo pokrova pahotnyh ugodij po sputnikovym dannym Sentinel-2 (Estimation of soil cover contrast in arable lands using Sentinel-2 satellite data), *Pochvovedenie*, 2021, No. 11, pp. 1295–1305.
6. Savin I.Yu., Shishkonakova E.A., Prudnikova E.Yu., Vindeker G.V., Grubina P.G., Sharychev D.V., Shchepot'ev V.N., Vernyuk Yu.I., Zhogolev A.V., O vliyanii zasorennosti posevov ozimoj pshenicy na ih spektral'nyu otrazhatel'nyu sposobnost' (On the influence of weed infestation of winter wheat crops on their spectral reflectivity), In: *Sel'skohozyajstvennaya biologiya (Agricultural biology)*, 2020, Vol. 55, No. 1, pp. 53–65.
7. Fridland V.M., *Struktura pochvennogo pokrova* (The structure of the soil cover), Moscow: Mysl', 1972, 424 p.
8. Atzberger C., Advances in Remote Sensing of Agriculture: Context Description, Existing Operational Monitoring Systems and Major Information

- Needs, *Remote Sensing*, 2013, Vol. 5(2), pp. 949–981, DOI: [10.3390/rs5020949](https://doi.org/10.3390/rs5020949).
9. Borrero J.D., Zabalo A., An autonomous wireless device for real-time monitoring of water needs, *Sensors (Switzerland)*, 2020, Vol. 20(7), 2078.
10. Brummel D., Delineation of NDVI-based soil management zones: Applications of UAS technology, *Graduate Theses and Dissertations*, 2019, 16977. URL: <https://lib.dr.iastate.edu/etd/16977>.
11. Chepuri S.P., Leus G., Continuous sensor placement, *IEEE Signal Process. Lett.*, 2015, Vol. 22, No. 5, pp. 544–548.
12. Cohen K., Seigel S., McLaughlin T., A heuristic approach to effective sensor placement for modelling a cylindrical wake, *Comput. Fluids*, 2006, Vol. 35, No. 1, pp. 103–120.
13. Corti M., Marino Gallina P., Cavalli D., Ortuani B., Cabassi G., Cola G., Vigoni A., Degano L., Bregaglio S., Evaluation of In-Season Management Zones from High-Resolution Soil and Plant Sensors, *Agronomy*, 2020, Vol. 10, 1124, DOI: [10.3390/agronomy10081124](https://doi.org/10.3390/agronomy10081124).
14. E-agriculture in action, Bangkok: FAO-ITU, 2017, 118 p.
15. Elijah O., Rahman T.A., Orikumhi I., Leow C.Y., Hindia M.N., An Overview of Internet of Things (IoT) and Data Analytics in Agriculture: Benefits and Challenges, *IEEE Internet of Things Journal*, 2018, Vol. 5, No. 5, pp. 3758–3773, DOI: [10.1109/JIOT.2018.2844296](https://doi.org/10.1109/JIOT.2018.2844296).
16. Gupta H.P., Tyagi P.K., Singh M.P., Regular node deployment for coverage in connected wireless networks, *IEEE Sensors Journal*, 2015, Vol. 15, No. 12, pp. 7126–7134.
17. ILWIS software. URL: <https://www.itc.nl/ilwis/>.
18. Jamali-Rad H., Seimonetto A., Leus G., Sparsity-aware sensor selection: Centralized and distributed algorithms, *IEEE Signal Process. Lett.*, 2014, Vol. 21, No. 2, pp. 217–220.
19. Jiang C., Soh Y.C., Li H., Sensor placement by maximal projection on minimum eigenspace for linear inverse problems, *IEEE Trans. Signal Process.*, 2016, Vol. 64, No. 21, pp. 5595–5610.
20. Kaiwartya O., Abdullah A., Cao Y., Rao R.S., Kumar S., Lobiyal D.K., Isnin I.F., Liu X., Shah R.R., T-MQM: Testbed Based Multi-Metric Quality Measurement of Sensor Deployment for Precision Agriculture-A Case Study, *IEEE Sensors Journal*, 2016, Vol. 16 (23), pp. 8649–8664, DOI: [10.1109/jsen.2016.2614748](https://doi.org/10.1109/jsen.2016.2614748).
21. Maluku D., Balogh P., Bai A., Gabnai Z., Lengyel P., Trends in scientific research on precision farming in agriculture using science mapping method, *International Review of Applied Sciences and Engineering IRASE*, 2020, Vol. 11 (3), pp. 232–242, DOI: [10.1556/1848.2020.00086](https://doi.org/10.1556/1848.2020.00086).
22. Manohar K., Brunton B.N., Kutz J.N., Brunton S.L., Data-driven sparse

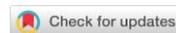
- sensor placement for reconstruction, *IEEE Control Syst. Mag.*, 2018, Vol. 38, No. 3, pp. 63–86.
23. Morais R., Mendes J., Silva R., Silva N., Sousa J., Peres E.A., Versatile, Low-Power and Low-Cost IoT Device for Field Data Gathering in Precision Agriculture Practices, *Agriculture*, 2021, Vol. 11, 619.
24. Naeem M., Xue S., Lee D., Cross-entropy optimization for sensor selection problems, *Proc. 9<sup>th</sup> Int. Symp. Commun. Inf. Technol.*, 2009, pp. 396–401.
25. Patrício D.I., Rieder R., Computer vision and artificial intelligence in precision agriculture for grain crops: A systematic re-view, *Comput. Electron. Agric.*, 2018, Vol. 153, pp. 69–81.
26. Placidi P., Morbidelli R., Fortunati D., Papini N., Gobbi F., Scorzoni A., Monitoring Soil and Ambient Parameters in the IoT Precision Agriculture Scenario: An Original Modeling Approach Dedicated to Low-Cost Soil Water Content Sensors, *Sensors*, 2021, Vol. 21, 5110, DOI: [10.3390/s21155110](https://doi.org/10.3390/s21155110).
27. Prudnikova E., Savin I., Vindeker G., Grubina P., Shishkonakova E., Sharychev D., Influence of Soil Background on Spectral Reflectance of Winter Wheat Crop Canopy, *Remote Sens.*, 2019, Vol. 11, 1932, DOI: [10.3390/rs11161932](https://doi.org/10.3390/rs11161932).
28. Rebai M., Snoussi H., Hnaïen F., Khoukhi L., Sensor deployment optimization methods to achieve both coverage and connectivity in wireless sensor networks, *Comput. Oper. Res.*, 2015, Vol. 59, pp. 11–21.
29. Sakai K., Sun M.T., Ku W.S., Lai T.H., Vasilakos A.V., A framework for the optimal k-coverage deployment patterns of wireless sensors, *IEEE Sensors Journal*, 2015, Vol. 15, No. 12, pp. 7273–7283.
30. Savin I.Yu., The scale problem in modern soil mapping, *Dokuchaev Soil Bulletin*, 2019, Vol. 97, pp. 5–20, DOI: [10.19047/0136-1694-2019-97-5-20](https://doi.org/10.19047/0136-1694-2019-97-5-20).
31. Shafi U., Mumtaz R., García-Nieto J., Hassan S.A., Zaidi S.A.R., Iqbal N. Precision Agriculture Techniques and Practices: From Considerations to Applications, *Sensors*, 2019, Vol. 19, 3796.
32. Shamiah M., Banarjee S., Vikalo H., Greedy sensor selection: Leveraging submodularity, *Proc. 49<sup>th</sup> IEEE Conf. Decis. Control.*, 2010, pp. 2572–2577.
33. Shen X., Varshney P.K., Sensor selection based on generalized information gain for target tracking in large sensor networks, *IEEE Trans. Signal Process.*, 2014, Vol. 62, No. 2, pp. 363–375.
34. STEP software. URL: <https://step.esa.int/main/toolboxes/snap/>.
35. University of Nebraska information letter. URL: <https://cropwatch.unl.edu/documents/On-the-Go%20Vehicle-Based%20Soil%20Sensors%20-%20EC178.pdf>.
36. Visalini K., Subathra B., Srinivasan S., Palmieri G., Bekiroglu K., Thiyaku S., Sensor Placement Algorithm with Range Constraints for Precision Agriculture, *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*, 2019, Vol.

34(6), pp. 4–15, DOI: [10.1109/maes.2019.2921177](https://doi.org/10.1109/maes.2019.2921177).

37. Viscarra Rossel R.A., Bouma J., Soil sensing: A new paradigm for agriculture, *Agricultural Systems*, 2016, Vol. 148, pp. 71–74, DOI: [10.1016/j.agry.2016.07.001](https://doi.org/10.1016/j.agry.2016.07.001).

УДК 631.4

DOI: 10.19047/0136-1694-2022-110-51-89



### Ссылки для цитирования:

Горохова И.Н., Панкова Е.И. Изменение мелиоративного состояния орошаемых земель в Волгоградской области за 2001–2018 годы // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2022. Вып. 110. С. 51-89. DOI: 10.19047/0136-1694-2022-110-51-89

### Cite this article as:

Gorokhova I.N., Pankova E.I., Changes in the rehabilitation status of irrigated lands in the Volgograd Oblast during 2001–2018, Dokuchaev Soil Bulletin, 2022, V. 110, pp. 51-89, DOI: 10.19047/0136-1694-2022-110-51-89

## Изменение мелиоративного состояния орошаемых земель в Волгоградской области за 2001–2018 годы

© 2022 г. И. Н. Горохова\*, Е. И. Панкова

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

\*<https://orcid.org/000-0002-0428-3330>, e-mail: [g-irina14@yandex.ru](mailto:g-irina14@yandex.ru).

Поступила в редакцию 21.03.2022, принята к публикации 24.05.2022

**Резюме:** Дана сравнительная оценка мелиоративного состояния орошаемых земель в Волгоградской области за 2001–2018 гг., которые расположены в разных природных районах. Установлено, что за указанный период произошли существенные изменения в мелиоративном состоянии орошаемых земель: резко сократилась общая площадь орошения с 2001 г. (-31%), особенно на местном стоке (-44.5%), понизился уровень грунтовых вод (уровень >5 м сохраняется на 78% площади) и на этом фоне сократились площади вторично засоленных почв (-3.9%). Основными проблемами на сегодня являются: наличие многолетней залежи и богарных земель, освоенных первоначально под орошение, отсутствие дренажа на большинстве оросительных системах (ОС) и значительные площади солонцеватых почв, требующих мелиорации. Различия природных условий во многом определили современное мелиоративное состояние орошаемых почв и интенсивность их изменения. Так, наибольшие площади вторично засоленных почв сохраняются на оросительных системах, расположенных на исходно сильнозасоленных, слабодренированных почвах Хвалынской глинистой

равнины (Палласовская, Светлоярская оросительные системы). Реконструкция ряда оросительных систем с участками вторично засоленных почв дала положительный результат, после которой вторично засоленные почвы на мелиорированных землях не отмечаются (Большая Волгоградская, Тажинская ОС). Значительные площади солонцеватых почв сохраняются на орошаемых землях, расположенных в ареалах распространения природных солонцов и каштановых, светло-каштановых солонцеватых почв – на юге Приволжской возвышенности (Городищенская ОС), в районе Северных Ергеней (Генераловская ОС) и на Хвалынской глинистой равнине (Палласовская и др. ОС). Собственные исследования на Волго-Донской ОС с привлечением дистанционной информации показали, что данная система отражает общие черты современного мелиоративного состояния орошаемых земель Волгоградской области – характерны залежные земли, отсутствие дренажа, распространены солонцеватые почвы. Использование мультиспектральных космических снимков высокого разрешения (Landsat-8, Sentinel-2) для обнаружения залежных и орошаемых в текущем сезоне земель демонстрирует возможность уточнения сведений по этой категории земель. Определение дистанционными методами распространения засоленных и солонцеватых почв на орошаемых землях Волгоградской области может осуществляться косвенно, по состоянию растительности, когда при выявлении на снимках участков с разреженным растительным покровом выбираются целенаправленные маршруты по изучению почв и отбору почвенных образцов.

**Ключевые слова:** оросительная система, площадь орошения, уровень грунтовых вод, засоление почв, солонцеватость почв.

## Changes in the rehabilitation status of irrigated lands in the Volgograd Oblast during 2001–2018

© 2022 I. N. Gorokhova\*, E. I. Pankova

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

*\* <https://orcid.org/000-0002-0428-3330>, e-mail: [g-irina14@yandex.ru](mailto:g-irina14@yandex.ru).*

*Received 21.03.2022, Accepted 24.05.2022*

**Abstract:** A comparative assessment of the rehabilitation status of irrigated lands, which are located in different natural areas of the Volgograd Oblast, is presented for 2001–2018. It was found that during the specified period there were recorded significant changes in the condition of irrigated lands: the total irrigation area has dramatically decreased since 2001 (-31%), especially at

local runoff (-44.5%), the groundwater level has decreased (the level >5 m remains on 78% of the area). Also on this background, the areas of secondary salinized soils were also decreased (-3.9%). The main problems at the present are: the presence of fallow lands and rain-fed lands initially cultivated for irrigation, the lack of drainage on the most of irrigation systems and significant areas of saline soils requiring rehabilitation. Differences in natural conditions have largely determined the current rehabilitation state of irrigated soils and the intensity of their changes. Thus, the largest areas of secondary saline soils are preserved on irrigation systems located on the initially highly saline, poorly drained soils of the Khvalyn clay plain (Pallasovka, Svetloyarsk irrigation systems). Reconstruction of a number of irrigation systems with areas of secondary saline soils gave a positive result, after which secondary saline soils on reclaimed lands were not detected (Large Volgograd, Tyazhin irrigation systems). Significant areas of saline soils can be found on irrigated lands in the distribution areas of natural saline soils and chestnut, light chestnut saline soils – in the south of the Volga Upland, in the area of the Northern Yergeni and on the Khvalyn clay plain (Gorodishyshe, Generalovskoye, Pallasovka, etc. irrigation systems). Inherent research on the Volga-Don irrigation system with the involvement of remote sensing data has shown that this system reflects the general features of the modern rehabilitation condition of irrigated lands of the Volgograd Oblast – fallow lands, lack of drainage, and widespread saline soils are specific for this area. The use of high-resolution multispectral satellite images (Landsat-8, Sentinel-2) for the purposes of detection of fallow and irrigated lands in the current season demonstrates the possibility of clarifying information on this category of land. The determination of the distribution of salinized and solonchic soils on irrigated lands of the Volgograd Oblast by remote methods can be carried out indirectly, i. e. according to the state of vegetation: when areas of sparse vegetation cover are being identified on images, targeted routes for soil surveys and soil sampling are selected.

**Keywords:** irrigation system, irrigation area, groundwater level, soil salinity, solonchicity of soils.

## ВВЕДЕНИЕ

В 2019 г. в журнале “Почвоведение” вышла статья ([Горохова, Панкова, 2019](#)), в которой анализировалось мелиоративное состояние орошаемых почв Волгоградской области за 2001–2015 гг., когда после экономического спада в России началось постепенное восстановление и начало функционирования большинства оросительных систем (ОС). Для того чтобы понять,

каков вектор дальнейших мелиоративных изменений на орошаемых землях, нами был проведен анализ данных, предоставленных Волгоградской гидрогеолого-мелиоративной партией (ВГМП) за 2018 г.<sup>1</sup>, лежащих в основе мелиоративного кадастра, а также результатов собственных исследований, которые проходили в Волгоградской области в 2020–2021 гг. на Волго-Донской ОС, позволившие подтвердить характер происходящих изменений. Отметим, что данные ВГМП для мелиоративных кадастров обобщаются на основе материалов, собранных на местах.

Орошение на территории Волгоградской области началось еще в дореволюционный период и площадь орошаемых земель в XIX веке составляла 8.7 тыс. га ([Приходько, 2012](#)). Широкое регулярное орошение стало развиваться в 50–60-х годах XX в. Пик ирригационного освоения отмечался в 1989 г., когда в орошение было вовлечено 345.2 тыс. га или 4.6% от площади сельскохозяйственных земель Волгоградской области ([Панкова, Новикова, 2004](#)). В 90-х годах, в связи с общей сложной экономической ситуацией в стране, площади орошаемых земель в области резко сократились. В 2001 г. они составили 259.4 тыс. га или 3.2% от площади сельскохозяйственных угодий, в 2015 г. осталось только около 179 тыс. га ([Панкова, Новикова, 2004](#); [Горохова, Панкова, 2019](#)). По данным ВГМП, в 2018 г. общая площадь орошаемых земель сохранилась на уровне 178.8 тыс. га.

На орошаемых землях Волгоградской области возделывают зерновые (пшеница, ячмень), однолетние (кукуруза на силос, суданка) и многолетние (люцерна) кормовые травы, технические (подсолнечник, горчица, рапс), овощные и бахчевые культуры.

Цель данной работы – анализ мелиоративной обстановки на ОС Волгоградской области за период 2001–2018 гг., по данным ВГМП и материалам собственных исследований, для установления направленности и причин изменений состояния орошаемых почв в регионе и выявление связи изменений с природными особенностями расположения ОС; рассмотрение примеров использо-

---

<sup>1</sup> Показатели по оценке и учету мелиоративного состояния орошаемых сельскохозяйственных угодий и технического состояния оросительных систем на 01.01.2019 г. ВГМП, 2019.

вания дистанционной информации для сбора сведений при составлении мелиоративного кадастра.

## ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Объектом исследований являются орошаемые земли Волгоградской области, расположенные в разных геоморфологических районах. Основные методы исследований: сравнительный анализ данных ВГМП за 2001–2018 гг. и полевые исследования (2020–2021 гг.) на территории Волго-Донской ОС с привлечением дистанционной информации. Для этого использовались космические снимки Landsat-8 и Sentinel-2 и такие приемы их обработки как сочетание разных каналов и классификация космических изображений.

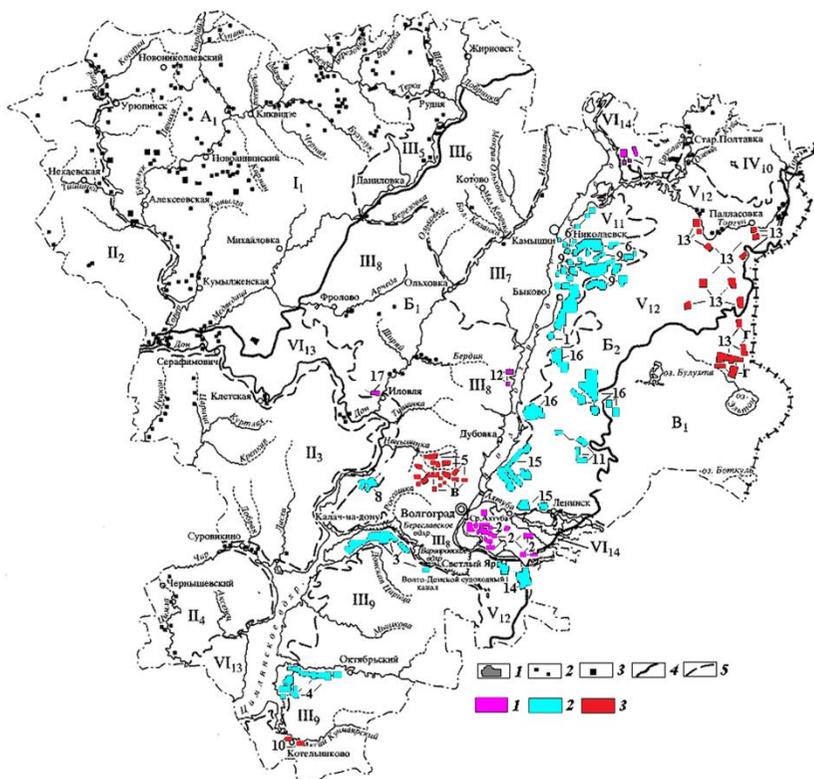
Орошаемые земли Волгоградской области расположены в различных природных условиях. В пределах области выделяются 4 почвенно-климатические зоны и провинции, а также 14 геоморфологических областей и районов. Почвенно-климатическое и геоморфологическое районирование (рис. 1) позволяет сгруппировать ОС в зависимости от их расположения и географии почв, согласно Почвенной карте Волгоградской области (М 1 : 400 000 под ред. Е.М. Цвылева, 1989).

На северо-западе Волгоградской области выделяется степная зона Южно-Русской провинции (**A<sub>1</sub>**), приуроченная, главным образом, к геоморфологической области Окско-Донской низменности (**I**) и частично – к областям Среднерусской (**II**) и Приволжской возвышенностей (району Медведицких яров (**III<sub>5</sub>**)). Для этой части Волгоградской области в почвенном покрове характерны черноземы южные (Haplicor Calcic Chernozems (Loamic)) и черноземы обыкновенные (Haplicor Calcic Chernozems (Loamic, Pachic)). Здесь расположились исключительно массивы орошения на местном стоке, детальные сведения о состоянии которых в мелиоративных кадастрах не приводятся и поэтому подробно в статье не рассматриваются.

Сухостепная зона Манычско-Донской провинции (**B<sub>1</sub>**), занимающая центральную часть Волгоградской области, разделена долиной р. Иловля и Цимлянским водохранилищем примерно пополам. Правобережье р. Иловли и Цимлянского водохранилища,

находящееся на Среднерусской (**II<sub>3</sub>**, **II<sub>4</sub>**) и Приволжской (**III<sub>6</sub>**, **III<sub>8</sub>**) возвышенностях, освоено под орошение на местном стоке, за исключением Иловлинского филиала (17), расположенного в южной части Приволжской возвышенности (**III<sub>8</sub>**) и возделываемого с 2015 г. Здесь распространены темно-каштановые (Haplic Kastanozems (Loamic)) и каштановые (Haplic or Someric Kastanozems (Loamic)) почвы.

Все государственные ОС (кроме Иловлинского филиала) сосредоточены в сухостепной (**B<sub>1</sub>**, **B<sub>2</sub>**) и полупустынной (**B<sub>1</sub>**) почвенно-климатических провинциях и в границах 6 геоморфологических районов левобережной части р. Иловли и Цимлянского водохранилища: на юге Приволжской возвышенности (**III<sub>8</sub>**) и возвышенности Северные Ергени (**III<sub>9</sub>**), на территории Прикаспийской низменности в районах Приволжской песчаной гряды (**V<sub>11</sub>**) и Хвалынской глинистой равнины (**V<sub>12</sub>**), в долинах рек Дона (**VI<sub>13</sub>**) и Волги (**VI<sub>14</sub>**). Наиболее благоприятными для орошения являются почвы Волго-Ахтубинской поймы (Волго-Ахтубинская ОС), где распространены аллювиально-луговые почвы (Eutric Stagnic Fluvisols (Loamic, Humic)). Самые сложные условия характерны для систем, расположенных на слабодренированной, бессточной Хвалынской глинистой равнине Прикаспийской низменности (**V<sub>12</sub>**) (Палласовская, Светлоярская, Ленинская ОС и др.). Здесь в орошение были вовлечены природно засоленные солонцовые почвы, которые отличаются комплексностью почвенного покрова, представленные каштановыми солонцеватыми почвами в комплексе с солонцами (Luvic Someric Kastanozems (Proto sodic, Endoprotosalic), Haplic Solonetz (Albic, Columnic, Cutanic, Differentic) и светло-каштановыми почвами (Eutric Cambisols (Loamic, Pro tocalcic, Ochric)) в комплексе с солонцами (Haplic Solonetz (Albic, Columnic, Cutanic, Differentic)). Ряд ОС, таких как Светлоярская (**V<sub>12</sub>**, **III<sub>9</sub>**) и Генераловская (**III<sub>9</sub>**, **VI<sub>13</sub>**), расположен сразу в двух геоморфологических районах (рис. 1).



**Рис. 1.** Схема почвенно-климатического и геоморфологического районирования и расположения ОС Волгоградской области (по материалам [Панковой, Новиковой, 2004](#)); комплексное мелиоративное и техническое состояние ОС в 2018 г., составленное по данным ВГМП.

**Fig. 1.** Scheme of soil-climatic and geomorphological zoning and location of irrigation systems of the Volgograd Oblast (based on the materials of [Pankova, Novikova, 2004](#)); complex reclamation and technical condition of irrigation systems in 2018, compiled according to the data performed by the VGMP.

**Примечание.** 1) Оросительные системы: 1. Б. Волгоградская; 2. Волго-Ахтубинская; 3. Волго-Донская; 4. Генераловская; 5. Городищенская; 6. Заволжская; 7. Иловатская; 8. Калачевская; 9. Кисловская; 10. Котельниковская; 11. Ленинская; 12. Оленевская; 13. Палласовская; 14. Светлоярская; 15. Среднеахтубинская; 16. Тажинская; 17. Иловлинский филиал.

2) Орошаемые массивы на местном стоке площадью до 200 га.  
3) Орошаемые массивы на местном стоке площадью 200–500 га.  
4) Границы и перечень природных (почвенно-климатических) зон и провинций: **A<sub>1</sub>** – степная зона, Южно-Русская провинция; **B<sub>1</sub>** – сухостепная зона, Манычско-Донская провинция; **B<sub>2</sub>** – сухостепная зона, Заволжская провинция; **B** – полупустынная зона, Прикаспийская провинция.  
5) Границы и перечень геоморфологических областей и районов. **I**. Окско-Донская низменность: **I<sub>1</sub>** – Хоперско-Бузулукская равнина. **II**. Среднерусская возвышенность: **II<sub>2</sub>** – Калачская возвышенность; **II<sub>3</sub>** – Восточно-Донская гряда; **II<sub>4</sub>** – Чирско-Цимлянская равнина. **III**. Приволжская возвышенность и Ергени: **III<sub>5</sub>** – возвышенность Медведицких яров; **III<sub>6</sub>** – возвышенное междуречье Медведицы и Иловли; **III<sub>7</sub>** – возвышенное правобережье Волги (междуречье Иловли-Волги); **III<sub>8</sub>** – южная часть Приволжской возвышенности; **III<sub>9</sub>** – возвышенность Северных Ергеней. **IV**. Низкое Сыртовое Заволжье: **IV<sub>10</sub>** – южная часть низкого Сыртового Заволжья. **V**. Каспийская низменность: **V<sub>11</sub>** – Приволжская песчаная гряда; **V<sub>12</sub>** – Хвалынская глинистая равнина. **VI**. Долины рек Дона и Волги: **VI<sub>13</sub>** – долина Дона; **VI<sub>14</sub>** – долина Волги. **Цветом показаны:** **1** – ОС, не требующая реконструкции и мелиорации почв; **2** – ОС, требующая мелиорации почв; **3** – ОС, требующая мелиорации почв и реконструкции коллекторно-дренажной сети.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На сегодняшний день на территории Волгоградской области находятся 17 ОС, которые относятся к государственным и площадь которых составляет 111.858 тыс. га, еще 66.82 тыс. га находятся на землях, орошаемых водами местного стока. Государственные ОС расположены в следующих геоморфологических районах: 1) Хвалынской глинистой равнины и Приволжской песчаной гряды Прикаспийской низменности; 2) Приволжской возвышенности и Ергенях; 3) в долинах рек Волги и Дона.

Орошаемые земли на местном стоке расположены на Хоперско-Бузулукской равнине, Калачской возвышенности, Восточно-Донской гряде и возвышенности Медведицких яров.

Как отмечалось выше, площади орошаемых земель в Волгоградской области, начиная с конца XX в., неуклонно сокращались. В последние два десятилетия ситуация выглядит следующим образом: площади с 2001 г. по 2018 г. сократились на 31%, и макси-

мальное сокращение произошло на Иловатской (88.8%), Котельниковской (49.2%), Заволжской (40.5%) ОС, но сокращение не связано с природными особенностями их расположения, т. к. все системы расположены в разных геоморфологических районах, а вызвано плохим техническим состоянием ОС и социально-экономическими условиями данных территорий. Орошение на местном стоке с 2001 г. сократилось на 44.5%.

В настоящее время ситуация с орошаемыми землями в Волгоградской области стабилизировалась и сокращение площадей с 2015 г. прекратилось (табл. 1).

**Таблица 1.** Площади орошаемых земель Волгоградской области в 2001–2018 гг. (по данным ВГМП)

**Table 1.** The area of irrigated lands of the Volgograd region in 2001–2018 (according to the VHMP)

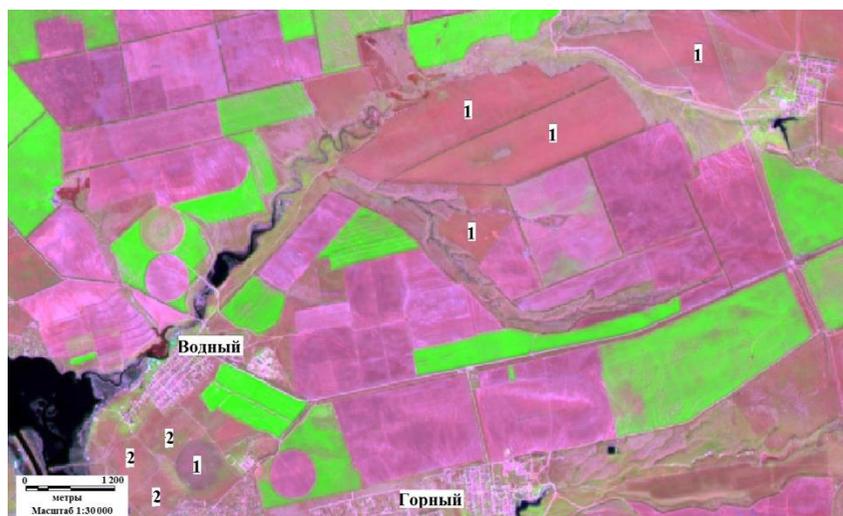
Вид орошения	Площадь орошения в 2001 г., га	Площадь орошения в 2015 г., га	Площадь орошения в 2018 г., га	Изменения за 2001–2015 гг.		Изменения за 2015–2018 гг.	
				га	%	га	%
Общая площадь	259166	178840	178840	-80326	-31	0	0
Государственные системы	138474	111858	111858	-26616	-19.2	0	0
Местный сток	120692	66982	66982	-53710	-44.5	0	0

Значительная часть сократившихся земель под орошение стала разновозрастной залежью. Определить точную площадь залежи можно только с помощью дистанционного мониторинга, который в настоящее время самостоятельно на орошаемых землях не ведется.

Наши собственные исследования в Волгоградской области подтверждают наличие существенных площадей залежных земель, а также возможность по дистанционной информации выделять залежные земли. На рисунке 2 приведены результаты обработки космического изображения со спутника Landsat-8 (04.04.2020) для

центральной части Волго-Донской ОС, где с использованием сочетания разных каналов была выделена разновозрастная залежь.

Следует отметить, что в мелиоративных кадастрах многие годы отражалась информация о землях, освоенных под орошение, но не обязательно поливаемых в текущем сезоне, т. е. площадь фактического орошения на указанные даты была гораздо меньше. В последние годы в кадастре специальной строкой стала выделяться площадь, которая не поливалась в сезоне, что делает информацию об орошаемых землях более объективной.



**Рис. 2.** Выделение многолетней залежи на изображении космического снимка со спутника Landsat-8 (04.04.2020) для центральной части Волго-Донской ОС в сочетании каналов 7, 5, 4 (коротковолновый инфракрасный, ближний инфракрасный, красный). Условные обозначения: 1 – залежь возрастом до 5 лет; 2 – залежь возрастом более 5 лет.

**Fig. 2.** Revealing the long-term fallow lands in the satellite image obtained from Landsat-8 (04.04.2020) for the central part of the Volga-Don Irrigation System with the use of a combination of channels 7, 5, 4 (short-wave infrared, near infrared, red). Legend: 1 – fallow lands, abandoned for less than 5 years ago; 2 – fallow lands, abandoned for 5 years and more.

В 2018 г. полностью не поливались земли Генераловской ОС и Иловлинского филиала, значительная часть земель не поливалась на Калачевской (31.4%), Городищенской (42%), Котельниковской (69%) и Тажинской (49.8%) системах; всего в Волгоградской области в 2018 г., по данным ВГМП, не поливалось более 20% освоенных под орошение земель (рис. 3).



**Рис. 3.** Общая площадь орошаемых земель и площадь земель, которые не поливались в 2018 г. Условные обозначения: по горизонтали 1, 2, ... 17 – номер оросительной системы (см. рис. 1); 18 – Государственные ОС, 19 – земли, орошаемые на местном стоке; 20 – всего по орошаемым землям.

**Fig. 3.** The total area of irrigated land and the area of lands that were not watered in 2018. Symbols: horizontally 1, 2, ... 17 – the number of the irrigation system (see Fig. 1); 18 – State-owned irrigation systems, 19 – lands irrigated using local runoff; 20 – total for irrigated lands.

Выше отмечалось, что информация ВГМП базируется на материалах, собранных на местах. Привлечение космических

снимков облегчило и уточнило бы получение данных, по которым можно определить поля, где осуществлялся полив, и где он отсутствовал в течение сезона. На рисунке 4 показан пример выделения на изображении космического снимка орошаемых массивов в центральной части Волго-Донской ОС, где сочетание зеленого, красного и ближнего инфракрасного каналов съемки позволяет выделить орошаемые поля за счет большей увлажненности почв, по сравнению с почвами богарных и залежных земель.



**Рис. 4.** Выделение орошаемых массивов на изображении космического снимка со спутника Sentinel-2 (27.07.2020) в центральной части Волго-Донской ОС по сочетанию каналов 2, 3, 4 (зеленый, красный, ближний инфракрасный). Условные обозначения: 1 – орошаемые массивы текущего сезона.

**Fig. 4.** Highlighting of irrigated massifs on the Sentinel-2 (27.07.2020) image in the central part of the Volga-Don IS by a combination of 2, 3, 4 (green, red, near infrared) bands. Legend: 1 – irrigated lands of the current season.

Известно, что после начала орошения почти повсеместно на орошаемых землях идет подъем уровня грунтовых вод (УГВ) и через 1–30 лет он часто достигает критического порога, при кото-

ром нарушается устойчивость почв. При высоком УГВ начинается переувлажнение, заболачивание почв, ухудшается водно-воздушный режим. Значительная часть этих почв подвергается вторичному засолению. Вторичное засоление – наиболее распространенное отрицательное явление при орошении, которое определяется запасами солей в почвах и грунтовой толще, плохой дренированностью и зонально-климатическими особенностями территорий. Критическая глубина залегания грунтовых вод (ГВ) для почв сухостепной и полупустынных зон составляет 2–3 м.

ГВ на многих оросительных системах Волгоградской области в 80–90-х гг. прошлого века достигали критической глубины, однако к настоящему времени уровень существенно изменился. В 2001 г. площади орошаемых земель с УГВ глубже 5 м на государственных ОС составляли 56.4%, в 2018 г. – 75.2% площади орошения (табл. 2). Причина такого резкого снижения УГВ заключается в сокращении поливных площадей и сокращении объемов поливов. Снижение потребления поливной воды связано с переходом овощных и бахчевых культур на капельное орошение, а также с использованием части или всех земель под богарное земледелие.

На сегодня основные площади с критическим УГВ (до 2–3 м) сохраняются на Большой Волгоградской (1 179 га), Заволжской (857 га), Среднеахтубинской (466 га), Тажинской (466 га) и Палласовской (293 га) ОС. Настораживает увеличение площади участков с УГВ 2–3 м на Тажинской ОС, где несколько лет назад закончилась реконструкция системы, а площадь таких участков с 2001 г., напротив, увеличилась с 237 до 466 га (табл. 2).

Минерализованные ГВ (>3 г/л) при глубине их залегания более 3 м существенного влияния на орошаемые почвы не оказывают. Потенциальную опасность для возникновения вторичного засоления почв представляют площади с минерализованными ГВ там, где сохраняются небольшие участки орошения с УГВ 2–3 м (Большая Волгоградская, Среднеахтубинская ОС) (табл. 2).

**Таблица 2.** Площади орошаемых земель в Волгоградской области (га) по их мелиоративному состоянию (данные ВГМП за 2001, 2015 и 2018 гг.)

**Table 2.** Areas of irrigated lands in the Volgograd Oblast (ha) according to their rehabilitation status (Volgograd Hydrogeological and reclamation party (VHMP) data for 2001, 2015 and 2018)

№ ОС на кар- те	Наимено- вание оро- сительной системы и номер ее геоморфо- логическо- го района на карте	Годы	Общая пло- щадь ороша- емых с.-х. угодий	Распределение орошаемых с.-х. угодий по								
				глубине залегания УГВ, м						минерализации ГВ, г/л		
				< 1	1.0-1.5	1.5-2.0	2.0-3.0	3.0-5.0	> 5	< 1	1.0-3.0	> 3
1	Б. Волго- градская (V <sub>11</sub> )	2001	19647	0	0	0	1362	5681	12604	16702	2945	0
		2015	15978	0	0	0	2174	10328	3476	10462	5516	0
		2018	15978	0	0	0	1179	11663	3136	15978	0	0
2	Волго- Ахтубин- ская (VI <sub>14</sub> )	2001	1626	0	0	517	1082	507	0	1626	0	0
		2015	1626	0	0	0	0	1626	0	1626	0	0
		2018	1626	0	0	0	0	1626	0	1626	0	0
3	Волго- Донская (III <sub>8</sub> )	2001	6261	0	15	88	1018	2454	2686	155	3614	2492
		2015	4614	0	0	0	0	59	4556	748	1245	2623
		2018	4614	0	0	0	0	59	4556	1935	1273	1406
4	Генералов- ская (III <sub>9</sub> , VI <sub>13</sub> )	2001	6895	4	4	18	970	1250	2624	1324	2625	2946
		2015	4870	0	0	0	0	85	4785	540	2630	1700
		2018	4870	0	0	0	0	110	4760	1932	1648	1290

5	Городи- щенская (III <sub>8</sub> )	2001	21056	0	2	3	159	885	19538	540	1855	18661
		2015	20587	12	72	23	77	38	20365	4091	5525	10971
		2018	20587	7	24	29	83	43	2401	4169	6539	9879
6	Заволжская (V <sub>12</sub> )	2001	21695	39	48	280	1489	13755	6084	16047	4120	1528
		2015	12907	0	0	0	837	2180	9890	12907	0	0
		2018	12907	0	0	0	857	1950	10100	12907	0	0
7	Иловатская (VI <sub>14</sub> )	2001	1496	0	0	0	0	0	401	1095	1496	0
		2015	168	0	0	0	0	0	168	0	168	0
		2018	168	0	0	0	0	0	168	0	168	0
8	Калачев- ская (III <sub>8</sub> , VI <sub>13</sub> )	2001	6988	0	0	0	0	422	6566	6288	700	0
		2015	7131	0	0	0	0	0	7131	3449	3682	0
		2018	7131	0	0	0	0	0	7131	6601	530	0
9	Кисловская (V <sub>11</sub> )	2001	11116	4	7	211	3648	7059	187	11116	0	0
		2015	7483	0	0	0	109	827	6547	7483	0	0
		2018	7483	0	0	0	89	702	6692	7483	0	0
10	Котельни- ковская (III <sub>9</sub> )	2001	3527	0	0	0	0	350	0	0	2024	263
		2015	1791	0	0	0	0	50	1741	0	1588	203
		2018	1791	0	0	0	0	50	1741	0	1588	203
11	Ленинская (V <sub>12</sub> )	2001	6311	0	0	0	0	474	5837	691	4695	925
		2015	5040	0	0	0	0	486	4554	896	3424	720
		2018	5040	0	0	0	0	674	4366	1357	3169	514
12	Оленевская (III <sub>8</sub> )	2001	2680	0	0	0	0	2680	0	2680	0	0
		2015	2680	0	0	0	0	0	2680	2680	0	0
		2018	2680	0	0	0	0	0	2680	2680	0	0
13	Палласов- ская (V <sub>12</sub> )	2001	14870	0	0	0	552	9974	4344	1045	9684	4141
		2015	11596	0	0	0	424	4299	6873	50	7027	4519
		2018	11596	0	0	295	293	3996	7012	1067	6994	3535

14	Светлояр- ская (V <sub>12</sub> , III <sub>9</sub> )	2001	7264	0	24	193	646	3624	2777	1012	2329	3923
		2015	5889	0	0	0	0	92	5797	146	1398	4345
		2018	5889	0	0	0	0	86	5803	136	1645	4108
15	Среднеах- тубинская (V <sub>11</sub> )	2001	4049	0	0	0	0	1115	2934	913	2328	808
		2015	2672	0	0	0	30	638	2006	1273	814	586
		2018	2672	0	0	0	466	2133	327	1121	988	563
16	Тажинская (V <sub>12</sub> )	2001	2993	0	0	0	237	996	1	405	802	1786
		2015	2926	0	0	0	415	2301	210	2500	426	0
		2018	2926	0	0	0	466	2133	327	1943	983	0
17	Иловлин- ский фили- ал (III <sub>8</sub> )	2001	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		2015	3900	0	0	0	0	0	3900	3900	0	0
		2018	3900	0	0	0	0	0	3900	3900	0	0
18	Итого гос. системы	2001	138474	47	106	1310	11163	47686	78162	60544	39217	37493
		2015	111858	12	72	23	4066	23006	84679	52749	33443	25666
		2018	111858	7	24	324	2967	24055	84481	64835	25525	21498
19	Местный сток	2001	120692	938	3254	4461	5257	15425	91357	69773	50959	17953
		2015	66982	0	0	0	4110	9240	53632	4299	24480	38203
		2018	66982	0	0	0	4110	9240	53630	4299	24480	38203
20	<b>Всего</b>	2001	259166	985	3359	5771	16420	63111	169520	130277	90176	37493
		2015	178840	12	72	23	8176	32246	138311	57048	57923	63869
		2018	178840	7	24	324	7077	33295	138113	69134	50005	59701

**Примечание.** 0 – показатель не присутствует; прочерк (-) – нет данных.

**Продолжение таблицы 2**  
**Table 2 continued**

№ ОС на карте	Наименование оросительной системы и номер ее геоморфологического района на карте	Годы	Общая площадь орошаемых с.-х. угодий	Распределение орошаемых с.-х. угодий по				
				минерализации поливной воды, г/л			обеспеченности дренажем	не поливалось
				< 1.0	1.0–2.0	> 2		
1	Б. Волгоградская (V <sub>11</sub> )	2001	19647	19647	0	0	2359	-
		2015	15978	15978	0	0	2359	-
		2018	15978	15978	0	0	2359	0
2	Волго-Ахтубинская (VI <sub>14</sub> )	2001	1626	1626	0	0	0	-
		2015	1626	1626	0	0	0	-
		2018	1626	1626	0	0	0	0
3	Волго-Донская (III <sub>8</sub> )	2001	6261	6261	0	0	208	-
		2015	4614	4614	0	0	58	-
		2018	4614	4614	0	0	58	0
4	Генераловская (III <sub>9</sub> , VI <sub>13</sub> )	2001	6895	6895	0	0	0	-
		2015	4870	4870	0	0	0	-
		2018	4870	4870	0	0	0	4855
5	Городищенская (III <sub>8</sub> )	2001	21056	21056	0	0	150	-
		2015	20587	20587	0	0	58	-
		2018	20587	20587	0	0	160	8815
6	Заволжская (V <sub>12</sub> )	2001	21695	21695	0	0	4551	-
		2015	12907	12907	0	0	3655	-
		2018	12907	12907	0	0	3655	0

7	Иловатская (VI <sub>14</sub> )	2001	1496	1496	0	0	0	-
		2015	168	168	0	0	0	-
		2018	168	168	0	0	0	0
8	Калачевская (III <sub>8</sub> , VI <sub>13</sub> )	2001	6988	6988	0	0	0	-
		2015	7131	7131	0	0	0	-
		2018	7131	7131	0	0	0	2238
9	Кисловская (V <sub>11</sub> )	2001	11116	11116	0	0	2385	-
		2015	7483	7486	0	0	2191	-
		2018	7483	7483	0	0	7483	0
10	Котельниковская (III <sub>9</sub> )	2001	3527	3527	0	0	740	-
		2015	1791	1791	0	0	740	-
		2018	1791	1791	0	0	740	1240
11	Ленинская (V <sub>12</sub> )	2001	6311	6311	0	0	0	-
		2015	5040	5040	0	0	0	-
		2018	5040	5040	0	0	0	495
12	Оленевская (III <sub>8</sub> )	2001	2680	2680	0	0	0	-
		2015	2680	2680	0	0	0	-
		2018	2680	2680	0	0	0	263
13	Палласовская (V <sub>12</sub> )	2001	14870	13443	1427	0	1884	-
		2015	11596	2758	6784	0	2080	-
		2018	11596	9041	545	2010	2080	0
14	Светлоярская (V <sub>12</sub> , III <sub>9</sub> )	2001	7264	7264	0	0	0	-
		2015	5889	5889	0	0	0	-
		2018	5889	5889	0	0	0	0
15	Среднеахтубинская (V <sub>11</sub> )	2001	4049	4049	0	0	0	-
		2015	2672	2672	0	0	0	-
		2018	2672	2672	0	0	0	0

16	Тажинская (V <sub>12</sub> )	2001	2993	2993	0	0	0	-
		2015	2926	2926	0	0	0	-
		2018	2926	2926	0	0	0	1456
17	Иловлинский филиал (III <sub>8</sub> )	2001	-	-	-	-	-	-
		2015	3900	3900	0	0	0	-
		2018	3900	3900	0	0	0	3900
18	Итого гос. системы	2001	138474	137047	1427	0	12277	-
		2015	111858	103020	6784	0	11243	-
		2018	111858	109303	545	2010	11243	23062
19	Местный сток	2001	120692	108554	12138	0	0	-
		2015	66982	66982	0	0	0	-
		2018	66982	66982	0	0	0	3495
20	<b>Всего</b>	2001	259166	245601	13565	12277	12277	-
		2015	178840	170002	6784	11243	11243	-
		2018	178840	176285	545	2010	11243	26557

**Примечание.** 0 – показатель не присутствует; прочерк (-) – нет данных.

Полив сельскохозяйственных культур водой с минерализацией более 1 г/л отмечается только на Палласовской ОС, однако поливные воды гидрокарбонатно-кальциевого состава на многих ОС постепенно меняются на гидрокарбонатно-натриевые, что даже при минерализации близкой к 1 г/л приводит к осолонцеванию верхних горизонтов почв. Минерализация речных вод в настоящее время постепенно увеличивается, прежде всего, за счет возрастания роли испарения с поверхности водохранилищ, а также увеличения доли дренажных вод, сброса в реки городских и промышленных стоков. Аналогичное явление наблюдается по мере прохождения воды по магистральным каналам, имеющим участки с земляным руслом ([Кадаева, 2013](#)). Постепенно в воде меняется соотношение ионов, увеличивается доля натрия и магния по сравнению с кальцием, растут концентрации сульфатов и хлоридов в результате растворения солей из засоленных пород ([Дедова, 2018](#)). Подобные явления характерны для Волго-Донского канала с Варваровским и Береславским водохранилищами ([Зинченко и др., 2020](#)), а также для Волгоградского и Цимлянского водохранилищ ([Бологин и др., 2018](#)).

Особенностью орошаемых земель в Волгоградской области является отсутствие на большинстве государственных систем дренажа. Всего в 2018 г. с дренажем орошалось 11.2 тыс. га, что составляет 10% площади всех орошаемых земель. Из них только Кисловская ОС обеспечена дренажем на 100%; также дренаж имеется на Котельниковской (41.3%), Заволжской (28.3%), Палласовской (17.9%), Большой Волгоградской (14.8%) ОС. Дренаж на землях, орошаемых местным стоком, вообще отсутствует (табл. 2).

Общая площадь засоленных почв на орошаемых землях государственных систем в Волгоградской области в 2001 г. составила 16 540 га (6.4%), в 2018 г. – 12 749 га (7.13%). Из них доля природно засоленных почв в 2001 г. составляла 78.2%, вторично засоленных – 21.8%, а в 2018 г. – 63.3% и 17.9% соответственно. Площадь вторично засоленных почв сократилась за этот период на 3.9% (табл. 3).

Самая большая площадь природно засоленных почв выявлена на Городищенской ОС (2 948 га), расположенной на юге При-

волжской возвышенности, Палласовской (1 869 га), Светлоярской ОС (542 га), находящихся на Хвалынской глинистой равнине, и Генераловской ОС (447 га), расположенной на возвышенности Северные Ергени и в долине р. Дон. Здесь же отмечаются максимальные площади средне- и сильнозасоленных почв, которые оказывают негативное воздействие на сельскохозяйственные культуры.

Вторично засоленные почвы распространены на Палласовской (637 га) и Светлоярской (976 га) ОС. На Тажинской ОС после реконструкции засоленные почвы не отмечаются, хотя система также расположена в районе Хвалынской глинистой равнины, и в 2001 г. 13.4% земель были вторично засолены. На землях, орошаемых местным стоком, вторично засоленные почвы последний раз выявлялись только в 2001 г. (20.4%) (табл. 3).

Сокращение площадей природно засоленных орошаемых почв, по сравнению с 2001 г., связано, в первую очередь, с общим сокращением площадей орошаемых земель (с 25.9 до 17.9 тыс. га); вторично засоленных почв – с реконструкцией на некоторых системах (Тажинская, Ленинская ОС) и со снижением УГВ до глубины 5 и >5 м, поскольку бывшие вторично засоленные почвы прошли этап постепенного рассоления. Среди вторично засоленных почв преобладают слабозасоленные почвы.

Однако неблагоприятные участки с вторично средне- и сильнозасоленными почвами сохранились на Палласовской (589 га) и Светлоярской (147 га) ОС, что связано с необходимостью их реконструкции и расположением на плохо дренированной Хвалынской глинистой равнине, где широко распространены природно засоленные солонцеватые почвы, легко переходящие во вторично засоленные при плохом оттоке оросительных вод.

На данных системах изначально преобладали светлокаштановые почвы в комплексе с засоленными солонцами (средними и мелкими – 25–50%; и >50% – на тяжело- и среднесуглинистых отложениях).

**Таблица 3.** Площади засоленных орошаемых почв в Волгоградской области (га) (данные ВГМП за 2001, 2015 и 2018 гг.)

**Table 3.** Areas of saline irrigated soils in the Volgograd Oblast (ha) (VHMP data for 2001, 2015 and 2018)

№ ОС на карте	Наименование оросительной системы и номер ее геоморфологического района на карте	Годы	Общая площадь орошаемых с.-х. угодий	Распределение орошаемых почв по засолению в слое 0–100 см				
				незасоленные	засоленные	в том числе степень засоления		
						слабозасоленные		
						всего	природно	вторично
1	Б. Волгоградская (V <sub>11</sub> )	2001	19647	18613	1034	681	681	0
		2015	15978	15764	214	102	102	0
		2018	15978	15764	0	0	0	0
2	Волго-Ахтубинская (VI <sub>14</sub> )	2001	1626	1626	0	0	0	0
		2015	1626	1626	0	0	0	0
		2018	1626	1626	0	0	0	0
3	Волго-Донская (III <sub>8</sub> )	2001	6261	5608	653	468	98	370
		2015	4614	4121	493	315	0	315
		2018	4614	4482	132	132	0	132
4	Генераловская (III <sub>9</sub> , VI <sub>13</sub> )	2001	6895	6698	197	35	35	0
		2015	4870	4478	392	256	256	0
		2018	4870	4423	447	311	311	0
5	Городищенская (III <sub>8</sub> )	2001	21056	18871	2185	1676	1676	0
		2015	20587	17745	2842	2316	2316	0
		2018	20587	17649	2938	2412	2412	0

6	Заволжская (V <sub>12</sub> )	2001	21695	21083	612	446	446	0
		2015	12907	12677	230	230	230	0
		2018	12907	12677	230	230	230	0
7	Иловатская (VI <sub>14</sub> )	2001	1496	1281	215	0	0	0
		2015	168	168	0	0	0	0
		2018	168	168	0	0	0	0
8	Калачевская (III <sub>8</sub> , VI <sub>13</sub> )	2001	6988	6723	265	65	65	0
		2015	7131	6933	133	65	65	0
		2018	7131	6933	198	65	65	0
9	Кисловская (V <sub>11</sub> )	2001	11116	10235	881	525	421	104
		2015	7483	7145	338	149	149	0
		2018	7483	7238	245	56	56	0
10	Котельниковская (III <sub>9</sub> )	2001	3527	3527	0	0	0	0
		2015	1791	1791	0	0	0	0
		2018	1791	1791	0	0	0	0
11	Ленинская (V <sub>12</sub> )	2001	6311	3806	2505	1098	1098	0
		2015	5040	3533	1507	444	444	0
		2018	5040	4018	1022	442	442	0
12	Оленевская (III <sub>8</sub> )	2001	2680	2680	0	0	0	0
		2015	2680	2680	0	0	0	0
		2018	2680	2680	0	0	0	0
13	Палласовская (V <sub>12</sub> )	2001	14870	9895	4975	2498	2091	407
		2015	11596	8380	3216	2114	1631	483
		2018	11596	8655	2941	2305	1822	483
14	Светлоярская (V <sub>12</sub> , III <sub>9</sub> )	2001	7264	5063	2201	977	977	0
		2015	5889	3095	2794	2220	2220	0
		2018	5889	4271	1618	1249	320	929

15	Среднеахтубинская (V <sub>11</sub> )	2001	4049	3632	417	345	345	0
		2015	2672	2147	525	376	376	0
		2018	2672	2310	362	175	175	0
16	Тажинская (V <sub>12</sub> )	2001	2993	2593	400	400	0	400
		2015	2926	2926	0	0	0	0
		2018	2926	2926	0	0	0	0
17	Иловлинский филиал (III <sub>8</sub> )	2001	-	-	-	-	-	-
		2015	3900	3900	0	0	0	0
		2018	3900	3900	0	0	0	0
18	Итого гос. системы	2001	138474	121934	16540	9214	7933	1281
		2015	111858	99109	12749	8587	7789	798
		2018	111858	101511	10347	7479	5935	1544
19	Местный сток	2001	120692	112499	8193	4842	4306	538
		2015	66982	62793	4189	3185	3185	0
		2018	66982	62793	4189	3185	3185	0
20	<b>Всего</b>	2001	259166	234433	24733	14056	12239	1817
		2015	178840	161902	16938	11772	10974	798
		2018	178840	164304	14536	10664	9120	1544

**Примечание.** 0 – показатель не присутствует; прочерк (-) – нет данных.

**Продолжение таблицы 3**  
**Table 3 continued**

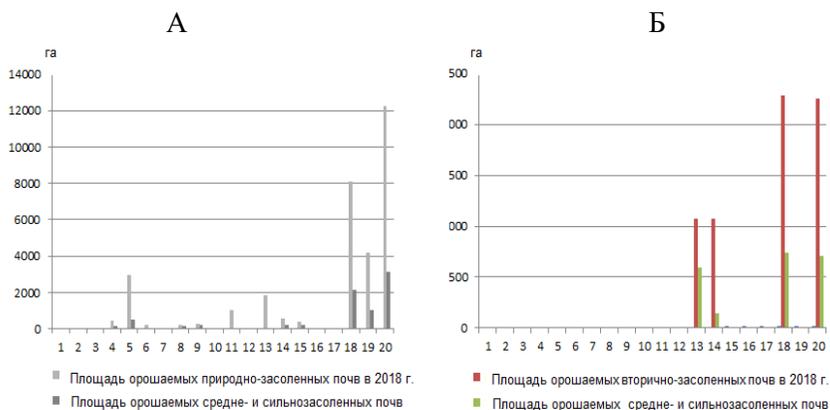
№ ОС на карте	Наименование оро- сительной системы и номер ее геоморфо- логического района на карте	Годы	Общая площадь ороша- емых с.-х. угодий	Распределение орошаемых почв по засолению в слое 0–100 см					
				в том числе степень засоления					
				среднезасоленные			сильно- и очень сильно засоленные		
				всего	приро- дно	втори- чно	всего	приро- дно	втори- чно
1	Б. Волгоградская (V <sub>11</sub> )	2001	19647	196	58	138	157	157	0
		2015	15978	48	45	3	64	64	0
		2018	15978	0	0	0	0	0	0
2	Волго-Ахтубинская (VI <sub>14</sub> )	2001	1626	0	0	0	0	0	0
		2015	1626	0	0	0	0	0	0
		2018	1626	0	0	0	0	0	0
3	Волго-Донская (III <sub>8</sub> )	2001	6261	140	30	110	45	0	45
		2015	4614	145	0	145	33	0	33
		2018	4614	0	0	0	0	0	0
4	Генераловская (III <sub>9</sub> , VI <sub>13</sub> )	2001	6895	102	35	67	60	0	60
		2015	4870	136	136	0	0	0	0
		2018	4870	136	136	0	0	0	0
5	Городищенская (III <sub>8</sub> )	2001	21056	483	483	0	26	26	0
		2015	20587	441	441	0	85	85	0
		2018	20587	441	441	0	85	85	0

6	Заволжская (V <sub>12</sub> )	2001	21695	166	166	0	0	0	0
		2015	12907	0	0	0	0	0	0
		2018	12907	0	0	0	0	0	0
7	Иловатская (VI <sub>14</sub> )	2001	1496	121	0	121	94	0	94
		2015	168	0	0	0	0	0	0
		2018	168	0	0	0	0	0	0
8	Калачевская (III <sub>8</sub> , VI <sub>13</sub> )	2001	6988	200	200	0	0	0	0
		2015	7131	133	133	0	0	0	0
		2018	7131	133	133	0	0	0	0
9	Кисловская (V <sub>11</sub> )	2001	11116	285	247	38	71	71	0
		2015	7483	175	175	0	14	14	0
		2018	7483	175	175	0	14	14	0
10	Котельниковская (III <sub>9</sub> )	2001	3527	0	0	0	0	0	0
		2015	1791	0	0	0	0	0	0
		2018	1791	0	0	0	0	0	0
11	Ленинская (V <sub>12</sub> )	2001	6311	1122	1122	0	285	285	0
		2015	5040	260	260	0	803	803	0
		2018	5040	203	203	0	377	377	0
12	Оленевская (III <sub>8</sub> )	2001	2680	0	0	0	0	0	0
		2015	2680	0	0	0	0	0	0
		2018	2680	0	0	0	0	0	0
13	Палласовская (V <sub>12</sub> )	2001	14870	1308	563	745	1169	592	577
		2015	11596	845	320	525	257	0	257
		2018	11596	379	47	332	257	0	257
14	Светлоярская (V <sub>12</sub> , III <sub>9</sub> )	2001	7264	1128	693	235	96	0	96
		2015	5889	498	275	223	76	32	44
		2018	5889	337	190	147	32	32	0

15	Среднеахтубинская (V <sub>11</sub> )	2001	4049	72	72	0	0	0	0
		2015	2672	149	149	0	0	0	0
		2018	2672	187	187	0	0	0	0
16	Тажинская (V <sub>12</sub> )	2001	2993	0	0	0	0	0	0
		2015	2926	0	0	0	0	0	0
		2018	2926	0	0	0	0	0	0
17	Иловлинский филиал (III <sub>8</sub> )	2001	-	-	-	-	-	-	-
		2015	3900	0	0	0	0	0	0
		2018	3900	0	0	0	0	0	0
18	Итого гос. системы	2001	138474	5323	3869	1454	2003	1131	872
		2015	111858	2830	1934	896	1332	998	334
		2018	111858	2039	1557	482	829	572	257
19	Местный сток	2001	120692	2763	1868	895	588	303	285
		2015	66982	1004	1004	0	0	0	0
		2018	66982	1004	1004	0	0	0	0
20	<b>Всего</b>	2001	259166	8086	5737	2349	2591	1434	1157
		2015	178840	3834	2938	896	1332	998	334
		2018	178840	3043	2561	482	829	572	257

**Примечание.** 0 – показатель не присутствует; прочерк (-) – нет данных.

Для ОС с природно засоленными почвами, расположенными на юге Приволжской возвышенности и возвышенности Северные Ергени, также характерно широкое распространение солонцовых комплексов, но из-за лучшей дренированности территорий процесс вторичного засоления почв наблюдается на ограниченной площади (Волго-Донская ОС). Самые благоприятные условия для орошения отмечаются на севере Приволжской возвышенности (Оленевская ОС, Иловлинский филиал) и на хорошо промытых аллювиально-луговых почвах долины Волги (Иловатская, Волго-Ахтубинская ОС), где засоленные и солонцеватые почвы не отмечаются (рис. 5, табл. 3).



**Рис. 5.** Площадь орошаемых засоленных почв в Волгоградской области в 2018 г.: **А** – природно засоленные почвы, **Б** – вторично засоленные почвы. Условные обозначения: 1, 2, ..., 17 – номер оросительной системы (см. рис. 1); 18 – Государственные ОС, 19 – земли, орошаемые на местном стоке; 20 – всего по орошаемым землям.

**Fig. 5.** The area of irrigated saline soils in the Volgograd Oblast in 2018: **A** – naturally salinized soils, **B** – secondary salinized soils. Legend: 1, 2, ..., 17 – the number of the irrigation system (see Fig. 1); 18 – State-owned irrigation systems, 19 – lands irrigated using local runoff; 20 – total for irrigated lands.

Солонцеватые почвы в Волгоградской области распространены достаточно широко, и существенная часть из них была вовлечена в регулярное орошение. Площади орошаемых солонцева-

тых почв государственных ОС в 2001 г. занимали 52 059 га, в 2018 г. – 32 273 га, что составляет 20.1% и 22.8% от общей площади орошаемых земель соответственно. Увеличение площади солонцеватых почв в %-ом выражении в 2018 г. вызвано общим сокращением площади орошаемых земель. Примерно половину всех солонцеватых почв составляют средне- и сильносолонцеватые почвы, которые доставляют серьезные проблемы при возделывании сельскохозяйственных культур. Наибольшие площади солонцеватых почв сохраняются на Городищенской (8 247 га), Палласовской (8 091 га), Калачевской (4 900 га), Светлоярской (3 373 га) и Генераловской (1 935 га) ОС, они расположены в южной части Приволжской возвышенности, в районах Северные Ергени и на Хвалынской глинистой равнине, т. е. в основных ареалах распространения природных солонцов и каштановых, светлокаштановых солонцеватых почв (рис. 6, табл. 4).

Привлечение дистанционной информации для определения засоленных почв на орошаемых землях Волгоградской области затруднено из-за того, что здесь преобладают глубокосолончаковатые и глубокозасоленные почвы, в которых соли расположенные на глубине более 70–100 см. Косвенно о засолении и солонцеватости почв можно судить по состоянию растительности, но такую информацию необходимо проверять на местности, т. к. изреженное состояние сельскохозяйственной культуры может быть связано и с другими причинами. Тем не менее, выявление подобных участков по снимкам помогает целенаправленно проводить отбор почвенных образцов для определения засоленности и солонцеватости почв, что позволяет сократить общее количество образцов.

На рисунке 7 представлено обработанное космическое изображение центральной части Волго-Донской ОС с определением индекса NDVI сельскохозяйственных культур и классификацией снимка по значениям NDVI.

Индекс NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) – наиболее известный и определяемый по космическим изображениям нормализованный разностный индекс растительности, который впервые был описан в 1973 г. (Rouse et al., 1973).

**Таблица 4.** Площади орошаемых солонцеватых почв в Волгоградской области (га) (данные ВГМП за 2001, 2015 и 2018 гг.)

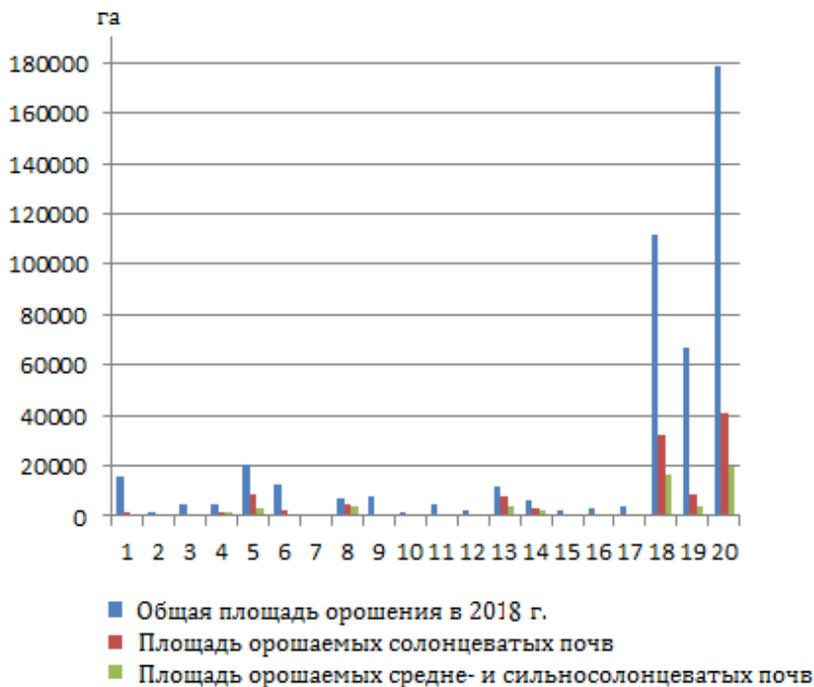
**Table 4.** Areas of irrigated saline soils in the Volgograd Oblast (ha) (VHMP data for 2001, 2015 and 2018)

№ ОС на карте	Наименование оросительной системы и номер ее геоморфологического района на карте	Годы	Общая площадь орошаемых с.-х. угодий	Участие солонцеватых почв			
				несолонцеватые	солонцеватые	по степени солонцеватости	
						слабо-	средне- и сильно-
1	Б. Волгоградская (V <sub>11</sub> )	2001	19647	1662	2985	1910	1075
		2015	15978	14136	1842	1154	688
		2018	15978	1436	1842	1154	688
2	Волго-Ахтубинская (VI <sub>14</sub> )	2001	1626	1626	0	0	0
		2015	1626	1626	0	0	0
		2018	1626	1626	0	0	0
3	Волго-Донская (III <sub>8</sub> )	2001	6261	6081	180	180	50
		2015	4614	4473	141	92	49
		2018	4614	4473	141	92	49
4	Генераловская (III <sub>9</sub> , VI <sub>13</sub> )	2001	6895	3770	3125	1269	1856
		2015	4870	2935	1935	724	1211
		2018	4870	2935	1935	724	1211
5	Городищенская (III <sub>8</sub> )	2001	21056	12727	8329	5438	2891
		2015	20587	12340	8247	5103	3144
		2018	20587	12340	8247	5103	3144

6	Заволжская (V <sub>12</sub> )	2001	21695	17437	4258	3608	650
		2015	12907	10888	2019	1717	302
		2018	12907	10888	2019	1717	302
7	Иловатская (VI <sub>14</sub> )	2001	1496	1126	370	167	203
		2015	168	168	0	0	0
		2018	168	168	0	0	0
8	Калачевская (III <sub>8</sub> , VI <sub>13</sub> )	2001	6988	2083	4900	1000	3900
		2015	7131	2231	4900	1000	3900
		2018	7131	2231	4900	1000	3900
9	Кисловская (V <sub>11</sub> )	2001	11116	9408	1702	1050	658
		2015	7483	6597	886	599	287
		2018	7483	6597	886	599	287
10	Котельниковская (III <sub>9</sub> )	2001	3527	3527	0	0	0
		2015	1791	1791	0	0	0
		2018	1791	1791	0	0	0
11	Ленинская (V <sub>12</sub> )	2001	6311	6311	0	0	0
		2015	5040	5040	0	0	0
		2018	5040	5040	0	0	0
12	Оленевская (III <sub>8</sub> )	2001	2680	2680	0	0	0
		2015	2680	2680	0	0	0
		2018	2680	2680	0	0	0
13	Палласовская (V <sub>12</sub> )	2001	14870	5226	9644	4877	4767
		2015	11596	3505	8091	4382	3709
		2018	11596	3505	8091	4382	3709
14	Светлоярская (V <sub>12</sub> , III <sub>9</sub> )	2001	7264	3607	3657	908	2749
		2015	5889	2516	3373	908	2465
		2018	5889	2516	3373	908	2465

15	Среднеахтубинская (V <sub>11</sub> )	2001	4049	3447	602	90	512
		2015	2672	2070	602	90	512
		2018	2672	2070	602	90	512
16	Тажинская (V <sub>12</sub> )	2001	2993	2852	141	79	62
		2015	2926	2689	237	137	100
		2018	2926	2689	237	137	100
17	Иловлинский филиал (III <sub>8</sub> )	2001	-	-	-	-	-
		2015	3900	3900	0	0	0
		2018	3900	3900	0	0	0
18	Итого гос. системы	2001	138474	98475	39999	20620	19373
		2015	111858	79585	32273	15906	16367
		2018	111858	79585	32273	15906	16367
19	Местный сток	2001	120692	108632	12060	5252	6798
		2015	66982	58521	8461	4906	3555
		2018	66982	58521	8461	4906	3555
20	Всего	2001	259166	207107	52059	25878	26171
		2015	178840	138106	40734	20812	19922
		2018	178840	138106	40734	20812	19922

**Примечание.** 0 – показатель не присутствует; прочерк (-) – нет данных.

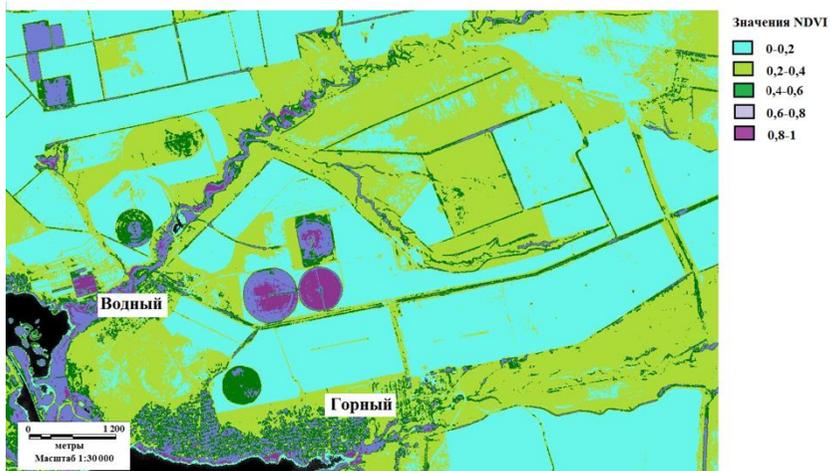


**Рис. 6.** Площадь орошаемых солонцеватых почв в Волгоградской области в 2018 г. Условные обозначения: 1, 2, ..., 17 – номер оросительной системы (см. рис. 1); 18 – государственные ОС, 19 – земли, орошаемые на местном стоке; 20 – всего по орошаемым землям.

**Fig. 6.** The area of irrigated solonchaks in the Volgograd Oblast in 2018. Legend: 1, 2, ..., 17 – the number of the irrigation system (see Fig. 1); 18 – State-owned irrigation systems, 19 – lands irrigated using local runoff; 20 – total for irrigated lands.

Индекс NDVI – это показатель, применяемый для качественной и количественной оценки зеленой массы растительного покрова. Вегетационный индекс NDVI вычисляют по формуле:  $NDVI = (NIR - RED) / (NIR + RED)$ , где NIR – яркость или коэффициент отражения в ближней инфракрасной области спектра (0.7–1.0 мкм); RED – в красной области спектра (0.6–0.7 мкм). Он предполагает соотношение максимального поглощения

солнечной радиации растениями в красной области и максимального отражения в инфракрасном диапазоне.



**Рис. 7.** Классификация по значениям NDVI изображения космического снимка со спутника Sentinel-2 (27.07.2020) на территорию центральной части Волго-Донской ОС.

**Fig. 7.** Classification of the satellite image obtained from Sentinel-2 (27.07.2020) by NDVI values on the territory of the central part of the Volga-Don IS.

На рисунке 7 показано, что в областях со значением  $NDVI \leq 0.2$  находятся поля с убранными культурами и пары, на участки с  $NDVI$  в интервал  $0.2-0.4$  попадают поля с залежью (см. рис. 2) и поле с суданской травой в разреженном состоянии (на богаре), а при значениях  $0.4-1$  – поля с орошаемыми культурами (кукурузой, соей, суданской травой) в разной степени вегетации и в хорошем состоянии. Также выделяется вегетирующая растительность в балках ( $0.02-0.04$ ). На поле с суданской травой на богаре значения  $NDVI$  составили менее  $0.4$  в активную фазу вегетации (конец июля), что свидетельствует о наличии деградационных почвенных процессов, снижающих вегетационную активность культуры, которая связана, как и предполагалось, с распространением здесь значительного количества солонцеватых почв. Таким

образом, анализ значений NDVI позволяет определить состояние культуры в процессе вегетации и выбрать поля с разреженной культурой для проведения на этом участке целенаправленного отбора образцов для оценки засоления и солонцеватости почв.

Все орошаемые поля со средне- и сильносолонцеватыми почвами нуждаются в такой мелиорации, как гипсование почв. На рисунке 1, по данным ВГМП, разным цветом показаны ОС где: 1 (розовый) – реконструкция и мелиорация почв не требуются; 2 (голубой) – необходимы мероприятия по рассолонцеванию почв; 3 (красный) – необходима комплексная реконструкция с мелиорацией почв и переустройством коллекторно-дренажной сети. Из рисунка 1 видно, что, в первую очередь, полную реконструкцию с мелиорацией почв и переустройством коллекторно-дренажной сети нужно проводить на Городищенской, Палласовской и Котельниковской ОС, расположенных в южной части Приволжской возвышенности, в районах Хвалынской глинистой равнины и Северных Ергеней. Однако основная проблема на сегодняшний день в Волгоградской области заключается в необходимости мероприятий по рассолонцеванию почв, в которых нуждается подавляющая часть ОС. Внимания требуют ОС, где проводится или будет проводиться полив из водохранилищ солончатыми водами, приводящий к накоплению обменного натрия и к вторичному осолонцеванию почв (Волго-Донская, Светлаярская, Генераловская ОС). Поэтому здесь необходимы специальные мероприятия по улучшению качества поливной воды (разбавление, фильтрование вод), чтобы исключить развитие негативных процессов.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ данных ВГМП, характеризующих состояние орошаемых земель Волгоградской области за период 2001–2018 гг., показал следующее.

1. Сокращение орошаемых земель прекратилось, и площадь орошения с 2015 г. сохраняется на уровне 178.8 тыс. га.
2. Факторами, оказывающими влияние на состояние орошаемых почв, являются: геоморфолого-литологические условия и почвенный покров системы, на природные особенности которой накладываются плохое техническое состояние ОС и социально-

экономические проблемы данной территории.

3. В 80–90-х годах прошлого столетия основными негативными явлениями на орошаемых землях Волгоградской области были высокий уровень грунтовых вод и, как следствие, – наличие вторично засоленных почв при отсутствии дренажа, а в 2001–2015 гг. – сокращение орошаемых площадей. Основными проблемами на сегодняшний день являются: наличие заброшенных земель, ставших многолетней залежью, богарных полей на землях, освоенных под орошение, отсутствие дренажа на большинстве ОС и значительные площади солонцеватых почв (требующих мелиорации), полив солоноватыми водами из водохранилищ.

4. Положительным в период 2001–2018 гг. является существенное снижение УГВ и значительное сокращение площадей вторично засоленных почв. Среди вторично засоленных почв преобладают слабозасоленные почвы. Неблагоприятные участки с вторично средне- и сильнозасоленными почвами сохранились на Палласовской и Светлоярской ОС, что связано с расположением систем на плохо дренированной Хвалынской глинистой равнине, с широко распространенными природно засоленными солонцеватыми почвами и отсутствием реконструкции на ОС.

5. Сокращение площади солонцеватых почв в %-ом выражении вызвано общим уменьшением площади орошаемых земель. Примерно половину всех солонцеватых почв составляют средне- и сильносолонцеватые почвы. Наибольшие площади солонцеватых почв сохраняются на Городищенской, Палласовской, Калачевской, Светлоярской и Генераловской ОС, расположенных в сухостепной и полупустынной зонах, основных ареалах распространения природных солонцов и каштановых, светло-каштановых солонцеватых почв.

Собственные исследования на Волго-Донской ОС с привлечением дистанционной информации показали, что для этой системы характерны общие черты современного мелиоративного состояния Волгоградской области: наличие залежных земель, отсутствие дренажа, солонцеватость почв, полив солоноватыми водами из водохранилища. Использование космических снимков для определения площади залежных и орошаемых в текущем сезоне земель на примере Волго-Донской ОС демонстрирует возможность уточ-

нить данные, которые обычно собираются на местах. Привлечение дистанционной информации для определения засоленных почв прямым дешифрированием на орошаемых землях Волгоградской области затруднено из-за того, что здесь преобладают почвы, где засоленные горизонты расположены глубоко. Косвенно о засолении и солонцеватости почв можно судить по состоянию растительности, и при выявлении участков с разреженным растительным покровом на снимках можно целенаправленно проводить отбор почвенных образцов для определения засоленности и солонцеватости почв, тем самым сократив общее количество образцов.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Безднина С.Я.* Качество воды для орошения: Принципы и методы оценки. М.: Изд. РОМА, 1997. 185 с.
2. *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).
3. *Горохова И.Н., Панкова Е.И., Харланов В.А.* Изменения мелиоративного состояния орошаемых почв Волгоградской области в XXI веке // Почвоведение. 2019. № 3. С. 1–18. DOI: [10.1134/S0032180X19030067](https://doi.org/10.1134/S0032180X19030067).
4. *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>.
5. *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](https://doi.org/10.19047/0136-1694-2020-104-68-109).
6. *Кадаева А.Г.* К вопросу о качестве оросительных вод в Калмыкии // Вестник Калмыцкого института гуманитарных исследований РАН. 2013. № 1. С. 160–162.
7. *Панкова Е.И., Новикова А.Ф.* Мелиоративное состояние и вторичное засоление почв орошаемых земель Волгоградской области // Почвоведение. 2004. № 6. С. 731–744.
8. Почвенная карта Волгоградской области (М 1 : 400 000. ГУГК СССР, 1989.

9. Приходько В.Е. Орошаемые степные почвы: функционирование, экология, продуктивность. М.: Изд-во “Интеллект”, 1996. 179 с.
10. Щедрин В.Н., Колганов А.В., Васильев С.М., Чураев А.А. Оросительные системы России: от поколения к поколению. Новочеркасск: Геликон, 2013. Ч. I. 283 с.

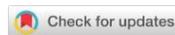
#### REFERENCES

1. Bezdina S.Ya., *Kachestvo vody dlya orosheniya: Printsipy i metody otsenki* (Irrigation Water Quality: Principles and Methods of Assessment), Moscow: Izd. ROMA, 1997, 185 p.
2. Bolotin D.A., Dubenok N.N., Bolotin A.G., Fomin S.D., Tikhonova M.K., *Vodnye resursy Volgogradskoi oblasti i problemy ikh 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).
3. Gorokhova I.N., Pankova E.I., Kharlanov V.A., Changes in the Ameliorative Status of irrigated Soils of Volgograd Oblast in the 21st Century, *Eurasian Soil Science*, 2019, Vol 52, No. 5, pp. 550–565, DOI: [10.1134/S1064229319030062](https://doi.org/10.1134/S1064229319030062).
4. Dedova E.B., Zonal'naya shkala otsenki kachestva polivnykh vod respublika Kalmykiya, *Sinergiya*, 2018, No. 1, pp. 88–95, URL: <https://vepi.ru/wp-content/uploads/2018/10/Sinergiya-2018-1.pdf>.
5. 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, Vol. 104, pp. 68–109, DOI: [10.19047/0136-1694-2020-104-68-109](https://doi.org/10.19047/0136-1694-2020-104-68-109).
6. Kadaeva A.G., K voprosu o kachestve orositel'nykh vod v Kalmykii (Assessment of irrigation water quality in the Republic of Kalmykia), *Vestnik Kalmyt'skogo instituta gumanitarnykh issledovaniy RAN*, 2013, No. 1, pp. 160–162.
7. Pankova E.I., Novikova A.F., Meliorativnoe sostoyanie i vtorichnoe zasolenie pochv oroshaemykh zemel' Volgogradskoi oblasti (Ameliorative state and secondary salinization of soils of irrigated lands of the Volgograd region), *Pochvovedenie*, 2004, No. 6, pp. 731–744.
8. Soil map of the Volgograd region, scale 1 : 400 000, GUGK USSR, 1989.
9. Prikhod'ko V.E., *Oroshaemye stepnye pochvy: funktsionirovanie, ekologiya, produktivnost'* (Irrigated steppe soils: functioning, ecology, productivity), Moscow: Izd-vo “Интеллект”, 1996, 179 p.

10. Shchedrin V.N., Kolganov A.V., Vasil'ev S.M., Churaev A.A., *Orositel'nye sistemy Rossii: ot pokoleniya k pokoleniyu* (Irrigation systems in Russia: from generation to generation), Novocherkassk: Gelikon, 2013, part I, 283 p.

УДК 631.4

DOI: 10.19047/0136-1694-2022-110-90-113



**Ссылки для цитирования:**

Иванов А.Л., Столбовой В.С., Гребенников А.М. Развитие концептуальной основы охраны и рационального использования почв в Европейском союзе // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2022. Вып. 110. С. 90-113. DOI: 10.19047/0136-1694-2022-110-90-113

**Cite this article as:**

Ivanov A.L., Stolbovoy V.S., Grebennikov A.M., Development of the conceptual framework for soil protection and management in the European Union, Dokuchaev Soil Bulletin, 2022, V. 110, pp. 90-113, DOI: 10.19047/0136-1694-2022-110-90-113

## **Развитие концептуальной основы охраны и рационального использования почв в Европейском союзе**

© 2022 г. А. Л. Иванов, 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](mailto:vladimir.stolbovoy@gmail.com).*

*Поступила в редакцию 23.02.2022, после доработки 11.03.2022,  
принята к публикации 24.05.2022*

**Резюме:** Рассмотрены концепции, определяющие политику охраны и рационального использования почв (ОРИП) в Европейском союзе (ЕС). Установлено, что задачи охраны и рационального использования почв существенно эволюционировали с начала 90-х годов прошлого века. Вначале охрана и рациональное использование почв не рассматривались отдельно, а были связаны с охраной других компонентов окружающей среды, например, с загрязнением почвы в результате загрязнения воздуха или с утилизацией промышленных и коммунальных отходов. В 2006 г. была принята независимая “Стратегия защиты почв ЕС”. Главным образом в документе рассматривались защита почв от физических воздействий (эрозии, уплотнения и т. д.) и сохранение их функций. Новая “Почвенная стратегия 2030” основана на положениях предыдущего стратегического документа и, в первую очередь, направлена на улучшение здоровья почвы. Особое внимание уделяется

сохранению почв как пространственного ресурса и их эффективному использованию в системе циркулярной (экономика замкнутого цикла) экономики. Рассматривая эволюцию политики ЕС в отношении охраны и рационального использования почв, можно сделать вывод, что основное развитие привело к пониманию важности здоровья почв и осознанию необходимости сохранения почвы как мультицелевой пространственно-функциональной основы для здоровья людей, живой природы и климата.

**Ключевые слова:** здоровье почв, охрана почв, загрязнение почв, деградация почв, почвы и циркулярная экономика.

## **Development of the conceptual framework for soil protection and management in the European Union**

© 2022 A. L. Ivanov, V. S. Stolbovov\*, A. M. Grebennikov

*Federal Research Centre "V.V. Dokuchaev Soil Science Institute",  
7 Bld. 2 Pyzhevskiy per., Moscow 119017, Russian Federation,  
\*e-mail: [vladimir.stolbovov@gmail.com](mailto:vladimir.stolbovov@gmail.com).*

*Received 23.02.2022, Revised 11.03.2022, Accepted 24.05.2022*

**Abstract:** The concepts defining the policy of soil protection and rational use (SPRU) in the European Union (EU) are considered. It is found that the focuses of SPRU have evolved significantly since the early 1990s. Initially the SPRU was not considered separately, it was associated with the protection of other environment components, for example, soil contamination resulting from air pollution or the disposal of industrial and municipal wastes. In 2006 the stand-alone EU Soil Protection Strategy was established. This document was focused on soil protection against physical degradation (erosion, compaction, sealing, etc.) and on preservation of soil functions. The new Soil Strategy 2030 is based on the provisions of the previous Strategy document and is primarily aimed at improving soil health. Special attention is paid to the conservation of soils as a spatial resource and its efficient use in the system of a circular (closed-loop economy) economy. Looking at the evolution of the EU policy towards the SPRU, it can be concluded that the main development has led to an understanding of the importance of soil health and awareness of the need to conserve soil as multi-target spatial and functional basis for human health, wildlife and climate.

**Keywords:** soil health, soil protection, soil pollution, soil degradation, soil and circular economy.

## ВВЕДЕНИЕ

Основные цели Европейского союза (ЕС) включают координацию экономического и социального развития, формирование единого рынка товаров и услуг, единой экономической политики, выравнивание уровня экономического развития стран-участниц и др. Успешное выполнение поставленных целей сталкивается с проблемами межгосударственной неравномерности социально-экономического развития и неоднородности природных условий. И если первая – неравенство уровней социально-экономического развития – может быть нивелирована, то вторая – природное разнообразие – представляет данность, которая не подлежит регулированию. Кроме того, природное разнообразие характеризуется не только пространственной неоднородностью, но и неравномерной временной изменчивостью. Это не позволяет принимать общие меры адаптации, например к климатическим изменениям. Таким образом, на сегодня отмеченные межгосударственные различия не позволяют достичь одной из главных целей ЕС – получать одинаковую себестоимость продуктов в разных странах. Это затрудняет, например, реализацию “Общей сельскохозяйственной политики” (Common Agricultural Policy, CAP), которая, по идее создателей ЕС, должна гарантировать общий уровень цен и объемов сельскохозяйственного производства.

Значительным разнообразием характеризуются почвы стран-членов ЕС. Так, согласно последним данным, разнообразие почв ЕС включает 24 из 32 общемировых Главных Почвенных Групп ФАО ([Tóth et al., 2008](#)). Каждая из этих групп характеризуется особой композицией почвообразовательных процессов, определенными морфогенетическими свойствами, составом почв и специфической реакцией на глобальные изменения. В настоящее время такое разнообразие почв ЕС признается ценным активом, который необходимо защитить и сохранить для будущих поколений ([Soil Strategy..., 2021](#)). Однако ситуация с почвами ЕС считается неблагоприятной. Так подсчитано, что “нездоровыми”, т. е. не способными выполнять определенные экосистемные функции, являются от 60 до 70% почв ЕС.

Земля и почвы продолжают подвергаться серьезным процессам деградации, таким как эрозия, уплотнение, снижение содержания органического вещества, загрязнение, потеря биоразнообразия, засоление и запечатывание. Признано, что деградация почв ЕС является результатом нерационального землепользования и управления, чрезмерной эксплуатации почв и выбросов загрязняющих веществ. Приводятся данные ([Soil Strategy..., 2021](#)) о том, что в ЕС ежегодно выносится эрозией около 1 млрд т почв. В период с 2012 по 2018 гг. в ЕС изымалось более 400 км<sup>2</sup> земель ежегодно. В 2018 г. образовалось более 530 млн т почвенных минеральных выемок, которые были зарегистрированы как отходы. Две трети этих отходов рекультивировано и возвращено в экономику.

Около 115 млн га, или 12% от общей площади суши ЕС, подвержены воздействию водной эрозии, и 42 млн га – ветровой эрозии. Почти 45% почв ЕС имеют низкое содержание органического вещества, главным образом это отмечено в южной Европе, а также в районах Франции и Германии. Количество потенциально загрязненных территорий оценивается приблизительно в 3.5 млн га. В период с 1990 по 2000 гг. по меньшей мере 2.8% территории ЕС подверглись изменению в использовании, включая значительное увеличение площади городских застроек. Доля запечатанной поверхности в течение этого периода составила от 0.3% до 10%.

Оценка воздействия, проведенная в соответствии с руководящими принципами Комиссии ЕС и на основе имеющихся данных, показывает, что деградация почв может стоить до 38 млрд евро в год.

Неспособность защитить почву подрывает устойчивость и долгосрочную конкурентоспособность в ЕС. Действительно, почва взаимосвязана с воздухом и водой таким образом, что регулирует их качество. Кроме того, функции почвы вносят огромный вклад в такие области, как биоразнообразие, защита морской среды, управление прибрежными районами и смягчение последствий изменения климата.

Большие различия между национальными режимами защиты почв, в частности в отношении загрязнения почв, иногда налаживают совершенно разные обязательства на производителей, создавая тем самым несбалансированную ситуацию в постоянных за-

тратах. Отсутствие таких режимов и неопределенность в отношении степени деградации почв могут в некоторых случаях также препятствовать частным инвестициям.

Деградация в одном государстве-члене или регионе может иметь трансграничные последствия. Потери органического вещества почвы в одном государстве-члене препятствуют достижению целей ЕС по Киотскому протоколу. Например, плотины и инфраструктура, расположенные ниже по течению, могут повреждаться отложениями в результате массивной эрозии выше по течению в другой стране. Подземные воды в приграничных странах загрязняются под влиянием загрязнения земель по другую сторону границы. Поэтому необходимо проводить рекультивационные мероприятия у источника, чтобы сократить затраты на устранение последствий. В противном случае расходы по восстановлению качества окружающей среды могут понести другие лица, не имеющие отношения к загрязнению.

Необходимы дальнейшие исследования, чтобы восполнить пробелы в знаниях о почве и укрепить основы политики. Комиссия ЕС намерена проводить консультации с заинтересованными сторонами и следовать рекомендациям по приоритетным блокам:

- процессы, лежащие в основе функций почвы (например, роль почвы в глобальном учете CO<sub>2</sub> и в сохранении биоразнообразия),
- пространственные и временные изменения в почвенных процессах,
- экологические, экономические и социальные факторы почвенных угроз,
- факторы, влияющие на экологические услуги почвы, и оперативные процедуры и технологии для защиты и восстановления почв.

Для решения перечисленных выше проблем в ЕС принята новая “Почвенная стратегия 2030” ([Soil Strategy..., 2021](#)). В ее основе лежит следующая идея: *“Использование преимуществ здоровых почв для людей, продуктов питания, природы и*

*климата*<sup>2</sup>. Обоснованием для разработки стратегии послужили следующие аргументы: 1) почвообразование является чрезвычайно медленным процессом, поэтому почву можно рассматривать как невозобновляемый ресурс; 2) почва обеспечивает нас продовольствием, биомассой и сырьем. Она служит платформой для человеческой деятельности и ландшафта, а также архивом наследия и играет центральную роль среды обитания и генофонда; 3) почва накапливает, фильтрует и преобразует многие вещества, включая воду, питательные вещества и углерод. Фактически это самое большое хранилище углерода в мире (более 1 500 Гт в верхнем метровом слое). Перечисленные функции почв должны быть защищены как в силу их социально-экономического, так и экологического значения.

Стратегия ЕС в области ОРИП должна учитывать различные функции, осуществляемые почвами, их изменчивость и сложность, а также диапазон различных процессов деградации, которым они могут подвергаться, с учетом также социально-экономических аспектов.

Разработка подходов ОРИП сопровождается совершенствованием законодательной базы. Последнее регулирует и закрепляет основные положения ОРИП. Например, принятие Земельного Кодекса РФ и определение ответственности за нарушение в сфере ОРИП ([Земельный кодекс Российской Федерации, 2001](#)). При этом важным аспектом формирования нормативно-правовой базы ОРИП выступает изучение опыта в отдельных странах и их объединениях, как ЕС. Значение исследования зарубежного опыта определяется не только уменьшением риска совершения ошибок в области ОРИП, по правилу “учиться на чужих ошибках”, но также созданием основы для предсказания развития рекультивации в нашей стране в будущем. Можно предполагать, что в будущем

---

<sup>2</sup> Одним из важных показателей здоровья почвы в России часто признается их природная и/или индуцированная супрессивность, т. е. совокупность биологических, физико-химических и агрохимических свойств почвы, ограничивающих выживаемость и паразитическую активность почвенных фитопатогенов и других вредных организмов ([Соколов и др., 2009](#)).

при увеличении плотности населения в России могут возникнуть проблемы ОРИП аналогичные тем, которые мы наблюдаем в близких по природным условиям густонаселенных районах ЕС. Особенно важным представляется также изучение практики ЕС, которая складывается из выделения наиболее значимых аспектов ОРИП из множества опций, существующих в отдельных странах-членах. Как известно, в России происходит децентрализация управления земельными ресурсами (Статья 72 Конституции РФ). Такое развитие является положительным, поскольку открывает возможность максимального учета особенностей социально-экономического развития и природных условий субъектов РФ. Вместе с тем, безусловно, важным остается соблюдение базовых общегосударственных нормативов ОРИП, что позволит сохранить государственную политику в рассматриваемой области целостной.

Целью настоящей работы является обзор развития нормативно-законодательной базы охраны и рационального использования почв в странах ЕС, начиная с его образования (7 февраля 1992 г., подписание договора в Маастрихте, Нидерланды).

## ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Объектами исследований являются законодательные документы ЕС, обеспечивающие ОРИП. Анализ этих документов позволяет выявить наиболее значимые тенденции развития сферы регулирования последних.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Экологическая политика ЕС в области ОРИП нашла отражение в последовательно принятых с начала 1990-х годов восьми программах действий. Выполнение природоохранных мероприятий и внедрение директив контролируется Комиссией ЕС, которая требует предоставление отчетов о состоянии окружающей среды от стран-членов каждые три года. Комиссия ЕС также предоставляет соответствующий вопросник, либо план, на котором должна основываться отчетность ([Council Directive 91/692/EEC..., 1991](#)). Основные цели, принятые в документах в рамках программных действий, представлены в таблице 1.

**Таблица 1.** Нормативные документы, регулирующие ОРИП в Европейском Союзе  
**Table 1.** Regulations governing soil protection and rational use in the European Union

<b>Основные цели</b>	<b>Документ ЕС</b>
Создание единого понятийно-терминологического аппарата	<a href="#">Council Directive 91/692/EEC...., 1991.</a> Директива стандартизирует и рационализирует отчетность по реализации ряда природоохранных документов ЕС.
Ограничение изъятия земель	<a href="#">Council Directive 1999/31/EC...., 1999.</a> Директива по полигонам захоронения отходов.
Регулирование захоронения отходов, загрязнения земель и использования почвенных выемок	<a href="#">Commission Decision 2000/532/EC...., 2000.</a> Решение Европейской Комиссии 2000/532/ЕС от 3 мая 2000 г. о замене Решения 94/3/ЕС, устанавливающего список отходов согласно Статье 1(а) Директивы 75/442/ЕЭС Совета ЕС об отходах, и замене Решения 94/904/ЕС Совета ЕС, устанавливающего список опасных отходов согласно Статье 1(4) Директивы 91/689/ЕЭС Совета ЕС об опасных отходах (зарегистрировано как документ С(2000) 1147)
Публичный доступ к экологической информации	<a href="#">Directive 2003/4/EC...., 2003.</a> Директива о публичном доступе к природоохранной информации.
Ответственность за причинения ущерба экологии	<a href="#">Directive 2004/35/CE...., 2004.</a> Директива об экологической ответственности в отношении предотвращения и возмещения ущерба окружающей среде

**Продолжение таблицы 1.**  
**Table 1 continued.**

Основные цели	Документ ЕС
Деградация и угрозы разрушения почв	<a href="#">Thematic Strategy for Soil Protection</a> [SEC(2006)620] [SEC(2006)1165]. Директива о сдерживании физической деградации почв и поддержании экосистемных функций почв.
Регулирование захоронения отходов, загрязнения земель и использования почвенных выемок	<a href="#">Directive 2008/1/EC..., 2008</a> ; <a href="#">Directive 2008/98/EC..., 2008</a> . Директива о промышленных и бытовых отходах.
Контроль промышленных выбросов и загрязнения	<a href="#">Directive 2010/75/EU</a> of the European Parliament and of the Council of 24 November 2010 on industrial emissions (integrated pollution prevention and control
Сокращение пластиковых отходов	<a href="#">Directive (EU) 2019/904..., 2019</a> . Директива о сокращении влияния некоторых пластиковых продуктов на окружающую среду.
Здоровье почв для людей, продуктов питания, природы и климата	<a href="#">Soil Strategy for 2030</a> . Reaping the benefits of healthy soils for people, food, nature and climate SWD (2021) 323 final. Новая “Почвенная стратегия” ЕС до 2030 г. и далее.

“Директива Совета” от 23 декабря 1991 г. ([Council Directive 91/692/EEC..., 1991](#)) регулирует порядок, формы и сроки представления странами-членами отчетов Комиссии ЕС о состоянии компонентов окружающей среды. В частности, Директива стандартизирует и рационализирует отчетность по ряду природоохранных регламентов, входящих в Директиву (91/692/EEC).

Директива ЕС 1999/31/ЕС ([Council Directive 1999/31/EC..., 1999](#)) предписывает соблюдение мер по предупреждению и защите от любой угрозы для окружающей среды в краткосрочной и долгосрочной перспективах, и особенно против загрязнения грунтовых вод при проникновении фильтрата с полигонов отходов в почву.

Цель Директивы состоит в предотвращении загрязнения грунтовых вод. Недопущение загрязнения почв рассматривается не как элемент их охраны, а как одно из мероприятий охраны от загрязнения грунтовых вод. Директива исключает (без ущерба для существующего законодательства) из сферы действия:

- распространение осадков сточных вод, в том числе осадков канализационных вод, а также осадков, появляющихся в результате дноуглубительных работ, и похожих веществ по поверхности почвы в целях удобрения или улучшения;

- использование инертных отходов, подходящих для использования в переработанном/восстановленном виде или в виде добавок, или для строительства на полигонах отходов;

- депонирование неопасных осадков, полученных в результате дноуглубительных работ, вдоль малых водных путей.

Директива 2003/4/ЕС ([Directive 2003/4/EC..., 2003](#)) имеет целью повышение осведомленности общественности по вопросам охраны окружающей среды. Общественные власти обязываются предоставлять заинтересованным лицам доступ к экологической информации и данным, относящимся к одобрению, лицензированию, выдаче разрешений на осуществление определенной деятельности, о загрязнении воды и воздуха опасными веществами, заражении почв. Директива устанавливает, какая природоохранная информация должна быть предоставлена, кому она должна быть предоставлена, и какие органы общественной власти ответственны за это. В этом контексте органы общественной власти

должны обеспечить наличие доступного для широкой публики перечня таких организаций.

Директива 2004/35/CE ([Directive 2004/35/CE..., 2004](#)) направлена на установление системы экологической ответственности на основе принципа “загрязнитель платит” для предотвращения и устранения ущерба окружающей среде. В соответствии с отмеченным принципом, лица, причиняющие ущерб окружающей среде или создающие непосредственную угрозу такого ущерба, должны не только компенсировать весь ущерб, но и взять на себя расходы на необходимые превентивные или восстановительные меры. Этот принцип распространяется также и на земли и сформулирован следующим образом: “Ущерб земле, представляющий собой любое загрязнение земли, которое создает значительный риск неблагоприятного воздействия на здоровье человека в результате прямого или косвенного проникновения в землю, на нее или под землю веществ, препаратов, организмов или микроорганизмов. Термин “ущерб” означает измеримое неблагоприятное изменение природного ресурса или измеримое ухудшение услуги природных ресурсов, которые могут произойти прямо или косвенно”. При этом, если ущерб окружающей среде, в том числе и землям, еще не нанесен, но существует непосредственная угроза причинения такого ущерба, необходимо без промедления принять превентивные меры. Контролирующий орган может в любое время от лица, использующего земли, потребовать предоставления информации о любой непосредственной угрозе нанесения ущерба окружающей среде или о предполагаемых случаях такой непосредственной угрозы, а также о принятии необходимых превентивных мер, компетентный орган может давать инструкции землепользователю (землевладельцу) относительно принятия необходимых превентивных мер и самостоятельно принять необходимые превентивные меры. Расходы на предупредительные и восстановительные действия, предпринятые в соответствии с настоящей Директивой, несет землепользователь (землевладелец).

В Директиве 2008/1/EC ([Directive 2008/1/EC..., 2008](#)) указывается на необходимость комплексного подхода к исследованию загрязнений компонентов природы. Существование различных подходов к раздельному контролю за выбросами в воздух, воду и

почву может привести к переносу загрязнения от одного объекта окружающей среды к другому, не защищая окружающую среду в целом. Это может существенно изменить уровень загрязнения компонентов природы, в результате, если до переноса загрязнений все компоненты характеризовались безопасным уровнем загрязнения, то после переноса в одних компонентах содержание загрязнителей может снизиться, а в других, напротив, увеличиться вплоть до опасного уровня. В связи с этим Директивой 2008/1/ЕС предусмотрен комплексный подход к предупреждению и контролю за выбросами в воздух, воду и почву, а также к обращению с отходами, обеспечению энергетической эффективности и предотвращению аварий. Такой подход также будет способствовать созданию равных условий для стран ЕС путем согласования требований к экологической результативности промышленных установок.

Директива 2008/98/ЕС об отходах ([Directive 2008/98/EC..., 2008](#)) устанавливает меры по защите окружающей среды и здоровья людей посредством предупреждения или сокращения образования отходов, отрицательного воздействия образования отходов и обращения с ними, а также посредством снижения уровня использования ресурсов и повышения эффективности такого использования, что имеет решающее значение для перехода к циркулярной экономике и для гарантии долгосрочной конкурентоспособности ЕС. Действие этой Директивы не распространяется (не считается отходами) на землю (на месте), в том числе на невыкопанную загрязненную почву под зданиями, неразрывно связанными с землей; незагрязненную почву и другие природные материалы, выкопанные при строительной деятельности, если определено, что минеральный материал будет использован в целях строительства в его природном состоянии на площадке, с которой он был выкопан. Согласно Решению Европейской Комиссии 2000/532/ЕС ([Commission Decision 2000/532/EC..., 2000](#)), отходами считается вынутый грунт с загрязненных площадок, а также отходы от рекультивации почвы.

Антропогенные воздействия на почву в отмеченных программах и Директивах ЕС рассматривались при изучении вопросов, непосредственно не связанных с почвой, таких как загрязне-

ние окружающей среды промышленными выбросами, размещение отходов производства и потребления ([Directive 2008/1/EC..., 2008](#); [Directive 2008/98/EC..., 2008](#) и др.). В целях поддержки перехода ЕС к циркулярной экономике и соблюдения требований Директивы 2008/98/ЕС ([Directive 2008/98/EC ..., 2008](#)) необходимо обеспечить прогрессивное сокращение депонирования отходов, в частности отходов, пригодных для переработки и других способов восстановления. Кроме того, важным является установление по отношению к отходам и полигонам строгих эксплуатационных и технических требований, мер, процедур и инструкций для предотвращения или уменьшения негативного влияния на окружающую среду, загрязнения поверхностных вод, грунтовых вод, почвы и воздуха, а также негативного влияния на окружающую среду в глобальном масштабе, включая парниковый эффект и любой риск для здоровья людей.

Одним из первых шагов по созданию циркулярной экономики является разработка Директивы ЕС 2019/904 о сокращении влияния некоторых пластиковых продуктов на окружающую среду ([Directive \(EU\) 2019/904..., 2019](#)), в рамках которой проектирование и производство пластмасс и пластмассовых изделий полностью соответствуют потребностям в повторном использовании, ремонте и переработке, планируется разрабатывать и продвигать более устойчивые материалы. Цели этой Директивы состоят в том, чтобы предотвратить и уменьшить воздействие определенных пластмассовых изделий на окружающую среду, в частности на водные объекты и здоровье человека, а также содействовать переходу к циркулярной экономике с инновационными и устойчивыми бизнес-моделями, продуктами и материалами, что также способствует эффективному функционированию внутреннего рынка.

С осознанием того, что нельзя отразить все аспекты, связанные с охраной почв, в документах ЕС, непосредственно не связанных с экологией этого компонента природной среды, была разработана “Тематическая стратегия защиты почв” (ТСЗП) ([Thematic Strategy for Soil Protection, 2006](#)). Ее необходимость была вызвана пониманием важности почвы как компонента природы и желанием предотвратить дальнейшую деградацию почв.

Согласно ТСЗП, почва подвержена ряду процессов деградации или угроз. К ним относятся эрозия, сокращение органического вещества, локальное и диффузное загрязнение, уплотнение, сокращение биоразнообразия, запечатывание, засоление, наводнения и оползни. Сочетание некоторых из этих угроз может в итоге привести к опустыниванию в засушливых или субаридных климатических условиях. Это также может нанести ущерб здоровью граждан ЕС и поставить под угрозу безопасность производства продуктов питания и кормов.

В “Седьмой Рамочной программе” (2007–2013 гг.) ТСЗП особое внимание уделено исследованию функций почв в рамках приоритетных областей: “Окружающая среда” и “Продовольствие, сельское хозяйство и биотехнология”.

В ноябре 2021 г. принята новая *“Почвенная стратегия до 2030 года. Использование преимуществ здоровых почв для людей, продуктов питания, природы и климата”*. Принципиально важным в новой “Почвенной стратегии” является то, что почве отводится роль ведущего звена в ресурсо-эффективной и циркуляционной экономике будущего. В документе отмечается, что почва является, возможно, самым большим рециркуляционным механизмом на планете: почва перерабатывает воду, органику и питательные вещества и может разлагать и фильтровать загрязнители. Новая “Почвенная стратегия” ставит широкий круг задач, которые сгруппированы в шесть разделов: 1. Введение и связи с другими инициативами ЕС. 2. Видение и задачи: достижение хорошего здоровья почв к 2050 г. 3. Почвы как ключ решения больших вызовов ЕС. 4. Предотвращение деградации почв и земель и восстановление здоровых почв. 5. Нам нужно больше знать о почвах. 6. Обеспечение перехода к здоровым почвам. В новой “Почвенной стратегии” важное место отводится устойчивому управлению почвенными ресурсами, развитию регенеративных подходов в сельском хозяйстве, вопросам адаптации к климатическим изменениям, задачам цифровизации и пропаганде почвенных знаний.

Согласно новой “Почвенной стратегии”, механизмы циркуляционной экономики распространяются как на поверхность земли с почвами, так и на почвенный минеральный материал, извлекаемый в процессе хозяйственной деятельности человека. В пер-

вом случае приоритет отдается безотходному использованию земли, по сравнению с “застройкой с нуля”. Это позволяет ограничить нагрузку на почвы при их перекрытии и значительно уменьшить изъятие земельных ресурсов. Перекрытие почв, происходящее при застройке, влечет за собой безвозвратную потерю их экосистемных услуг, подвергая города воздействию более высоких пиков паводков ([Pistocchi et al., 2015](#)) и более сильным эффектам теплового острова ([European Commission, 2012](#)).

Новая “Почвенная стратегия” развивает высказанную ранее идею ([The State of Food and Agriculture. Innovation in family farming, 2014](#)) о том, что земля и почвы – хрупкие и ограниченные ресурсы, подверженные постоянно растущему дефициту пространства: разрастание городов и запечатывание почв поглощают природу и превращают ценные экосистемы в бетонные пустыни. Это часто влияет на наиболее плодородные почвы и снижает потенциал обеспечения достойной жизни фермеров и лесоводов.

Страдая от повышенной уязвимости к экстремальным погодным явлениям и другим внешним факторам, некоторые государства-члены поставили цели по сокращению изъятия земель (например, Германия). Однако достигнутые результаты не одинаковы. Вторичное использование земель, а именно строительство или восстановление ранее застроенных территорий, составляет только 13.5% городской застройки в ЕС (в период с 2006 г. по 2012 г.), так что есть возможности для улучшения (вторичное использование площади земель и уплотнение). Фактически некоторые государства-члены достигли показателей вторичного использования в пределах 50–80%, показывая возможность устойчивого вторичного использования земель. Такой подход сохраняет природные территории для поддержания биоразнообразия, лесов и зеленых насаждений, почв для производства продуктов питания и производства биомассы, регулирования стока и атмосферных осадков. Следовательно, существует необходимость применения иерархии в землеустройстве, сценарии которой в последовательности от лучшего к худшему выглядят следующим образом:

1. Насколько возможно избегать изъятия и перекрытия земель.

2. Если избежать изъятия и перекрытия земель невозможно, то использовать ранее изъятые и запечатанные земли.

3. Если невозможно избежать изъятия и запечатывания земель, а также использовать ранее изъятые и перекрытые земли, то следует использовать худшие земли (некачественные леса, неплодородные сельскохозяйственные угодья и т. п.).

4. Если не удастся использовать худшие земли, то необходимо применить смягчающие или компенсационные меры, чтобы свести к минимуму потерю экосистемных услуг.

Для улучшения использования земель и уменьшения запечатывания почв в перспективе новая “Почвенная стратегия” сформулировала цель добиться в ЕС нулевого изъятия земли к 2050 г.

Как указано в новой “Почвенной стратегии”, для этого, в частности, государства-члены должны:

1. Установить к 2023 г. собственные амбициозные национальные, региональные и местные цели по сокращению изъятия земель в чистом выражении к 2030 г., чтобы внести ощутимый вклад в достижение цели ЕС к 2050 г., и регулярно отчитываться о проделанной работе.

2. Интегрировать “иерархию изъятия земель” в свои планы озеленения городов, отдать приоритет вторичному использованию и качеству городских почв на национальном, региональном и местном уровнях посредством соответствующих регуляторных инициатив и поэтапного отказа от финансирования проектов, которые противоречат этой иерархии, таких как местные налоговые льготы для преобразования сельскохозяйственных или природных земель в застроенную среду.

3. Предоставить руководства государственным органам и частным компаниям по уменьшению загрязнения почвы, в том числе передовой опыт местных инициатив по удалению искусственных поверхностей для восстановления функции почвенного дыхания, с пересмотром Руководства ЕС по герметизации почвы 2024 ([Руководство по лучшей практике, 2012](#)). Содействовать обмену передовой практикой, опираясь на опыт государств-членов или регионов, в которых есть системы пространственного планирования, которые успешно решают проблему изъятия земли с целью разработки общей методологии.

В плане осуществления новой “Почвенной стратегии” Комиссия ЕС берет на себя следующие обязательства:

1. Предложит определение изъятия земель в чистом выражении в “Законе о здоровых почвах”.

2. В рамках оценки воздействия, сформулированной в “Законе о здоровых почвах”, рассмотрит положение для отчетов государств-членов о прогрессе в достижении своих целей по изъятию земель.

3. В рамках оценки воздействия, сформулированной в “Законе о здоровых почвах”, рассмотрит варианты мониторинга и отчетности о прогрессе в достижении целевых показателей отсутствия изъятия земель в чистом выражении и внедрения иерархии изъятия на основе представленных данных.

В новой “Почвенной стратегии” рассматриваются возможности повторного использования почвенного минерального материала, отвалы которого образуются при различной хозяйственной деятельности (рытье траншей, котлованов, удаление поверхностной вскрыши в местах разработки карьеров полезных ископаемых, инженерная планировка территории и т. п.). При этом сообщается, что в большинстве своем минеральный материал почвенных выемок является незагрязненным, плодородным и здоровым, и его следует повторно использовать в том же или в другом подходящем месте. Если невозможно повторно использовать срезанный грунт, например, из-за неприемлемого уровня загрязнения, то такие грунты должны быть приоритетными для переработки или иной формы восстановления, в соответствии с иерархией мер по изъятию земель. Согласно новой “Почвенной стратегии” ([Soil Strategy..., 2021](#)), последние включают очередность этапов: избежать, использовать вторично, минимизировать, компенсировать.

С целью наиболее рационального и эффективного использования минерального материала почвенных выемок Комиссией ЕС предполагается выполнение следующих работ:

1. Изучать потоки минерального материала почвенных выемок, созданного, обработанного и повторно используемого в ЕС, и проводить сравнительный анализ рыночной ситуации в государствах-членах к 2023 г. Это должно дать полную картину ситуации в ЕС.

2. В рамках разработки “Закона о здоровых почвах” оценивать необходимость и потенциал юридически обязательных положений “паспорта почвенной выемки”, а также создать руководство, основанное на опыте государств-членов, по внедрению такой системы. Паспорт должен отражать количество и качество материала почвенной выемки, чтобы гарантировать ее транспортировку, обработку или повторное сохранное использование в другом месте ([European Commission, 2020](#)). С другой стороны, как следует из решения Европейской Комиссии 2000/532/ЕС от 3 мая 2000 г., грунт, вынутый с загрязненных площадок, является отходом, так же, как и отходы от рекультивации почв, содержащие опасные вещества.

## ВЫВОДЫ

За период с начала 90-х годов прошлого века по настоящее время подходы к ОРИП в ЕС прошли три стадии развития, которые характеризуются однотипными ценностными представлениями о почве и спецификой управленческих решений:

1) **ранняя** – формирование представления об опосредованной роли почв. Цели ОРИП не связаны непосредственно с почвами. Например, загрязнение почв анализировалось в связи со снижением уровня загрязнения атмосферного воздуха или размещения отходов производства и потребления. Отсутствие политики непосредственной защиты почв как самостоятельного компонента окружающей среды;

2) **промежуточная** – накопление знаний о значении деградации почв и их функциональности. Принятие ТСЗП. Принципиальное изменение политики ОРИП. Особое внимание уделено защите почв от деградации, вызванной физическими воздействиями (эрозия, уплотнение, запечатывание и др.). Оформление концепции поддержания экологических функций почв и их сервисных услуг. Фундаментальная ревизия представлений о важности здоровья почв для социально-экономического развития и качества жизни населения ЕС;

3) **зрелая** – разработка и принятие новой “*Почвенной стратегии 2030. Использование преимуществ здоровых почв для людей, продуктов питания, природы и климата*”. В контексте новой

“Почвенной стратегии” почва признана ценным ресурсом, ведущим звеном в ресурсо-эффективной и циркулярной экономике будущего. Признание почв в качестве ведущего рециркуляционного механизма на планете: почва перерабатывает воду, органику и питательные вещества и может разлагать и фильтровать загрязнители.

Необходимо отметить, что новая “Почвенная стратегия” уделяет особое внимание вопросам сохранения почв как жизненного пространственно-функционального ресурса. Эта цель достигается ограничением изъятия земель и запечатывания поверхности почв.

Среди целей новой “Почвенной стратегии” важное место отводится устойчивому управлению почвенными ресурсами, развитию регенеративных подходов в сельском хозяйстве, вопросам адаптации к климатическим изменениям, задачам получения новых почвенных данных, цифровизации и пропаганде почвенных знаний.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Земельный кодекс Российской Федерации от 25.10.2001 N 136-ФЗ.
2. Соколов М.С., Марченко А.И., Санин С.С., Торопова Е.Ю., Чулкина В.А., Захаров А.Ф. Здоровье почвы агроценозов как атрибут ее качества и устойчивости к биотическим и абиотическим стрессорам // Известия ТСХА. 2009. Вып. 1. С. 13–22.
3. Soil Strategy for 2030. Reaping the benefits of healthy soils for people, food, nature and climate SWD (2021) 323 final. Новая “Почвенная стратегия” ЕС до 2030 г. [https://ec.europa.eu/environment/publications/eu-soil-strategy-2030\\_en](https://ec.europa.eu/environment/publications/eu-soil-strategy-2030_en)
4. Commission Decision 2000/532/EC of 3 May 2000 replacing Decision 94/3/EC establishing a list of wastes pursuant to Article 1(a) of Council Directive 75/442/EEC on waste and Council Decision 94/904/EC establishing a list of hazardous waste pursuant to Article 1(4) of Council Directive 91/689/EEC on hazardous waste [EC (2001). URL: <https://base.garant.ru/71312232/>.
5. Communication from the Commission to the Council, the European parliament, the European economic and social committee and the committee of the regions. Thematic Strategy for Soil Protection [SEC(2006)620] [SEC(2006)1165]. URL: <https://eur-lex.europa.eu/legal->

[content/EN/TXT/?uri=celex%3A52006DC0231.](#)

6. Communication from the Commission to the European Parliament, The Council, The European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions EU. Soil Strategy for 2030. Reaping the benefits of healthy soils for people, food, nature and climate {SWD(2021) 323 final. URL: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/ALL/?uri=SWD:2021:323:FIN>.

7. Council Directive 1999/31/EC of 26 April 1999 on the landfill of waste. URL: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=celex%3A31999L0031>.

8. Council Directive 91/692/EEC of 23 December 1991 standardizing and rationalizing reports on the implementation of certain Directives relating to the environment. URL: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=celex%3A31991L0692>.

9. Directive 2003/4/EC of the European Parliament and of the Council of 28 January 2003 on public access to environmental information and repealing Council Directive 90/313/EEC. URL: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=celex%3A32003L0004>.

10. Directive 2004/35/CE of the European Parliament and of the Council of 21 April 2004 on environmental liability with regard to the prevention and remedying of environmental damage. URL: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=celex%3A32004L0035>.

11. Directive 2008/1/EC of the European Parliament and of the Council of 15 January 2008 concerning integrated pollution prevention and control (Codified version) (Text with EEA relevance). URL: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/ALL/?uri=CELEX%3A32008L0001>.

12. Directive 2008/98/EC of the European Parliament and of the Council of 19 November 2008 on waste and repealing certain Directives (Text with EEA relevance). URL:

<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=celex%3A32008L0098>.

13. Directive 2010/75/EU of the European Parliament and of the Council of 24 November 2010 on industrial emissions (integrated pollution prevention and control). URL:

<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=celex%3A32010L0075>.

14. Directive (EU) 2019/904 of the European Parliament and of the Council of 5 June 2019 on the reduction of the impact of certain plastic products on the environment (Text with EEA relevance). URL:

15. EU Biodiversity Strategy for 2030, key commitment 11 of the Nature restoration plan: “Cities with at least 20,000 inhabitants have an ambitious Urban Greening Plan” by 2030. URL:

16. EU principles for sustainable raw materials European Commission, Directorate-General for Internal Market, Industry, Entrepreneurship and

- SMEs, EU principles for sustainable raw materials, Publications Office, 2021. URL: <https://data.europa.eu/doi/10.2873/12856>.
17. European Commission, 2012. In depth report: soil sealing. URL: [https://ec.europa.eu/environment/archives/soil/pdf/sealing/Soil%20Sealing%20In-depth%20Report%20March%20version\\_final.pdf](https://ec.europa.eu/environment/archives/soil/pdf/sealing/Soil%20Sealing%20In-depth%20Report%20March%20version_final.pdf).
18. European Academies Science Advisory Council, 2018. Opportunities for soil sustainability in Europe. URL: <https://www.leopoldina.org/publikationen/detailansicht/publication/opportunities-for-soil-sustainability-in-europe-2018/>.
19. European Commission, 2020. Study to support the preparation of Commission guidelines on the definition of backfilling. URL: <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/f82900fe-9fc2-11ea-9d2d-01aa75ed71a1/language-en>.
20. Gardi C., Panagos P., Van Liedekerke M., Bosco C., de Brogniez D. Land take and food security: assessment of land take on the agricultural production in Europe // Journal of Environmental Planning and Management. 2014. Vol. 58. Iss. 5. P. 898–912. DOI: [10.1080/09640568.2014.899490](https://doi.org/10.1080/09640568.2014.899490).
21. Guidelines on best practice to limit, mitigate or compensate soil sealing, Commission Staff Working Document, 2012. 101. URL: <https://www.eea.europa.eu/policy-documents/guidelines-on-best-practice-to>.
22. Land recycling and densification – EEA. URL: <https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/indicators/land-recycling-and-densification/assessment-1>.
23. Pistocchi A. et al. Soil sealing and flood risks in the plains of Emilia-Romagna, Italy // Journal of Hydrology: Regional Studies. 2015. Vol. 4. Part B. P. 398–409. DOI: [10.1016/j.ejrh.2015.06.021](https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2015.06.021).
24. The State of Food and Agriculture. Innovation in family farming. FAO UN, Rome, 2014. 139 p.
25. Toth G., Montanarella L., Stolbovoy V., Mate F., Bodis K., Jones A., Panagos P., Van Liedekerke M. Soils of the European Union, Publications Office, 2014, DOI: [10.2788/87029](https://doi.org/10.2788/87029).

## REFERENCES

1. *Zemel'nyi kodeks Rossiiskoi Federatsii ot 25.10.2001 N 136-FZ* (Land Code of the Russian Federation of 25.10.2001 N 136-FZ).
2. Sokolov M.S., Marchenko A.I., Sanin S.S., Toropova E.Y., Chulkina V.A., Zakharov A.F., Soil health of agroecosystems as an attribute of its quality and resistance to biotic and abiotic stressors, *Izvestiya TSKhA*, 2009, Vol. 1, pp. 13–22.

3. Soil Strategy for 2030. Reaping the benefits of healthy soils for people, food, nature and climate SWD (2021) 323 final. Новая “Почвенная стратегия” ЕС до 2030 г. [https://ec.europa.eu/environment/publications/soil-strategy-2030\\_en](https://ec.europa.eu/environment/publications/soil-strategy-2030_en)
4. Commission Decision 2000/532/EC of 3 May 2000 replacing Decision 94/3/EC establishing a list of wastes pursuant to Article 1(a) of Council Directive 75/442/EEC on waste and Council Decision 94/904/EC establishing a list of hazardous waste pursuant to Article 1(4) of Council Directive 91/689/EEC on hazardous waste EC (2001), URL: <https://base.garant.ru/71312232/>.
5. Communication from the Commission to the Council, the European parliament, the European economic and social committee and the committee of the regions, Thematic Strategy for Soil Protection [SEC(2006)620] [SEC(2006)1165], URL: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=celex%3A52006DC0231>.
6. Communication from the Commission to the European Parliament, The Council, The European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions EU, Soil Strategy for 2030, Reaping the benefits of healthy soils for people, food, nature and climate SWD(2021) 323 final, URL: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/ALL/?uri=SWD:2021:323:FIN>.
7. Council Directive 1999/31/EC of 26 April 1999 on the landfill of waste, URL: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=celex%3A31999L0031>.
8. Council Directive 91/692/EEC of 23 December 1991 standardizing and rationalizing reports on the implementation of certain Directives relating to the environment, URL: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=celex%3A31991L0692>.
9. Directive 2003/4/EC of the European Parliament and of the Council of 28 January 2003 on public access to environmental information and repealing Council Directive 90/313/EEC, URL: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=celex%3A32003L0004>.
10. Directive 2004/35/CE of the European Parliament and of the Council of 21 April 2004 on environmental liability with regard to the prevention and remedying of environmental damage, URL: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=celex%3A32004L0035>.
11. Directive 2008/1/EC of the European Parliament and of the Council of 15 January 2008 concerning integrated pollution prevention and control (Codified version) (Text with EEA relevance), URL: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/ALL/?uri=CELEX%3A32008L0001>.
12. Directive 2008/98/EC of the European Parliament and of the Council of 19 November 2008 on waste and repealing certain Directives (Text with EEA

relevance), URL:

<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=celex%3A32008L0098>.

13. Directive 2010/75/EU of the European Parliament and of the Council of 24 November 2010 on industrial emissions (integrated pollution prevention and control), URL:

<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=celex%3A32010L0075>.

14. Directive (EU) 2019/904 of the European Parliament and of the Council of 5 June 2019 on the reduction of the impact of certain plastic products on the environment (Text with EEA relevance), URL: <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2019/904/oj>.

15. EU Biodiversity Strategy for 2030, key commitment 11 of the Nature restoration plan: “Cities with at least 20,000 inhabitants have an ambitious Urban Greening Plan” by 2030, URL: [https://ec.europa.eu/environment/strategy/biodiversity-strategy-2030\\_en#:~:text=The%20EU's%20biodiversity%20strategy%20for,contains%20specific%20actions%20and%20commitments](https://ec.europa.eu/environment/strategy/biodiversity-strategy-2030_en#:~:text=The%20EU's%20biodiversity%20strategy%20for,contains%20specific%20actions%20and%20commitments).

16. EU principles for sustainable raw materials European Commission, Directorate-General for Internal Market, Industry, Entrepreneurship and SMEs, EU principles for sustainable raw materials, Publications Office, 2021, URL: <https://data.europa.eu/doi/10.2873/12856>.

17. European Commission, 2012, In depth report: soil sealing, URL: [https://ec.europa.eu/environment/archives/soil/pdf/sealing/Soil%20Sealing%20In-depth%20Report%20March%20version\\_final.pdf](https://ec.europa.eu/environment/archives/soil/pdf/sealing/Soil%20Sealing%20In-depth%20Report%20March%20version_final.pdf).

18. European Academies Science Advisory Council, 2018, Opportunities for soil sustainability in Europe, URL:

<https://www.leopoldina.org/publikationen/detailansicht/publication/opportunities-for-soil-sustainability-in-europe-2018/>.

19. European Commission, 2020, Study to support the preparation of Commission guidelines on the definition of backfilling, URL:

<https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/f82900fe-9fc2-11ea-9d2d-01aa75ed71a1/language-en>.

20. Guidelines on best practice to limit, mitigate or compensate soil sealing, Commission Staff Working Document, 2012, 101, URL: <https://www.eea.europa.eu/policy-documents/guidelines-on-best-practice-to>.

21. Land recycling and densification – EEA, URL: <http://www.eea.europa.eu/data-and-maps/indicators/land-recycling-and-densification/assessment-1>.

22. Pistocchi A. et. al., Soil sealing and flood risks in the plains of Emilia-Romagna, Italy, *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 2015, Vol. 4, Part B, pp. 398–409, DOI: [10.1016/j.ejrh.2015.06.021](https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2015.06.021).

23. Gardi C., Panagos P., Van Liedekerke M., Bosco C., de Brogniez D., Land take and food security: assessment of land take on the agricultural production in Europe, *Journal of Environmental Planning and Management*, 2014, Vol. 58, Iss. 5, pp. 898–912, DOI: [10.1080/09640568.2014.899490](https://doi.org/10.1080/09640568.2014.899490).
24. The State of Food and Agriculture, Innovation in family farming, FAO UN, Rome, 2014, 139 p.
25. Toth G., Montanarella L., Stolbovoy V., Mate F., Bodis K., Jones A., Panagos P., Van Liedekerke M., *Soils of the European Union*, Publications Office, 2014, DOI: [10.2788/87029](https://doi.org/10.2788/87029).

УДК 631.4

DOI: 10.19047/0136-1694-2022-110-114-147



### Ссылки для цитирования:

Борисочкина Т.И., Котельникова А.Д., Рогова О.Б. Массоперенос химических элементов и их соединений в агроценозах // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2022. Вып. 110. С. 114-147. DOI: 10.19047/0136-1694-2022-110-114-147

### Cite this article as:

Borisochkina T.I., Kotelnikova A.D., Rogova O.B., The mass transfer of chemical elements and of their compounds in agrocenoses, Dokuchaev Soil Bulletin, 2022, V. 110, pp. 114-147, DOI: 10.19047/0136-1694-2022-110-114-147

### Благодарность:

Работа выполнена по теме НИР № 0439-2022-0010 “Изучить элементный состав системы почва – растение как фактор-индикатор состояния агроценоза и дисбаланс как критерий рисков химической деградации почв”.

### Acknowledgments:

The work was performed on the topic of the research No. 0439-2022-0010 “To study the elemental composition of the system soil – plant as a factor-indicator of the state of the agrocenosis and imbalance as a criterion of the risks of soil chemical degradation”.

## Массоперенос химических элементов и их соединений в агроценозах

© 2022 г. Т. И. Борисочкина\*, А. Д. Котельникова, О. Б. Рогова

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

\* <https://orcid.org/0000-0001-6123-4407>, e-mail: [geotibor@gmail.com](mailto:geotibor@gmail.com).

*Поступила в редакцию 19.04.2022, после доработки 26.04.2022,  
принята к публикации 24.05.2022*

**Резюме:** Проведен обзор и анализ литературных источников, освещающих массоперенос химических элементов в агроценозе в системе почва – растение. Рассмотрены отечественные и зарубежные методики оценки содержания подвижных форм химических соединений, поступающих из почвы в растения. Охарактеризованы явления антагонизма и синергизма, указано на необходимость их учета при

планировании внесения удобрений. Показано, что явления синергизма и антагонизма элементов могут быть использованы в земледелии для регулирования поступления тяжелых металлов или радионуклидов в сельскохозяйственную продукцию. Дан анализ балансовой модели массопереноса химических элементов в агроценозе. Показано, что внесение органических удобрений в почву в большинстве случаев приводит к положительному балансу микроэлементов в агросистеме. Вынос микроэлементов сельскохозяйственными культурами увеличивается при применении минеральных удобрений в дозах, оптимальных для возделывания культур в данном регионе. В ряде случаев поступление тяжелых металлов с техногенными выпадениями может превосходить вынос металлов растениями из почвы, что может явиться причиной аккумуляции металлов в системе. На незагрязненных фоновых территориях уровни поступления микроэлементов из удобрений и атмосферных выпадений в агроценозах сопоставимы.

**Ключевые слова:** массоперенос, почва, растение, агроценоз, балансовая модель, синергизм, антагонизм.

## The mass transfer of chemical elements and of their compounds in agrocenoses

© 2022 T. I. Borisochkina\*, A. D. Kotelnikova, O. B. Rogova

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

*\*<https://orcid.org/0000-0001-6123-4407>, e-mail: [geotibor@gmail.com](mailto:geotibor@gmail.com).*

*Received 19.04.2022, Revised 26.04.2022, Accepted 24.05.2022*

**Abstract:** The analysis of publications on the mass transfer of chemical elements in agrocenosis in the soil – plant system was carried out. Methods for estimating the content of mobile forms of chemical compounds coming from the soil into plants are considered. The phenomena of antagonism and synergism are characterized, and the necessity to consider them while planning fertilizer application is indicated. It is shown that the phenomena of synergism and antagonism of elements can be used in agriculture to regulate the flow of heavy metals or radionuclides into agricultural products. A balance model for mass transfer of chemical elements in agrocenosis is analyzed. It is shown that the introduction of organic fertilizers in soil mostly leads to a positive balance of microelements in the agrosystem. To characterize the efficiency of fertilizer use an assessment of the balance of nutrients in the agrosystem is required. The removal of trace elements by agricultural crops

increases with the use of mineral fertilizers in doses that are optimal for the cultivation of crops in the region. In some cases, the input of heavy metals with technogenic fallout may exceed the removal of metals by plants from the soil. It may cause the accumulation of metals in the system. In uncontaminated background areas, the levels of microelement intake from fertilizers and atmospheric fallout in agrocenoses are comparable.

**Keywords:** mass transfer, soil, plant, agrocenosis, balance model, synergism, antagonism.

## ВВЕДЕНИЕ

Хозяйственная деятельность человека часто является причиной химической деградации почв агроценозов. Для разработки критериев оценки деградации необходимо целостное понимание механизмов, протекающих внутри агроэкосистемы. В представленной работе анализируется перемещение химических элементов в звене биогеохимического круговорота (в системе почва – сельскохозяйственная культура), рассматривается массоперенос химических компонентов, поступающих из почвы в растения и вынос их с растительной продукцией.

Сведения о миграции химических элементов и их соединений в системе почва – растение представляют интерес для исследования процессов, в которых перемещению химических элементов придается важное экологическое значение ([Ильин, 2006](#)). При этом необходимо отметить, что функционирование агроценозов значительно отличается от характера функционирования естественных экосистем. В агроэкосистеме отчуждается 20–80% от всей биопродукции, что приводит к разомкнутости круговорота химических элементов и изменению в системе баланса вещества и энергии, в то время как природная экосистема функционирует самостоятельно и является саморегулируемой системой, в которой биологические круговороты большинства химических элементов близки к замкнутому типу ([Ковда, 1981](#); [Фокин, 1988](#)).

Целью работы являлось обобщение информации, характеризующей круговорот и массоперенос химических элементов в агроэкосистеме, анализ использования балансовой модели при прогнозировании выноса и аккумуляции металлов в почвах агроценоза, рассмотрение явлений антагонизма и синергизма элементов в поч-

ве при их поступлении в растения, анализ методов оценки подвижных форм соединений химических элементов, участвующих в массопереносе, учет которых необходим для получения экологически безопасной продукции и грамотного использования удобрений.

## ПОДВИЖНОСТЬ ХИМИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ В ПОЧВАХ АГРОЦЕНОЗОВ И МЕТОДЫ ОЦЕНКИ ИХ ДОСТУПНОСТИ ДЛЯ РАСТЕНИЙ

Основные транспортные потоки доступных для поглощения растениями веществ, приводящие к их вертикальному перемещению и перераспределению по почвенному профилю, происходят в рамках биологического круговорота по проводящим системам живых растений ([Фокин, 1999](#); [Фокин, 2004](#)). При этом абиотические транспортные потоки перемещения растворенных веществ через поровое пространство имеют подчиненное значение ([Фокин, 1999](#); [Фокин, Торшин, 2020](#)). В то же время зафиксировано наличие диффузионной и конвективно-диффузионной миграции Cd, Zn, Cu, Fe, Co, Ni в почвах, длительно орошаемых природными и сточными водами, установлены величины коэффициентов диффузии этих элементов (наиболее высокие значения скорости диффузии зарегистрированы у Cd). Для всех элементов параметры диффузии увеличивались с ростом валового содержания элемента и с ростом засоленности почв и оросительных вод ([Фрид и др., 2014](#); [Фрид и др., 2016](#)).

В дерново-подзолистой почве под влиянием избыточного увлажнения зафиксировано изменение ее физико-химических свойств (снижение ОВП, изменение pH), что повлекло за собой изменение фракционного состава металлов с переменной валентностью и увеличение содержания металлов в подвижных фракциях (водорастворимых, обменных, связанных с органическим веществом и аморфными соединениями железа). Параллельно с этим происходило снижение концентраций металлов в остаточной фракции и фракции, связанной с окристаллизованными соединениями железа. Увеличение подвижных соединений элементов в почвах увеличивает потенциальную способность их миграции в сопредельные среды ([Плеханова, 2007](#)). Водорастворимые и об-

менные фракции представляют собой наиболее подвижные и биологически доступные формы соединений металлов в почвах ([Ладонин, 2019](#)).

Одной из важнейших практических задач агрохимии, почвоведения, экологии и других дисциплин, связанных с природопользованием, является оценка количественного участия и роли отдельных соединений или групп соединений в поступлении различных элементов минерального питания и токсичных веществ в растения через их корневые системы ([Фокин, Торшин, 2020](#)). Почва и растения связаны набором обратных связей, откликов, оказывают влияние друг на друга на различных уровнях взаимодействия, включая изменения в элементном составе ([Ehrenfeld et al., 2005](#)).

Сложность почвенной минеральной матрицы, влияние целого ряда факторов, взаимное влияние элементов друг на друга значительно затрудняют исследования. Отсутствие сбалансированности содержания макро- и микроэлементов может являться причиной низкой продуктивности агроценозов и низкого качества сельскохозяйственной продукции ([Han et al., 2011](#)). Основными факторами, определяющими поведение элементов в почве, являются рН, содержание и характер органического вещества, емкость катионного обмена, гранулометрический состав. Различные типы почв могут значительно отличаться по преобладанию определенных индивидуальных, контрастных фаз-носителей металлов: карбонатов, (гидр)оксидов железа и марганца, глинистых минералов и гумусовых веществ ([Shan, Chen, 1993](#)). Помимо этого, следует принимать во внимание роль специфических почвенных процессов, способных влиять на процессы сорбции-десорбции элементов. Так в результате образования конкреций может снижаться содержание доступных для растений форм микроэлементов, вплоть до вывода части из них из биологического круговорота ([Тимофеева, 2018](#)). Последствия интегрального воздействия этих факторов химической и физической природы на элементный состав должны также изучаться комплексом дополняющих друг друга химических и физических методов.

Исследование транспортных потоков в агроценозах (массопереноса) предполагает проведение анализа и оценки наиболее

активной части химических соединений, участвующих в переносе элементов из почвы в растения. Валовое содержание элементов в почве не является достаточно информативным показателем для оценки обеспеченности ими растений ([Siromlya, 2009](#)). Мобильность и доступность питательных элементов в почвах агроэкосистем, в том числе поступающих с удобрениями, в значительной степени регулируется динамическими процессами, протекающими в почве ([Dhaliwal et al., 2019](#)). Оценка содержания доступных форм элементов, наличия связи с компонентами почвы и прочности этих связей позволяет получить представление о запасе элементов, которые могут вовлекаться в биологический круговорот.

Возможности оценки доступности элементов для растений определяются несколькими подходами, такими как: 1) корреляция между пулом подвижных форм элементов в почве, определенных методами одиночной или последовательной экстракции, и их аккумуляцией в растениях; 2) модель активности свободных ионов (free ion activity model (FIAM)); 3) модель наземного биотического лиганда (terrestrial biotic ligand model (TBLM)); 4) модель диффузионных градиентов в тонких пленках (the diffusive gradients in thin films (DGT)); 5) метод изотопного разбавления (меченые атомы) ([Feng et al., 2005](#); [Кульнев и др., 2020](#)). При этом необходимо отметить, что содержание подвижных форм элементов может зависеть от гидрологических условий ([Плеханова, 2007](#)), климатических факторов, и в значительной степени может варьировать в зависимости от сезонов года ([Гайдукова и др., 2000](#)). Несмотря на то, что для отдельных элементов и видов растений могут наблюдаться четко коррелирующие зависимости в соотношении концентраций элементов в почве и органах растений, на сегодняшний день не существует метода экстракции, который мог бы релевантно отражать поступление элементов в растения из почвы для всех элементов, почв всех типов и всех видов растений ([Reimann et al., 2015](#)).

Тем не менее, методы одиночной и последовательной экстракции активно используются при изучении форм нахождения элементов в почвах, проводятся апробирования методик их определения на различных объектах и предлагаются новые подходы ([Menzies et al., 2007](#); [Rao et al., 2008](#); [Ple Khanova, Bambusheva,](#)

[2010](#); [Ivezic et al., 2013](#); [Hosseinpur, Motaghian, 2015](#)).

В настоящее время для оценки содержания доступных для растений подвижных форм химических элементов в почве наиболее широко используется их экстрагирование различными реагентами. Эти подходы внедрены в системе Агрохимслужбы, а также находят применение при проведении эколого-геохимических исследований. При определении подвижных форм фосфора и калия для кислых почв Нечерноземной зоны стандартом в России является метод Кирсанова, который основан на извлечении подвижных фосфатов из почвы 0.2 н. раствором HCl. Для некарбонатных почв лесостепной и степной зон стандартом определения подвижных соединений фосфора и калия является метод Чирикова, основанный на извлечении фосфора и калия 0.5 н. раствором уксусной кислоты. Подвижные соединения фосфора и калия в карбонатных почвах определяют по методу Мачигина, в котором в качестве экстрагента используется углекислый аммоний. В странах Балтии для извлечения подвижных соединений фосфора используется смесь молочной и уксусной кислот, забуференных уксуснокислым аммонием до pH 3.7 (метод Эгнера–Рима–Доминго) ([Большаков и др., 2004](#)). Широкое распространение за рубежом при определении подвижных форм фосфора нашел метод Олсена, в котором в качестве экстрагента используется 0.5 н. раствор  $\text{NaHCO}_3$  (pH 8.5) ([Христенко, Иванова, 2011](#); [Horta, Torrent, 2007](#)). Метод рекомендован для анализа кислых, нейтральных и карбонатных почв. В последнее время он все чаще используется в России на территориях с высокой пестротой почвенного покрова.

Для характеристики обеспеченности почв микроэлементами в отечественной агрохимической практике получил широкое распространение метод экстракции ацетатно-аммонийным буферным раствором (pH 4.8) по Крупскому–Александровой. При этом ацетатно-аммонийный буфер используется как групповой экстрагент для различных элементов. Известными, но реже используемыми в силу большей трудоемкости, являются методы извлечения микроэлементов индивидуальными экстрагентами, разработанными Пейве и Ринькисом для характеристики содержания подвижных микроэлементов в почве и оценки обеспеченности ими растений ([Методические указания..., 1976](#)).

В настоящее время продолжают исследования и поиски новых методов, применение которых будет наиболее адекватно отражать коррелятивные зависимости между концентрацией подвижных элементов в почве и их содержанием в растениях ([Feng et al., 2005](#); [Fang et al., 2007](#); [Menzies et al., 2007](#); [Rao et al., 2008](#); [Ivezić et al., 2013](#); [Hosseinpur, Motaghian, 2015](#)). Одним из рассматриваемых вариантов является метод экстракции смесью низкомолекулярных органических кислот, имитирующей состав растительных экссудатов и метаболитов микроорганизмов (смесь сантимолярной уксусной, молочной, лимонной, яблочной, муравьиной кислот, взятых в соотношении 4 : 2 : 1 : 1 : 1) из образцов ризосферной части почвы и почвы в целом (RHIZO и A-RHIZO) ([Feng et al., 2005](#); [Fang et al., 2007](#)). В результате применения данного метода показаны достоверные корреляции между содержанием подвижных форм Cu, Cd, Zn в почве и содержанием этих элементов в корнях пшеницы на кислых, нейтральных и слабощелочных почвах (для Ni и Pb использование данного метода не показало столь успешного результата ([Feng et al., 2005](#))). При работе с почвенными пробами с естественной влажностью экстракция смесью низкомолекулярных кислот позволила получить более высокие коэффициенты корреляции ([Fang et al., 2007](#)). На основании анализа полученных результатов с применением множественной регрессии данный метод экстракции в большинстве случаев не требовал включения в уравнения параметров свойств почв для улучшения предсказуемости содержания элементов в корнях пшеницы.

Проведены исследования ЭДТА как экстрагента для определения биодоступности микроэлементов в системе почва – растение. При этом учитывалось, что ЭДТА является сильным хелатирующим компонентом, который, удаляет металлы, связанные с органическими компонентами почв, и частично металлы в оксидах и вторичных глинистых минералах. Результаты экстракции ЭДТА показывали достоверные коррелятивные зависимости с поглощением металлов растениями на кислых почвах, но явились неприменимым показателем доступности микроэлементов для щелочных и нейтральных почв ([Feng et al., 2005](#); [Ivezić et al., 2013](#)). Следует отметить, что в настоящее время не существует

метода, признанного универсальным для оценки биодоступности тяжелых металлов в почвах.

Временами для оценки сбалансированности массопереноса химических элементов из почвы в растения и обеспеченности сельскохозяйственных культур макро- и микроэлементами используется *метод листовой диагностики*. Ильиным В.Б. (1985) отмечается ряд недостатков этого метода, наиболее значимыми из которых являются следующие: 1) метод не дает возможности различать истинный дефицит элемента в почве от дефицита в питании растений, обусловленного антагонизмом с другими элементами; 2) не позволяет установить точные дозы удобрений, которые следует внести для корректировки дефицита в конкретных почвенных условиях (Ильин, 1985). Эти недостатки решаются комплексным подходом, сочетающим растительную диагностику и анализ почв, желательность которого подчеркивали и разработчики метода, в том числе и В.В. Церлинг, которой были обобщены основные наработки отечественных и зарубежных исследователей в этом направлении (Церлинг, 1978).

Обеспеченность растений элементами питания можно осуществлять, контролируя интенсивность биохимических процессов. А.С. Плешков и Б.А. Ягодин (1982) разработали метод диагностики питания растений по измерению фотохимической активности хлоропластов. Для диагностики авторы использовали определение фотохимической активности суспензии хлоропластов из средней пробы листьев исследуемых образцов. В суспензию добавляли диагностируемые элементы минерального питания, недостаток элемента устанавливали по увеличению, а избыток – по уменьшению фотохимической активности, по сравнению с контрольной суспензией. Содержание диагностируемых элементов в питательной среде корректировалось по соотношению, пропорциональному фотохимической активности. Метод позволяет определить потребность растений в 12–15 макро- и микроэлементах питания и дать рекомендации по проведению корневых и некорневых подкормок растений. Он расширяет диапазон диагностируемых элементов и повышает эффективность использования растениями минеральных элементов путем прямого установления их недостатка или избытка.

## СИНЕРГИЗМ, АНТАГОНИЗМ, ТОКСИЧНОСТЬ ХИМИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ ПРИ ПОСТУПЛЕНИИ ИЗ ПОЧВЫ В РАСТЕНИЯ

Полученные представления о доступности питательных элементов в почве не всегда дают возможность достоверно оценить количество элементов, которое будет поглощено растением. Одним из факторов, объясняющих неопределенность в этом вопросе, являются возникающие при взаимодействии элементов между собой явления *синергизма* и *антагонизма*. Для синергизма характерно положительное взаимодействие между двумя и более элементами, приводящее к поглощению растением бóльшего количества элементов. Взаимодействие между элементами, приводящее к уменьшению поглощения одного или нескольких элементов, называется антагонизмом ([Malvi, 2011](#)). Синергизм и антагонизм во многом объясняют отсутствие четких корреляционных связей между содержаниями элементов, находящихся в почве, и концентрациями элементов, поступающих в растения. Эти явления осложняют определение доз удобрений, которые необходимо внести для восполнения дефицита элементов питания, так как при совместном внесении возможны негативные последствия взаимодействия элементов, что необходимо учитывать при создании оптимизированных систем питания растений ([Ринькис и др., 1989](#); [Кулаковская, 1990](#)). Явления синергизма и антагонизма между элементами в растениях непостоянны. Они возникают и меняют свой характер в зависимости от фазы развития растений, метеорологических условий ([Зубкова, 2004](#)). Характер взаимодействия между элементами зависит от свойств почвы, варьирует под воздействием внешних факторов, концентраций и пропорций контактирующих элементов ([Malvi, 2011](#)).

Сбалансированность химического состава внутри живых организмов – основное условие их нормального роста и развития, а реакции взаимодействия элементов могут служить причиной химических стрессов у растений ([Kabata-Pendias, 2011](#)). Наличие информации о взаимодействии питательных веществ может способствовать эффективному внесению удобрений и получению высоких урожаев ([Rietra et al., 2017](#)). Существуют методы, при которых явления антагонизма и синергизма элементов выявляются на ос-

новании оценки урожайности ([Rietra et al., 2017](#)). Однако использование урожайности как показателя может быть необоснованно, поскольку при одной и той же величине урожая может различаться структура получаемой продукции (например, мелкие и крупные семена). Также увеличение урожая не свидетельствует о сохранении при этом его качества, которое может снижаться по химическому и биохимическому составу ([Ельников, Рогова, 2017](#)).

Возможность оценить явления синергизма и антагонизма в основном дают модельные эксперименты, проводимые в лабораторных или полевых условиях, при которых исследуются изменения в поведении одних элементов при добавлении в среду других. Данные подобных экспериментов, проведенные Ринькисом с коллегами, позволили сделать вывод, что “поглощение всех элементов минерального питания растениями находится в тесной взаимосвязи” и “повышение концентрации какого-либо элемента в субстрате приводит к увеличению его концентрации в растении” ([Ринькис и др., 1989](#)). При этом концентрации элементов должны находиться в зоне оптимума, иначе превышение оптимального значения (избыток элемента) может приводить к снижению поглощения других элементов (антагонизм), тогда как компенсация дефицита элемента может способствовать поглощению прочих элементов (синергизм).

В результате проведения ряда экспериментов В.В. Степанок ([2003](#)) выделил некоторые закономерности взаимодействия элементов: элементы, входящие в одну группу периодической системы, проявляют антагонизм друг к другу; элементы, входящие в состав соседних групп, проявляют синергизм. Также отмечается, что указанные закономерности более ярко выражены для элементов главных подгрупп, и сила взаимодействия больше для элементов, которые сильнее различаются по химической активности ([Степанок, 2003](#)).

Изменениям во взаимодействии элементов может способствовать проведение различных мелиоративных мероприятий. Так показано, что увеличение концентрации кальция в почвенном растворе в результате известкования может способствовать проявлению антагонизма среди металлов, таких как Sr, Ba, Ra ([Алексеев, 1987](#)). Вследствие возникающей конкуренции за места поглоще-

ния на поверхности корней содержание данных элементов в растениях оказывается меньше, чем на почвах без известкования. Известкование приводит к уменьшению содержания в растениях большинства тяжелых металлов, однако щелочные значения pH влекут за собой увеличение доступности Сг и Мо. В целом синергизм и антагонизм элементов может быть использован в земледелии для регулирования поступления тяжелых металлов или радионуклидов в сельскохозяйственную продукцию и, как следствие, влиять на круговорот элементов ([Минеев, 2008](#)).

Взаимосвязь между калием и магнием в тканях растений может быть антагонистической или синергической в зависимости от вида растения и его возраста. Существуют синергические эффекты калия и магния на фотосинтез, транспорт и распределение углеводов, а также азотистый обмен. Антагонистическое действие калия на магний сильнее, чем магния на калий, что указывает на необходимость сбалансированного использования удобрений ([Xie et al., 2021](#)). Обнаружено антагонистическое действие меди на поступление молибдена в семена рапса ([Торшин, 1998](#)). Установлено влияние селена на увеличение содержания азота в зерне ячменя при двойной дозе внесения удобрений (2NPK) ([Долгодворова, Воронина, 2014](#); [Воронина и др., 2018](#)). Под действием кадмия снижались темпы накопления азота, фосфора и калия, под действием цинка снижались темпы накопления калия ([Зубкова, 2004](#)).

Исследованиями показано, что загрязнение почвы фтором явилось причиной нарушения интенсивности окислительно-восстановительных и гидролитических процессов, вследствие чего в почве произошло увеличение содержания восстановленных форм азота. Повышение дозы фтора в почве способствовало усилению поступления азота в растения ([Краснова и др., 1989](#)). При этом обменный кальций и магний являются основными компонентами почв, которые ограничивают избыточное поступление фтора в растения ([Борисочкина и др., 1991](#)).

Загрязнение среды свинцом приводит к ухудшению питания растений фосфором, а так как почвы Нечерноземной зоны России часто требуют внесения фосфорных удобрений, то, следовательно, присутствие в почве повышенных концентраций свинца предполагает необходимость внесения дополнительных доз фосфорных

удобрений ([Торшин, 1998](#)).

Зафиксированы явления антагонизма цинка и железа. Избыток цинка ведет к заметному снижению содержания железа в растениях. С другой стороны, железо снижает поступление цинка в растения и токсичность уже поглощенного цинка ([Kabata-Pendias, 2011](#); [Di Gioia et al., 2019](#)). Поглощение и перенос железа в органах растений во многом зависит от специфических особенностей растений, а также от почвенных параметров, наибольшее значение из которых имеют рН, содержание кальция и фосфора, а также соотношение содержаний некоторых тяжелых металлов. Симптомы железистой токсичности проявляются по-разному в зависимости от вида и стадии развития растений. Наиболее отчетливо фиксируемым признаком токсичности является величина отношения железа к другим тяжелым металлам (в частности Fe/Mn) ([Kabata-Pendias, 2011](#)).

Фосфор и цинк входят в число лимитирующих факторов, оказывающих негативное влияние на разбалансированность питания сельскохозяйственных культур, что следует учитывать при оценке эффективного плодородия почв и прогнозировании качества продукции. Однако совместное взаимодействие этих элементов на определенном уровне может быть антагонистичным. Повышенное применение фосфорных удобрений влечет за собой более медленное усвоение цинка растениями и даже приводит к его дефициту, что является причиной снижения урожайности ([Aboyeji et al., 2020](#)). Разработаны диагностические показатели, характеризующие возможные поражения хлорозом листьев кукурузы (выращенной на черноземе обыкновенном), вызванного нарушением соотношения фосфора и цинка. Разработанные параметры характеризуют критические уровни соотношения подвижного фосфора (метод Мачигина) и подвижного цинка (экстракция ацетатно-аммонийным буфером, рН 4.8) в почве. При соотношении P/Zn > 9 возможен хлороз растений. Нормальное развитие растений наблюдается при соотношении P/Zn в интервале 4–6 ([Аштаб, 1994](#); [Аштаб, Ельников, 1994](#)).

Сбалансированность валовых содержаний тяжелых металлов в почвах необходимо учитывать при выявлении специфических особенностей территориальных факторов, определяющих

изменение направленности токсикологической опасности под влиянием антропогенных воздействий или природных процессов. Результаты указывают на высокие индикаторные свойства показателей соотношения содержаний Fe, SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> на обследованных почвах, которые можно использовать для оценки токсикологической опасности в отношении тяжелых металлов ([Ельников, Рогова, 2015](#)). Явление токсичности возникло вследствие нарушения человеком систем саморегуляции и динамического равновесия, существовавшего в естественных биогеохимических циклах. Абсолютно токсичных элементов не существует, существуют только дозы, способные вызывать токсический эффект. Одинаково опасным является отклонение концентраций в обе стороны от оптимума ([Коробова, 2020](#)).

При этом результаты, получаемые для конкретных сельскохозяйственных культур, должны проверяться и на других видах, так как поступление элементов в растения, а значит и их вынос из почвы, в значительной степени определяется видовыми особенностями ([Протасова, 2005](#)). Отдельные таксоны могут различаться по потребности и возможности усвоения элементов, по способности поддерживать определенные диапазоны концентраций и соотношений питательных элементов в организме ([Han et al., 2011](#)). Различной способностью аккумулировать металлы во время онтогенеза могут обладать даже отдельные культурные сорта, что показано на примере аккумуляции редкоземельных элементов в различных сортах ячменя ([Birsin et al., 2010](#)).

Выделяют ряд механизмов, посредством которых растения могут активно взаимодействовать с почвой, регулируя возможность поглощения элементов ([Reimann et al., 2015](#)). А именно: 1) варьирование глубины залегания корней, где элементы выборочно поглощаются из почвы; 2) изменение среды вокруг корня за счет модификации почвенных условий, таких как pH, окислительно-восстановительный режим; 3) изменения на клеточном уровне, регулирующие поступление элементов, – модификация плотности, селективности и эффективности ионных каналов; 4) эволюционная адаптация.

Более активному выносу поглощенных питательных элементов может способствовать разнообразный видовой состав рас-

тений за счет конкуренции между видами ([Wu et al., 2020](#)), следовательно, при этом будет происходить более активный вынос элементов с полей, используемых для выращивания смеси трав (кормовых культур).

Значимую роль в изменении доступности элементов для растений, а значит и в перераспределении в агроэкосистеме, играют микроорганизмы ([Cuypers et al., 2013](#)), влияние которых следует учитывать при анализе биогеохимического круговорота элементов в агроэкосистемах.

## БАЛАНСОВЫЙ ПОДХОД К ИЗУЧЕНИЮ КРУГОВОРОТА И МАССОПЕРЕНОСА ЭЛЕМЕНТОВ В АГРОЦЕНОЗАХ

При прогнозировании массопереноса и аккумуляции металлов в агроэкоценозах находит применение балансовая модель ([Кошелева, 2002](#)). Оценка баланса питательных элементов в агроценозе позволяет охарактеризовать эффективность использования удобрений ([Лапа и др., 2013](#)). Баланс элементов в почве определяется по разности между их поступлением в почву и выносом с различными компонентами. В качестве статей выноса учитывают основную и побочную продукцию сельскохозяйственных культур, внутрипочвенный сток, эрозию и др. ([Лебедевский, Яковлева, 2012](#)). В качестве источников поступления элементов в почву рассматривают атмосферные выпадения, удобрения и мелиоранты, а также посевной материал. Поступление с посевным материалом незначительное (<0.1–0.3%). Поэтому при балансовых расчетах этой статьёй часто пренебрегают ([Попова, 1992](#)).

Баланс элементов в агроэкосистеме определяется множеством факторов, многие из которых не всегда учитываются при составлении балансовых расчетов. К ним следует отнести: отчуждение с сорняками; возврат с послеуборочными остатками; испарение элементов из почв; транспирация растениями; прижизненные выделения растений; развитие дернового процесса; потребление растениями элементов из нижних горизонтов почв (в то время как обычно изучается состав верхнего пахотного горизонта). Для некоторых территорий значимым является поступление элементов с атмосферными выпадениями и с распылением морской воды,

которое отслеживается на расстояния свыше нескольких десятков километров ([Савич и др., 2005](#); [Reimann et al., 2015](#)).

При этом необходимо отметить, что на незагрязненных территориях поступление металлов на поверхность почвы с удобрениями и мелиорантами является основным источником прихода металлов и составляет от 72% до 98% от общего потока ([Попова, 1992](#)). Многочисленные исследования показывают, что азотные и калийные удобрения не являются значительным источником поступления в агросистему микроэлементов ([Попова, 1992](#); [Овчаренко, 1995](#); [Овчаренко, 2000](#); [Карпова, 2003](#); [Карпова, Минеев, 2015](#)). Наибольшие количества примесей содержат фосфорные удобрения. Содержание примесей в фосфорных удобрениях зависит от состава исходного сырья и технологии производства ([Овчаренко, 1995](#); [Овчаренко, 2000](#); [Карпова, 2003](#); [Минеев, 2005](#)). В то же время проведенными исследованиями показано, что применение минеральных удобрений и фосфогипса на черноземах не привело к существенному изменению содержания Zn, Ni, Pb и Cd в почве ([Протасова, Горбунова, 2010](#)). Содержание Mn, Zn, Pb, Ni, Cd соответствовало фоновому уровню и не превышало ПДК ([Горбунова, Студин, 2016](#)). С точки зрения загрязнения почв тяжелыми металлами применение фосфорных удобрений не представляет опасности ([Минеев, 2005](#)).

В фосфорных удобрениях из отечественного сырья существенными являются примеси стронция и фтора. Зарубежное фосфатное сырье отличается повышенным содержанием кадмия ([Карпова, 2003](#); [Карпова, Минеев, 2015](#)). Концентрация стабильного стронция в простом суперфосфате из апатитового концентрата составляет 1.2% ([Гришина и др., 1991](#)). При использовании минеральных удобрений баланс большинства микроэлементов в зоне дерново-подзолистых почв отрицательный или нулевой. При внесении фосфорных удобрений из фосфоритов возможно накопление фтора, поэтому необходимо контролировать его содержание в почве ([Карпова, 2003](#)). Использование простого суперфосфата из апатитового концентрата и фосфоритной муки должно сопровождаться контролем содержания стронция в почвах и растительной продукции ([Карпова, Потатуева, 2004](#)). При длительном применении двойного суперфосфата на дерново-подзолистой почве зафик-

сировано повышение содержания всех форм стронция в почве, а наиболее существенные изменения произошли в содержании кислоторастворимой и обменной форм. Содержание валового стронция выросло не только в пахотном горизонте, но и в более глубоких слоях ([Черных и др., 1999](#)).

Внесение органических удобрений в большинстве случаев приводит к положительному балансу микроэлементов в агросистеме ([Карпова, Минеев, 2015](#)). Особенно существенен вклад органических удобрений в поступлении Zn, Cu, As, Ni ([Adriano, 2001](#)).

Вынос микроэлементов сельхозкультурами значительно увеличивается при применении минеральных удобрений в дозах, оптимальных для возделывания культур в данном регионе. В ряде случаев поступление тяжелых металлов с атмотехногенными выбросами может превосходить вынос металлов сельхозкультурами из почвы, что может явиться причиной их аккумуляции в системе ([Борисочкина, Кайданова, 1989](#); [Кайданова, Борисочкина, 1991](#); [Карпова, Минеев, 2015](#)). На незагрязненных фоновых территориях уровни поступления микроэлементов из удобрений и атмосферных выпадений для агросистем сопоставимы. Исключением являются агроландшафты с повышенной аэротехногенной нагрузкой, где в качестве источника поступления доминируют атмосферные выпадения, и в этом случае техногенное поступление металлов может превосходить агрогенное ([Минеев и др., 2015](#)).

Длительное использование высоких доз удобрений и мелиорантов на черноземных почвах не привело к загрязнению почв и сельскохозяйственной продукции тяжелыми металлами из-за высокого выноса элементов с растительной продукцией. При этом был зафиксирован дефицит подвижных соединений цинка и кобальта ([Протасова, 2005](#)). Вынос бора сахарной свеклой на удобренных вариантах на 12–14% выше, чем на вариантах без применения удобрений. Различия в выносе бора растениями из почв разной окультуренности не отразились на количестве подвижного (водорастворимого) бора в почвах удобренного и контрольного вариантов. Годовой вынос бора сахарной свеклой составлял  $n \cdot 10^{-2}\%$  от валовых запасов элемента пахотного и подпахотного слоев почвы. Содержание подвижного бора в типичных чернозе-

мах варьировало от 1.2 до 1.6 мг/кг, что является свидетельством высокой обеспеченности почв микроэлементом. В перспективе недостаточность водорастворимого бора в типичных черноземах может быть обусловлена не истощением почвы, а изменением ее физико-химических параметров, которые координируют процессы равновесия между твердой фазой почвы и почвенным раствором ([Борисочкина, Сиволобова, 1990](#)).

Необходимо отметить, что в последние годы резко снизились поставки минеральных удобрений сельскому хозяйству (в постсоветский период они сократились в 5 раз). В результате резко отрицательного баланса между внесением удобрений и выносом питательных веществ в земледелии России нарастают негативные процессы в агроэкосистемах, ухудшаются свойства почв, снижается содержание в них доступных форм основных биогенных элементов. Нарушение биологического круговорота веществ в агроценозе происходит вследствие недооценки закона возврата в почву биофильных элементов. Негативные изменения отмечаются на всех типах почв, даже на высокоплодородных черноземах ([Байбеков, 2003](#); [Минеев, 2011](#)).

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведен анализ и обзор литературных источников по характеристике круговорота и массопереноса химических элементов в агроценозах. Показана более высокая интенсивность массопотока химических элементов на почвах сельхозугодий высокой окультуренности. Проанализированы статьи балансовой модели агроценоза: почва – удобрение – сельскохозяйственная культура. Затронуты вопросы оценки активной части химических соединений, участвующих в массопереносе. Рассмотрено взаимовлияние элементов при поступлении из почвы в растения (явления антагонизма и синергизма), которые следует учитывать при планировании эффективного использования питательных веществ. Подтверждено, что процессы химической деградации почв агроценозов сопровождаются разбалансированностью содержаний и соотношений питательных элементов в почвах.

Информация, позволяющая оценить масштабы и закономерности перемещения металлов в звене биогеохимического кругово-

рота (в системе почва – сельскохозяйственная культура), требует дополнения и серьезных доработок. Сложность почвенной органо-минеральной матрицы, воздействие целого ряда факторов, взаимное влияние элементов друг на друга подтверждают необходимость проведения дальнейших исследований.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Алексеев Ю.В.* Тяжелые металлы в почвах и растениях. Л.: Агропромиздат, Ленинградское отделение, 1987. 142 с.
2. *Аштаб И.В.* Влияние свойств чернозема обыкновенного (предкавказского) карбонатного на обеспеченность растений цинком: Автореферат дис. ... канд. с.-х. наук. М., 1994. 23 с.
3. *Аштаб И.В., Ельников И.И.* Агроэкологическая оценка обеспеченности чернозема цинком по элементному составу растений // Почвоведение. 1994. № 7. С. 108–115.
4. *Байбеков Р.Ф.* Агроэкологическое состояние почв при длительном применении удобрений. М.: ЦИНАО, 2003. 192 с.
5. *Большаков В.А., Белобров В.П., Шишов Л.Л.* Словник. Термины, их краткое определение, справочные материалы по общей и почвенной экологии, географии и классификации почв. М., 2004. 140 с.
6. *Борисочкина Т.И., Кайданова О.В.* Вынос микроэлементов растительностью как фактор устойчивости геосистем к загрязнению // Факторы и механизмы устойчивости геосистем. М.: Институт географии РАН, 1989. С. 133–144.
7. *Борисочкина Т.И., Краснова Н.М., Головкова Т.В.* Особенности поглощения фтора растениями в условиях загрязнения // Сб. научных трудов. Техногенное воздействие на почвы и их плодородие; методы контроля. М.: Почвенный институт им. В.В. Докучаева, 1991. С. 21–28.
8. *Борисочкина Т.И., Сиволобова Т.С.* Балансовые расчеты обеспеченности бором типичных черноземов // Сб. Микроэлементы в биологии и их применение в сельском хозяйстве и медицине. Самарканд, 1990. С. 127.
9. *Воронина Л.П., Кирюшина А.П., Ксенофонтов А.Л., Тимофеева А.В., Голубкина Н.А.* Влияние селена на содержание азота в растениях и аминокислотный состав надземных органов ячменя // Агрохимия. 2018. № 9. С. 20–28.
10. *Гайдукова Н.Г., Кошеленко Н.А., Малюга Н.Г., Шоков Н.Р., Загорюлько А.В.* Мониторинг содержания тяжелых металлов в системе почва-растение // Известия высших учебных заведений. Пищевая технология. 2000. № 2–3. С. 103–106.

11. *Горбунова Н.С., Студин А.Ф.* Содержание тяжелых металлов при длительном применении удобрений в агроценозах кукурузы на черноземах выщелоченных // Вестник ВГУ, серия: химия, биология, фармация. 2016. № 4. С. 49–54.
12. *Гришина Л.А., Копчик Г.Н., Моргунов Л.В.* Организация и проведение почвенных исследований для экологического мониторинга. М.: МГУ, 1991. 82 с.
13. *Долгодворова А.П., Воронина Л.П.* Оценка действия селена на растения ярового ячменя (*Hordeum vulgare* L.) на фоне внесения минеральных удобрений // Проблемы агрохимии и экологии. 2014. № 4. С. 23–27.
14. *Зубкова В.М.* Особенности накопления и распределения тяжелых металлов в сельскохозяйственных культурах и влияние удобрений на их поведение в системе почва-растение: Автореф. дис. ... д. биол. наук. М.: ТСХА, 2004. 40 с.
15. *Ельников И.И., Рогова О.Б.* Диагностика обеспеченности почв фосфором с учетом взаимосвязи его подвижной формы с агрохимическими свойствами почв и сбалансированностью химического состава растений // Системы интенсификации земледелия как основа инновационной модернизации аграрного производства. 2017. С. 208–212.
16. *Ельников И.И., Рогова О.Б.* О развитии исследований по агроэкологической оценке почв с применением методов почвенно-растительной диагностики // Почвенные и земельные ресурсы: состояние, оценка, использование. Материалы первой Всероссийской открытой конференции. М.: Почвенный институт им. В.В. Докучаева, 2015. С. 347–352.
17. *Ильин В.Б.* К оценке массопотока тяжелых металлов в системе почва-сельскохозяйственная культура // Агрохимия. 2006. № 3. С. 52–59.
18. *Ильин В.Б.* Элементарный химический состав растений. Новосибирск: Наука, 1985. 129 с.
19. *Кабата-Пендиас А.* Проблемы современной бигеохимии микроэлементов // Российский химический журнал. 2005. Т. 49. № 3. С. 15–19.
20. *Кайданова О.В., Борисочкина Т.И.* Вынос тяжелых металлов растениями из черноземов в зоне техногенного воздействия // Сб. научных трудов. Техногенное воздействие на почвы и их плодородие; методы контроля. М.: Почвенный институт им. В.В. Докучаева, 1991. С. 28–33.
21. *Карпова Е.А.* Состояние микроэлементов в агроэкосистемах // Техногенез и бигеохимическая эволюция таксонов биосферы. М.: Наука, 2003. С. 76–87.

22. *Карпова Е.А., Минеев В.Г.* Тяжелые металлы в агроэкосистеме. М., 2015. 215 с.
23. *Карпова Е.А., Потатуева Ю.А.* Последствия применения различных форм фосфорных удобрений: стронций в системе дерново-подзолистая почва-растение // *Агрохимия*. 2004. № 1. С. 91–96.
24. *Ковда В.А.* Почвенный покров, его улучшение, использование и охрана. М.: Наука, 1981. 182 с.
25. *Коробова Е.М.* Токсичность как биогеохимическая проблема // *Геохимия*. 2020. Т. 65. № 10. С. 949–954.
26. *Кошелева Н.Е.* Моделирование биогеохимических циклов тяжелых металлов в агроландшафтах на основе балансового подхода // *Геохимия ландшафтов и география почв*. Смоленск: Ойкумена, 2002. С. 389–405.
27. *Краснова Н.М., Борисочкина Т.И., Головкина Т.В.* Рост райграса на черноземе, загрязненном фтором // *Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева*. 1989. Вып. 49. С. 27–30.
28. *Кулаковская Т.Н.* Оптимизация агрохимической системы почвенного питания растений. М.: Агропромиздат, 1990. 219 с.
29. *Кульнев В.В., Насонов А.Н., Цветков И.В., Король Т.С., Шаховская К.А.* Биотестирование почв на основе фрактальных характеристик растений // *Принципы экологии*. 2020. Т. 9. № 4 (38). С. 3–20.
30. *Ладонин Д.В.* Формы соединений тяжелых металлов в техногенно-загрязненных почвах. М.: Изд-во Московского университета, 2019. 312 с.
31. *Лапа В.В., Кулеш О.Г., Лопух М.С.* Вынос и баланс элементов питания в зернотравяном севообороте на дерново-подзолистой легкосуглинистой почве // *Почвоведение и агрохимия*. 2013. № 2. С. 143–150.
32. *Лебедовский И.А., Яковлева Е.А.* Минеральные удобрения как фактор трансформации тяжелых металлов в системе почва растение на примере чернозема выщелоченного Кубани // *Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета*. 2012. № 77. С. 536–545.
33. Методические указания по агрохимическому обследованию и картографированию почв на содержание микроэлементов. М., 1976. 80 с.
34. *Минеев В.Г.* Актуальные задачи агрохимии в условиях современного земледелия // *Проблемы агрохимии и экологии*. 2011. № 1. С. 3–9.
35. *Минеев В.Г.* Воспроизводство плодородия почвы и экологические функции удобрений в агроценозе // *Проблемы агрохимии и экологии*. 2008. № 1. С. 3–6.
36. *Минеев В.Г.* Агрохимия и качество пшеницы. Экологические проблемы и функции агрохимии. М.: Изд-во МГУ, 2005. 601 с.
37. *Минеев В.Г., Едемская Н.Л., Карпова Е.А.* Особенности динамики соединений меди в агроценозах на дерново-подзолистых почвах при

длительном применении удобрений // Проблемы агрохимии и экологии. 2015. № 4. С. 3–19.

38. *Овчаренко М.М.* Тяжелые металлы в системе почва-растение-удобрение // Химия в сельском хозяйстве. 1995. № 4. С. 8–16.

39. *Овчаренко М.М.* Тяжелые металлы в системе почва-растение-удобрение: Автореф. дис. ... д. с.-х. наук. М., 2000. 60 с.

40. *Плеханова И.О., Савельева В.А.* Трансформация соединений кобальта при увлажнении // Почвоведение. 1999. № 5. С. 568–574.

41. *Плеханова И.О.* Трансформация соединений Fe, Mn, Co и Ni в дерново-подзолистых почвах при различных уровнях влажности // Известия РАН. Серия биологическая. 2007. № 1. С. 82–90.

42. *Плешков А.С., Ягодин Б.А.* Способ обеспечения растений минеральными элементами. Авторское свидетельство на изобретение SU952168. 1982.

43. *Попова А.А.* Сезонная динамика и баланс тяжелых металлов в дерново-подзолистой почве: Автореф. дис. ... канд. биол. наук. М., 1992. 24 с.

44. *Протасова Н.А.* Тяжелые металлы в черноземах и культурных растениях Воронежской области // Агрохимия. 2005. № 2. С. 80–86.

45. *Протасова Н.А., Горбунова Н.С.* Соединения цинка, никеля, свинца и кадмия в обыкновенных черноземах Каменной Степи при длительном применении удобрений и фосфогипса // Агрохимия. 2010. № 7. С. 52–61.

46. *Ринькис Г.Я., Рамане Х.К., Паэгле Г.В., Куницкая Т.А.* Система оптимизации и методы диагностики минерального питания растений. Рига: Зинатне, 1989. 196 с.

47. *Савич В.И., Трубицина Е.В., Замараев А.Г., Кобзаренко В.И., Духанин Ю.А., Никольский Ю.Н.* Баланс вещества и энергии в пахотной дерново-подзолистой почве // Известия ТСХА. 2005. № 4. С. 11–23.

48. *Степанок В.В.* Влияние комплексов техногенных элементов на химический состав сельскохозяйственных культур // Агрохимия. 2003. № 1. С. 50–60.

49. *Тимофеева Я.О.* Особенности круговорота микроэлементов в агроэкосистемах в условиях формирования почвенных конкреций // Аграрный вестник Урала. 2018. № 12 (179). С. 14–21.

50. *Торшин С.П.* Влияние естественных и антропогенных факторов на формирование естественного состава продукции растениеводства: Дис. ... д. биол. наук. М.: ТСХА, 1998. 280 с.

51. *Фокин А.Д.* Эколого-биогеохимические подходы к оптимизации агроэкосистем // Почвоведение. 1988. № 9. С. 71–75.

52. *Фокин А.Д.* Роль растений в перераспределении вещества по почвенному профилю // Почвоведение. 1999. № 1. С. 125–133.

53. *Фокин А.Д.* Роль растений в формировании трансформационных и транспортных потоков вещества в наземных экосистемах // В сб. Актуальные проблемы почвоведения, агрохимии и экологии. М., 2004. С. 101–121.
54. *Фокин А., Торшин С.* Растения в жизни почв и наземных экосистем. Нетрадиционные подходы и решения в поведении биологически значимых элементов. Lap Lambert Academic Publishing, 2020. 184 с.
55. *Фрид А.С., Гома Ботхина Саад М.А., Борисочкина Т.И.* Миграция меди, цинка и кадмия в аридных почвах Египта, орошаемых природными и городскими сточными водами // Агрохимия. 2014. № 11. С. 62–73.
56. *Фрид А.С., Гома Ботхина Саад М.А., Борисочкина Т.И.* Миграция железа, кобальта и никеля в аридных почвах Египта, орошаемых природными и городскими сточными водами // Агрохимия. 2016. № 8. С. 68–81.
57. *Христенко А.А., Иванова С.Е.* Проблема повышения точности диагностики фосфатного состояния почв Украины // Вестник Международного института питания растений. 2011. № 2. С. 6–9.
58. *Церлинг В.В.* Агрохимические основы диагностики минерального питания сельскохозяйственных культур. М.: Наука, 1978. 216 с.
59. *Черных Н.А., Милащенко Н.З., Ладонин В.Ф.* Экотоксикологические аспекты загрязнения почв тяжелыми металлами. М.: Агроконсалт, 1999. 176 с.
60. *Aboyaji C.M., Dunsin O., Adekiya A.O., Suleiman K.O., Chinedum C., Okunlola F.O., Joseph, Abiodun, Ejue S.W., Adesola O.O., Olofintoye T.A.J., Owolabi I.O.* Synergistic and antagonistic effects of soil applied P and Zn fertilizers on the performance, minerals and heavy metal composition of groundnut // Open Agriculture. 2020. Vol. 5. No. 1. P. 1–9.
61. *Adriano D.C.* Trace Elements in Terrestrial Environments. Biogeochemistry, Bioavailability, and Risks of Metals. New York: Springer, 2001. 867 p.
62. *Birsin M.A., Adak M.S., Inal A., Aksu A., Gunes A.* Mineral element distribution and accumulation patterns within two barley cultivars // Journal of plant nutrition. 2010. Vol. 33. No. 2. P. 267–284.
63. *Cuyper A., Remans T., Weyens N., Colpaert J., Vassilev A., Vangronsveld J.* Soil-plant relationships of heavy metals and metalloids // Heavy metals in soils. Dordrecht: Springer, 2013. P. 161–193.
64. *Dhaliwal S.S., Naresh R.K., Mandal A., Singh R., Dhaliwal M.K.* Dynamics and transformations of micronutrients in agricultural soils as influenced by organic matter build-up: A review // Environmental and Sustainability Indicators. 2019. Vol. 1–2. 100007.

65. *Di Gioia F., Petropoulos S.A., Ozores-Hampton M., Morgan K., Roskopf E.N.* Zinc and Iron Agronomic Biofortification of Brassicaceae Microgreens // *Agronomy*. 2019. Vol. 9. No. 11. 677.
66. *Ehrenfeld J.G., Ravit B., Elgersma K.* Feedback in the plant-soil system // *Annu. Rev. Environ. Resour.* 2005. Vol. 30. P. 75–115.
67. *Fang J., Wen B., Shan X.Q., Lin J.M., Owens G.* Is an adjusted rhizosphere-based method valid for field assessment of metal phytoavailability? Application to non-contaminated soils // *Environmental Pollution*. 2007. Vol. 150. No. 2. P. 209–217.
68. *Feng M.-H., Shan X.-Q., Zhang S.-Z., Wen B.* Comparison of a rhizosphere-based method with other one-step extraction methods for assessing the bioavailability of soil metals to wheat // *Chemosphere*. 2005. Vol. 59. P. 939–949.
69. *Han W.X., Fang J.Y., Reich P.B., Ian Woodward F., Wang Z.H.* Biogeography and variability of eleven mineral elements in plant leaves across gradients of climate, soil and plant functional type in China // *Ecology Letters*. 2011. Vol. 14. No. 8. P. 788–796.
70. *Hosseinpur A.R., Motaghian H.* Evaluating of many chemical extractants for assessment of Zn and Pb uptake by bean in polluted soils // *Journal of soil science and plant nutrition*. 2015. Vol. 15. No. 1. P. 24–34.
71. *Horta M. do C., Torrent J.* The Olsen P method as an agronomic and environmental test for predicting phosphate release from acid soils // *Nutr. Cycl. Agroecosyst.* 2007. P. 283–292.
72. *Ivezić V., Lončarić Z., Engler M., Kerovec D., Singh B. R.* Comparison of different extraction methods representing available and total concentrations of Cd, Cu, Fe, Mn and Zn in soil // *Poljoprivreda*. 2013. Vol. 19. No. 1. P. 53–58.
73. *Kabata-Pendias A.* Trace Elements in Soils and Plants. 4<sup>th</sup> edition. Florida. USA: CRC Press/Taylor-Francis Group, 2011. 548 p.
74. *Leinweber P., Paetsch C., Schulten H.R.* Heavy metal retention by organo-mineral particle-size fractions from soils in long-term agricultural experiments // *Archives of Agronomy and Soil Science*. 1995. Vol. 39. No. 4. P. 271–285.
75. *Malvi U.R.* Interaction of micronutrients with major nutrients with special reference to potassium // *Karnataka Journal of Agricultural Sciences*. 2011. Vol. 24. No. 1. P. 106–109.
76. *Menzies N.W., Donn M.J., Kopittke P.M.* Evaluation of extractants for estimation of the phytoavailable trace metals in soils // *Environmental pollution*. 2007. Vol. 145. No. 1. P. 121–130.
77. *Plekhanova I.O., Bambusheva V.A.* Extraction methods for studying the fractional composition of heavy metals in soils and their comparative assessment // *Eurasian Soil Science*. 2010. Vol. 43. No. 9. P. 1004–1010.

78. Qian J., Shan X., Wang Z., Tu Q. Distribution and plant availability of heavy metals in different particle-size fractions of soil // *Science of the Total Environment*. 1996. Vol. 187. No. 2. P. 131–141.
79. Rao C.R.M., Sahuquillo A., Sanchez J.F.L. A review of the different methods applied in environmental geochemistry for single and sequential extraction of trace elements in soils and related materials // *Water, Air, and Soil Pollution*. 2008. Vol. 189. No. 1. P. 291–333.
80. Reimann C., Englmaier P., Fabian K., Gough L., Lamothe P., Smith D. Biogeochemical plant–soil interaction: variable element composition in leaves of four plant species collected along a south–north transect at the southern tip of Norway // *Science of the Total Environment*. 2015. Vol. 506. P. 480–495.
81. Rietra R.P.J.J., Heinen M., Dimkpa C.O., Bindraban P.S. Effects of nutrient antagonism and synergism on yield and fertilizer use efficiency // *Communications in soil science and plant analysis*. 2017. Vol. 48. No. 16. P. 1895–1920.
82. Shan X., Chen B. Evaluation of sequential extraction for speciation of trace metals in model soil containing natural minerals and humic acid // *Analytical Chemistry*. 1993. Vol. 65. P. 802–807. DOI: [10.1021/ac00054a026](https://doi.org/10.1021/ac00054a026).
83. Siromlya T.I. On available forms of chemical compounds in soils // *Contemporary Problems of Ecology*. 2009. Vol. 2. P. 678–685.
84. Wu J., Zeng H., Zhao F., Chen C., Liu W., Yang B., Zhang W. Recognizing the role of plant species composition in the modification of soil nutrients and water in rubber agroforestry systems // *Science of The Total Environment*. 2020. Vol. 723. 138042.
85. Xie K., Cakmak I., Wang S., Zhang F., Guo S. Synergistic and antagonistic interactions between potassium and magnesium in higher plants // *The Crop Journal*. 2021. Vol. 9. No. 2. P. 249–256.

## REFERENCES

1. Alekseev Yu.V., *Tyazhelye metally v pochvakh i rasteniyakh* (Heavy metals in soils and plants), Leningrad: Agropromizdat, Leningradskoe otdelenie, 1987, 142 p.
2. Ashtab I.V., *Vliyanie chernozema obyknovennogo (predkavkazskogo) karbonatnogo na obespechennost' rastenii tsinkom: Avtoref. dis. ... kand. s.-kh. nauk* (Influence of properties of common (pre-Caucasian) carbonate chernozem on the provision of plants with zinc, Extended abstract of cand. agric. sci. thesis), Moscow, 1994, 23 p.
3. Ashtab I.V., El'nikov I.I., *Agroekologicheskaya obespechennosti chernozema tsinkom po ehlementnomu sostavu rastenii* (Agroecological

assessment of zinc provision in chernozem by elemental composition of plants), *Pochvovedenie*, 1994, No. 7, pp. 108–115.

4. Baibekov R.F., *Agroekologicheskoe sostoyanie pochv pri dlitel'nom primenении udobrenii* (Agro-ecological state of soils under long-term application of fertilizers), Moscow: TSINAO, 2003, 192 p.

5. Bol'shakov V.A., Belobrov V.P., Shishov L.L., *Slovník. Terminy. Ikh kratkoe opredelenie, spravochnye materialy po obshchei i pochvennoi ehkologii, geografii i klassifikatsii pochv* (Terms, their brief definition, references on general and soil ecology, geography and classification of soils), Moscow, 2004, 140 p.

6. Borisochkina T.I., Kaidanova O.V., Vynos mikroelementov rastitel'nost'yu kak faktor ustoichivosti geosistem k zagryazneniyu (The removal of microelements by vegetation as a factor in the stability of geosystems to pollution), In: *Faktory i mekhanizmy ustoichivosti geosystem* (Factors and mechanisms of stability of geosystems), Moscow, Institut geografii RAN, 1989, pp. 133–144.

7. Borisochkina T.I., Krasnova N.M., Golovkova T.V., Osobennosti pogloshcheniya ftora rasteniyami v usloviyakh zagryazneniya (Features of absorption of fluorine by plants under pollution), In: *Tekhnogennoe vozdeystvie na pochvy i ikh plodorodie; metody kontrolya* (Technogenic Impact on Soils and Their Fertility; Methods of Control), Moscow: Pochvennyi institut im. V.V. Dokuchaeva, 1991, pp. 21–28.

8. Borisochkina T.I., Sivolobova T.S., Balansovye raschety obespechennosti borom tipichnykh chernozemov (Balance calculations of boron availability of typical chernozems), In: *Mikroelementy v biologii i ikh primeneniye v sel'skom khozyaistve i meditsine* (Microelements in biology and their use in agriculture and medicine), Samarkand, 1990, pp. 127.

9. Voronina L.P., Kiryushina A.P., Ksenofontov A.L., Timofeeva A.V., Golubkina N.A., Vliyanie selena na sodержanie azota v rasteniyakh i aminokislotnyi sostav nadzemnykh organov yachmenya (Effect of selenium on nitrogen content in plants and amino acid composition of the aboveground organs of barley), *Agrokimiya*, 2018, No. 9, pp. 20–28.

10. Gaidukova N.G., Koshelenko N.A., Malyuga N.G., Shokov N.R., Zagorul'ko A.V., Monitoring sodержaniya tyazhelykh metallov v sisteme pochva-rasteniye (Monitoring of heavy metals in the soil-plant system), *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Pishchevaya tekhnologiya*, 2000, No. 2–3, pp. 103–106.

11. Gorbunova N.S., Studin A.F., Soderzhanie tyazhelykh metallov pri dlitel'nom primenении udobrenii v agrotsenozakh kukuruzy na vyshchelochennykh chernozemakh (The content of heavy metals during long-term application of fertilizers in the agrocenosis of corn on chernozem

leached), *Vestnik VGU, seriya: khimiya, biologiya, farmatsiya*, 2016, No. 4, pp. 49–54.

12. Grishina L.A., Koptsik G.N., Morgun L.V., *Organizatsiya i provedenie issledovaniy dlya ekhologicheskogo monitoring* (Organization and conduct of soil research for environmental monitoring), Moscow: MGU, 1991, 82 p.

13. Dolgodvorova A.P., Voronina L.P., Otsenka deistviya selena na rasteniya yarovogo yachmenya (*Hordeum vulgare* L.) na fone vnoseniya mineral'nykh udobrenii (Evaluation of selenium action on plants of spring barley (*Hordeum vulgare* L.) against the background of mineral fertilization), *Problemy agrokhimii i ekhologii*, 2014, No. 4, pp. 23–27.

14. Zubkova V.M., *Osobennosti nakopleniya i raspredeleniya tyazhelykh metallov v sel'skokhozyaistvennykh kul'turakh i vliyanie udobrenii na ikh povedenie v sisteme pochva-rastenie: Avtoref. diss. ... dokt. biol. nauk* (Features of accumulation and distribution of heavy metals in agricultural crops and the influence of fertilizers on their behavior in the soil-plant system, Extended abstract of Dr. biol. sci. thesis), Moscow: TSKHA, 2004, 40 p.

15. El'nikov I.I., Rogova O.B., Diagnostika obespechennosti pochv fosforom s uchetom vzaimosvyazi ego podvizhnoi formy s agrokhimicheskimi svoystvami pochv i sbalansirovannost'yu khimicheskogo sostava rastenii (Diagnosis of soil phosphorus supply taking into account the relationship of its mobile form with agrochemical properties of soils and the balance of the chemical composition of plants), In: *Sistemy intensivifikatsii zemledeliya kak osnova innovatsionnoi modernizatsii agrarnogo proizvodstva* (Systems of intensification of agriculture as the basis of innovative modernization of agricultural production), 2017, pp. 208–212.

16. El'nikov I.I., Rogova O.B., O razvitiy issledovaniy po agroekhologicheskoi otsenke pochv s primeneniem metodov pochvenno-rastitel'noi diagnostiki (On the development of research on agro-ecological assessment of soils using soil-vegetation diagnostic methods), *Materialy pervoi Vserossiiskoi otkrytoi konferentsii "Pochvennye i zemel'nye resursy: sostoyanie, otsenka, ispol'zovanie"* (Proc. First All-Russian Open Conference: "Soil and land resources: state, evaluation"), Moscow: Pochvennyi institut im. V.V. Dokuchaeva, 2015, pp. 347–352.

17. Il'in V.B., K otsenke massopotoka tyazhelykh metallov v sisteme pochva-sel'skokhozyaistvennaya kul'tura (To estimate the mass flux of heavy metals in the soil-agricultural system), *Agrokhimiya*, 2006, No. 3, pp. 52–59.

18. Il'in V.B., *Ehlementarnyi khimicheskii sostav rastenii* (Elemental chemical composition of plants), Novosibirsk: Nauka, 1985, 129 p.

19. Kabata-Pendias A., Problemy sovremennoi bigeokhimii mikroehlementov (Problems of modern biochemistry of trace elements), *Rossiiskii khimicheskii zhurnal*, 2005, Vol. 49, No. 3, pp. 15–19.

20. Kaidanova O.V., Borisochkina T.I., Vynos tyazhelykh metallov rasteniyami iz chernozemov v zone tekhnogennoy vozdeystviya (Heavy metals removal by plants from chernozems in the zone of technogenic impact), In: *Tekhnogennoye vozdeystvie na pochvy i ikh plodorodie; metody kontrolya* (Technogenic Impact on Soils and Their Fertility; Methods of Control), Moscow: Pochvennyi institut im. V.V. Dokuchaeva, 1991, pp. 28–33.
21. Karpova E.A., Mineev V.G., Sostoyanie mikroelementov v agroekosistemakh (State of microelements in agroecosystems), In: *Tekhnogenez i biogeokhimicheskaya ehvolyutsiya taksonov biosfery* (Technogenesis and biogeochemical evolution of biosphere taxa), Moscow: Nauka, 2003, pp. 76–87.
22. Karpova E.A., Mineev V.G., *Tyazhelye metally v agroekosisteme* (Heavy metals in agroecosystem), Moscow, 2015, 215 p.
23. Karpova E.A., Potatueva Yu.A., Posledstviya primeneniya razlichnykh form fosfornykh udobrenii: strontsii v sisteme dernovo-podzolistaya pochva-rastenie (Consequences of different forms of phosphorus fertilizers: strontium in the sod-podzolic soil-plant system), *Agrokimiya*, 2004, No. 1, pp. 91–96.
24. Kovda V.A., *Pochvennyi pokrov, ego uluchshenie, ispol'zovanie i okhrana* (Soil cover, its improvement, use and protection), Moscow: Nauka, 1981, 182 p.
25. Korobova E.M., Toksichnost' kak biogeokhimicheskaya problema (Toxicity as a biogeochemical problem), *Geokimiya*, 2020, Vol. 65, No. 10, pp. 949–954.
26. Kosheleva N.E., Modelirovanie biogeokhimicheskikh tsiklov tyazhelykh metallov v agrolandshaftakh na osnove balansovogo podkhoda (Modeling of biogeochemical cycles of heavy metals in agrolandscapes based on balance approach), In: *Geokimiya landshaftov i geografiya pochv* (Geochemistry of landscapes and soil geography), Smolensk: Oikumena, 2002, 389–405 p.
27. Krasnova N.M., Borisochkina T.I., Golovkova T.V., Rost raigrasa na chernozeme, zagryaznennom ftorom (Ryegrass growth on chernozem contaminated with fluorine), *Dokuchaev Soil Bulletin*, 1989, Vol. 49, pp. 27–30.
28. Kulakovskaya T.N., *Optimizatsiya agrokhimicheskoi sistemy pochvennoy pitaniya rastenii* (Optimization of agrochemical system of soil nutrition of plants), Moscow: Agropromizdat, 1990, 219 p.
29. Kul'nev V.V., Nasonov A.N., Tsvetkov I.V., Korol' T.S., Shakhovskaya K.A., Biotestirovanie pochv na osnove fraktal'nykh kharakteristik rastenii (Biotesting soils based on fractal characteristics of plants), *Printsipy ehkologii*, 2020, Vol. 9, No. 4(38), pp. 3–20.
30. Ladonin D.V., *Formy soedinenii tyazhelykh metallov v tekhnogenno-zagryaznennykh pochvakh* (Forms of heavy metal compounds in

technogenically polluted soils), Moscow: Izd-vo Moskovskogo universiteta, 2019. 312 p.

31. Lapa V.V., Kulesh O.G., Lopukh M.S., Vynos i balans ehlementov pitaniya v zernotravyanom sevooborote na dernovo-podzolistoi legkosuglinistoi pochve (The removal and balance of nutrients in the grain-grass crop rotation on sod-podzolic light loamy soil), *Pochvovedenie i agrokhimiya*, 2013, No. 2, pp. 143–150.

32. Lebedovskii I.A., Yakovleva E.A., Mineral'nye udobreniya kak faktor transformatsii tyazhelykh metallov v sisteme pochva rastenie na primere chernozema vshchelochennogo Kubani (Mineral fertilizers as a factor in the transformation of heavy metals in the system soil plant on the example of leached chernozem Kuban), *Politematicheskii setevoi ehlektronnyi nauchnyi zhurnal Kubanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*, 2012, No. 77, pp. 536–545.

33. *Metodicheskie ukazaniya po agrokhimicheskomu obsledovaniyu i kartografirovaniyu pochv na sodержanie mikroehlementov* (Methodological guidelines for agrochemical examination and mapping of soils for the content of trace elements), Moscow: 1976, 80 p.

34. Mineev V.G., Aktual'nye zadachi agrokhimii v usloviyakh sovremennogo zemledeliya (Actual problems of agrochemistry in modern agriculture), *Problemy agrokhimii i ehkologii*, 2011, No. 1, pp. 3–9.

35. Mineev V.G., Vosproizvodstvo plodorodiya pochvy i ehkologicheskie funktsii udobrenii v agrotsenoze (Recovery of soil fertility and ecological functions of fertilizers in agrocenosis), *Problemy agrokhimii i ehkologii*, 2008, No. 1, pp. 3–6.

36. Mineev V.G., *Agrokhimiya i kachestvo pshenitsy. Ehkologicheskie problemy i funktsii agrokhimii* (Agrochemistry and quality of wheat. Ecological Problems and Functions of Agrochemistry), Moscow: Izd-vo MGU, 2005, 601 p.

37. Mineev V.G., Edemskaya N.L., Karpova E.A., Osobennosti dinamiki soedinenii medi v agrotsenozakh na dernovo-podzolistykh pochvakh pri dlitel'nom primenenii udobrenii (Features of the dynamics of copper compounds in agrocenoses on sod-podzolic soils with long-term use of fertilizers), *Problemy agrokhimii i ehkologii*, 2015, No. 4, pp. 3–19.

38. Ovcharenko M.M., Tyazhelye metally v sisteme pochva–rastenie–udobrenie (Heavy metals in the system soil–plant–fertilizer), *Khimiya v sel'skom khozyaistve*, 1995, No. 4, pp. 8–16.

39. Ovcharenko M.M., *Tyazhelye metally v sisteme pochva–rastenie–udobrenie: Avtoref. ... diss. dokt. s.-kh. nauk* (Heavy metals in system soil–plant–fertilizer, Extended abstract of Dr. agri. sci. thesis), Moscow, 2000, 60 p.

40. Plekhanova I.O., Savel'eva V.A., Transformatsiya soedinenii kobal'ta pri uvlazhnenii (Transformation of cobalt compounds at moistening), *Pochvovedenie*, 1999, No. 5, pp. 568–574.
41. Plekhanova I.O., Transformatsiya soedinenii Fe, Mn, Co i Ni v dernovo-podzolistykh pochvakh pri razlichnykh urovnyakh vlazhnosti (Transformation of Fe, Mn, Co and Ni compounds in sod-podzol soils at various levels of humidity), *Izvestiya RAN. Seriya biologicheskaya*, 2007, No. 1, pp. 82–90.
42. Pleshkov A.S., Yagodin B.A., *Sposob obespecheniya rastenii mineral'nymi ehlementami* (Method of providing plants with mineral elements), Copyright certificate for the invention SU952168, 1982.
43. Popova A.A., *Sezonnaya dinamika i balans tyazhelykh metallov v dernovo-podzolistoi pochve: Avtoref. ... diss. kand. biol. nauk* (Seasonal dynamics and balance of heavy metals in sod-podzolic soil, Extended abstract of Cand. biol. sci. thesis), Moscow, 1992, 24 p.
44. Protasova N.A., Tyazhelye metally v chernozemakh i kul'turnykh rasteniyakh Voronezhskoi oblasti (Heavy metals in chernozems and cultural plants of Voronezh region), *Agrokimiya*, 2005, No. 2, pp. 80–86.
45. Protasova N.A., Gorbunova N.S., Soedineniya tsinka, nikelya, svintsya i kadmiya v obyknovennykh chernozemakh Kamennoi Stepi pri dlitel'nom primenenii udobrenii i fosfogipsa (Compounds of zinc, nickel, lead and cadmium in common chernozems of Stone Steppe under long-term application of fertilizers and phosphogypsum), *Agrokimiya*, 2010, No. 7, pp. 52–61.
46. Rin'kis G.Ya., Ramane Kh.K., Paehgle G.V., Kunitskaya T.A., *Sistema optimizatsii i metody diagnostiki mineral'nogo pitaniya rastenii* (Plant mineral nutrition optimization system and diagnostic methods), Riga: Zinatne, 1989, 196 p.
47. Savich V.I., Trubitsina E.V., Zamaraev A.G., Kobzarenko V.I., Dukhanin Yu.A., Nikol'skii Yu.N., Balans veshchestva i ehnergii v pakhotnoi dernovo-podzolistoi pochve (The balance of matter and energy in arable sod-podzolic soil), *Izvestiya TSKhA*, 2005, No. 4, pp. 11–23.
48. Stepanok V.V., Vliyanie kompleksov tekhnogennykh ehlementov na khimicheskii sostav sel'skokhozyaistvennykh kul'tur (Influence of complexes of anthropogenic elements on chemical composition of agricultural crops), *Agrokimiya*, 2003, No. 1, pp. 50–60.
49. Timofeeva Ya.O., Osobennosti krugovorota mikroehlementov v agroehkossistemakh v usloviyakh formirovaniya pochvennykh konkretnykh sostoyneniy (Peculiarities of microelement cycle in agroecosystems under conditions of soil nodule formation), *Agrarnyi vestnik Urala*, 2018, No. 12(179), pp. 14–21.
50. Torshin S.P., *Vliyanie estestvennykh i antropogennykh faktorov na formirovanie estestvennogo sostava produktsii rasteniyevodstva: Diss. ... dokt. biol. nauk* (Influence of natural and anthropogenic factors on the formation of

the natural composition of crop production, Dr. biol. sci. thesis), Moscow: TSKHA, 1998, 280 p.

51. Fokin A.D., *Ekologo-biogeokhimicheskie podkhody k optimizatsii agroekosistem* (Ecological and biogeochemical approaches to optimization of agro-ecosystem), *Pochvovedenie*, 1988, No. 9, pp. 71–75.

52. Fokin A.D., Rol' rastenii v pereraspredelenii veshchestva po pochvennomu profilu (The role of plants in redistribution of matter on soil profile), *Pochvovedenie*, 1999, No. 1, pp. 125–133.

53. Fokin A.D. Rol' rastenii v formirovani i transformatsionnykh i transportnykh potokov veshchestva v nazemnykh ekosistemakh. V sb. Aktual'nye problemy pochvovedeniya, agrokhimii i ekologii. M. 2004, pp.101–121

54. Fokin A., Torshin S., *Rasteniya v zhizni pochv i nazemnykh ehkosistem. Netraditsionnye podkhody i resheniya v povedenii biologicheskii znachimykh ehlementov* (Plants in life of soils and land ecosystems. Unconventional approaches and solutions in the behavior of biologically significant elements), Lap Lambert Academic Publishing, 2020, 184 p.

55. Frid A.S., Goma Botkhina Saad M.A., Borisochkina T.I., Migratsiya medi, tsinka i kadmiya v aridnykh pochvakh Egipta, oroshaemykh prirodnyimi i gorodskimi stochnymi vodami (Migration of copper, zinc and cadmium in arid soils of Egypt irrigated by natural and urban wastewater), *Agrokhiimiya*, 2014, No. 11, pp. 62–73.

56. Frid A.S., Goma Botkhina Saad M.A., Borisochkina T.I., Migratsiya zheleza, kobal'ta i nikelya v aridnykh pochvakh Egipta, oroshaemykh prirodnyimi i gorodskimi stochnymi vodami (Migration of iron, cobalt and nickel in arid soils of Egypt irrigated by natural and urban wastewater), *Agrokhiimiya*, 2016, No. 8, pp. 68–81.

57. Khristenko A.A., Ivanova S.E., Problema povysheniya tochnosti diagnostiki fosfatnogo sostoyaniya pochv Ukrainy (The problem of improving the accuracy of diagnosis of phosphate status of soils in Ukraine), *Vestnik Mezhdunarodnogo instituta pitaniya rastenii*, 2011, No. 2, pp. 6–9.

58. Tserling V.V., *Agrokhimicheskie osnovy diagnostiki mineral'nogo pitaniya sel'skokhozyaistvennykh kul'tur* (Agrochemical bases of diagnostics of mineral nutrition of agricultural crops), Moscow: Nauka, 1978, 216 p.

59. Chernykh N.A., Milashchenko N.Z., Ladonin V.F., *Ehкотоксикологические аспекты загрязнения почв тяжелыми металлами* (Ecotoxicological aspects of soil contamination by heavy metals), Moscow: Agrokonsalt, 1999, 176 p.

60. Aboyeji C.M., Dunsin O., Adekiya A.O., Suleiman K.O., Chinedum C., Okunlola F.O., Joseph, Abiodun, Ejue S.W., Adesola O.O., Olofintoye T.A.J., Owolabi I.O., Synergistic and antagonistic effects of soil applied P and Zn

fertilizers on the performance, minerals and heavy metal composition of groundnut, *Open Agriculture*, 2020, Vol. 5, No. 1, pp. 1–9.

61. Adriano D.C., *Trace Elements in Terrestrial Environments. Biogeochemistry, Bioavailability, and Risks of Metals*, New York: Springer, 2001, 867 p.

62. Birsin M.A., Adak M.S., Inal A., Aksu A., Gunes A., Mineral element distribution and accumulation patterns within two barley cultivars, *Journal of plant nutrition*, 2010, Vol. 33, No. 2, pp. 267–284.

63. Cuypers A., Remans T., Weyens N., Colpaert J., Vassilev A., Vangronsveld J., Soil-plant relationships of heavy metals and metalloids, *Heavy metals in soils*, Dordrecht: Springer, 2013, pp. 161–193.

64. Dhaliwal S.S., Naresh R.K., Mandal A., Singh R., Dhaliwal M.K., Dynamics and transformations of micronutrients in agricultural soils as influenced by organic matter build-up: A review, *Environmental and Sustainability Indicators*, 2019, Vol. 1, 100007.

65. Di Gioia F., Petropoulos S.A., Ozores-Hampton M., Morgan K., Roskopf E.N., Zinc and Iron Agronomic Biofortification of Brassicaceae Microgreens, *Agronomy*, 2019, Vol. 9, No. 11, 677.

66. Ehrenfeld J.G., Ravit B., Elgersma K., Feedback in the plant-soil system, *Annu. Rev. Environ. Resour.*, 2005, Vol. 30, pp. 75–115.

67. Fang J., Wen B., Shan X.Q., Lin J.M., Owens G., Is an adjusted rhizosphere-based method valid for field assessment of metal phytoavailability? Application to non-contaminated soils, *Environmental Pollution*, 2007, Vol. 150, No. 2, pp. 209–217.

68. Feng M.-H., Shan X.-Q., Zhang S.-Z., Wen B., Comparison of a rhizosphere-based method with other one-step extraction methods for assessing the bioavailability of soil metals to wheat, *Chemosphere*, 2005, Vol. 59, pp. 939–949.

69. Han W.X., Fang J.Y., Reich P.B., Ian Woodward F., Wang Z.H., Biogeography and variability of eleven mineral elements in plant leaves across gradients of climate, soil and plant functional type in China, *Ecology Letters*, 2011, Vol. 14, No. 8, pp. 788–796.

70. Hosseinpour A.R., Motaghian H., Evaluating of many chemical extractants for assessment of Zn and Pb uptake by bean in polluted soils, *Journal of soil science and plant nutrition*, 2015, Vol. 15, No. 1, pp. 24–34.

71. Horta M. do C., Torrent J., The Olsen P method as an agronomic and environmental test for predicting phosphate release from acid soils, *Nutr. Cycl. Agroecosyst.*, 2007, pp. 283–292.

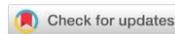
72. Ivezić V., Lončarić Z., Engler M., Kerovec D., Singh B.R., Comparison of different extraction methods representing available and total concentrations of Cd, Cu, Fe, Mn and Zn in soil, *Poljoprivreda*, 2013, Vol. 19, No. 1, pp. 53–58.

73. Kabata-Pendias A., Trace Elements in Soils and Plants. 4<sup>th</sup> edition. Florida. USA: CRC Press/Taylor-Francis Group, 2011, 548 p.
74. Leinweber P., Paetsch C., Schulten H.R., Heavy metal retention by organo-mineral particle-size fractions from soils in long-term agricultural experiments, *Archives of Agronomy and Soil Science*, 1995, Vol. 39, No. 4, pp. 271–285.
75. Malvi U.R., Interaction of micronutrients with major nutrients with special reference to potassium, *Karnataka Journal of Agricultural Sciences*, 2011, Vol. 24, No. 1, pp. 106–109.
76. Menzies N.W., Donn M.J., Kopittke P.M., Evaluation of extractants for estimation of the phytoavailable trace metals in soils, *Environmental pollution*, 2007, Vol. 145, No. 1, pp. 121–130.
77. Plekhanova I.O., Bambusheva V.A., Extraction methods for studying the fractional composition of heavy metals in soils and their comparative assessment, *Eurasian Soil Science*, 2010, Vol. 43, No. 9, pp. 1004–1010
78. Qian J., Shan X., Wang Z., Tu Q., Distribution and plant availability of heavy metals in different particle-size fractions of soil, *Science of the Total Environment*, 1996, Vol. 187, No. 2, pp. 131–141.
79. Rao C.R.M., Sahuquillo A., Sanchez J.F.L., A review of the different methods applied in environmental geochemistry for single and sequential extraction of trace elements in soils and related materials, *Water, Air, and Soil Pollution*, 2008, Vol. 189, No. 1, pp. 291–333.
80. Reimann C., Englmaier P., Fabian K., Gough L., Lamothe P., Smith D., Biogeochemical plant–soil interaction: variable element composition in leaves of four plant species collected along a south–north transect at the southern tip of Norway, *Science of the Total Environment*, 2015, Vol. 506, pp. 480–495.
81. Rietra R.P.J.J., Heinen M., Dimkpa C.O., Bindraban P.S., Effects of nutrient antagonism and synergism on yield and fertilizer use efficiency, *Communications in soil science and plant analysis*, 2017, Vol. 48, No. 16, pp. 1895–1920.
82. Shan X., Chen B., Evaluation of sequential extraction for speciation of trace metals in model soil containing natural minerals and humic acid, *Analytical Chemistry*, 1993, Vol. 65, pp. 802–807, DOI: [10.1021/ac00054a026](https://doi.org/10.1021/ac00054a026).
83. Siromlya T.I., On available forms of chemical compounds in soils, *Contemporary Problems of Ecology*, 2009, Vol. 2, pp. 678–685.
84. Wu J., Zeng H., Zhao F., Chen C., Liu W., Yang B., Zhang W., Recognizing the role of plant species composition in the modification of soil nutrients and water in rubber agroforestry systems, *Science of The Total Environment*, 2020, Vol. 723, 138042.

85. Xie K., Cakmak I., Wang S., Zhang F., Guo S., Synergistic and antagonistic interactions between potassium and magnesium in higher plants, *The Crop Journal*, 2021, Vol. 9, No. 2, pp. 249–256.

УДК 631.4

DOI: 10.19047/0136-1694-2022-110-148-166



### Ссылки для цитирования:

Васильев Т.А. Оценка рисков палеобиозагрязнений ландшафтов при деградации криолитозоны на примере оленьих пастбищ Республики Саха (Якутия) // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2022. Вып. 110. С. 148-166. DOI: 10.19047/0136-1694-2022-110-148-166

### Cite this article as:

Vasiliev T.A., Risk assessment of paleo-bio-contamination of landscapes resulting from permafrost degradation by the example of reindeer pastures in the Republic of Sakha (Yakutia), Dokuchaev Soil Bulletin, 2022, V. 110, pp. 148-166, DOI: 10.19047/0136-1694-2022-110-148-166

## Оценка рисков палеобиозагрязнений ландшафтов при деградации криолитозоны на примере оленьих пастбищ Республики Саха (Якутия)

© 2022 г. Т. А. Васильев

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

<https://orcid.org/0000-0003-1041-4402>, e-mail: [tarasvasiliev44@gmail.com](mailto:tarasvasiliev44@gmail.com).

Поступила в редакцию 14.01.2021, после доработки 10.03.2022,  
принята к публикации 24.05.2022

**Резюме:** Продемонстрирована возможность ранжирования зон агроландшафтов по рискам потенциальных эпизоотий и эпидемий, связанных с биозагрязнением. Показано, что задача агроэкологической оценки земель не может концептуально целостно решаться без учета всех форм загрязнений. Биозагрязнения агроландшафтов, носящие как обратимый (сорняки), так и необратимый характер (паразиты), рассмотрены как формы почвенной деградации. Таяние ледников и деградация криолитозоны (почв “вечной” мерзлоты) при наблюдаемых процессах глобального потепления определяет ряд вызовов. Например, климатически обусловленная трансформация плейстоценовой биоты приводит к выделению парникового газа метана и существенно повышает угрозу ускорения сценария потепления. В данной работе рассматриваются последствия палеобиотического характера: при “таянии

мерзлоты” особую опасность представляют патогенные организмы, ранее находившиеся в биосферной изоляции. Отмечено, что при выходе из криобиоза некоторые из них сохраняют свои жизненные функции. Такие организмы способны привести к биозагрязнениям почв, имеющим как обратимое, так и необратимое течение, и могут послужить причиной новых вспышек эпизоотий. Предлагается выделять и оценивать зоны риска палеобактериальных заболеваний методом геометрической стратификации. Метод дает возможность определить и обозначить зоны риска заражения патогенными организмами конкретных географических регионов. В данной работе представлена оценка таких зон риска заражения для северного оленя (*Rangifer tarandus*) высокопатогенным возбудителем – сибирской язвой (*Bacillus anthracis*) – с привязкой к административным единицам (районам) республики Саха (Якутия). Полученные таким образом результаты зонирования не только описывают существующую экологическую ситуацию и создают основу для ее понимания, но и могут служить основанием при разработке рекомендаций для грамотного принятия административных решений в отношении регламента дальнейшего использования изученных ландшафтов.

**Ключевые слова:** деградация почв, биозагрязнение, геометрическая стратификация, палеобактериальное загрязнение.

## **Risk assessment of paleo-bio-contamination of landscapes resulting from permafrost degradation by the example of reindeer pastures in the Republic of Sakha (Yakutia)**

© 2022 T. A. Vasiliev

Federal Research Centre “V.V. Dokuchaev Soil Science Institute”,  
7 Bld. 2 Pyzhevskiy per., Moscow 119017, Russian Federation,  
<https://orcid.org/0000-0003-1041-4402>, e-mail: [tarasvasiliev44@gmail.com](mailto:tarasvasiliev44@gmail.com).

Received 14.01.2021, Revised 10.03.2022, Accepted 24.05.2022

**Abstract:** The possibility of ranking agro-landscape zones (using computer modeling) according to the risks of potential epizootics and epidemics associated with bio-contamination has been demonstrated. The task of agroecological land assessment cannot be conceptually solved without taking into account all forms of contamination. Bio-contamination of agricultural landscapes, both reversible (weeds) and irreversible (for example, anthrax spores *Bacillus anthracis*), is considered as a form of permafrost soils

degradation. The melting of glaciers and permafrost thawing influenced by global warming determine a number of challenges. In particular, the climatically-driven transformation of the Pleistocene biota leads to the release of greenhouse gases, including methane, which is an order of magnitude stronger than carbon dioxide in terms of its contribution to the greenhouse effect and significantly increases the threat of accelerating warming. This paper examines the consequences of paleobiotic nature: during “thawing of tundra” pathogenic organisms, that were previously in biospheric isolation, pose a threat. It is noted that some of them retain their vital functions when emerging from cryobiosis. Such organisms are capable of causing soil bio-contamination, both reversible and irreversible, and can cause new outbreaks of repeated epizootics. It is proposed to identify and assess the risk zones of paleo-bio-contamination by the method of geometric stratification. The method allows identification and designation of the risk zones of pathogen infestation in specific geographical regions. This paper presents an assessment of such risk zones for reindeer (*Rangifer tarandus*) infection with a highly pathogenic anthrax causative agent (*Bacillus anthracis*) in relation to the administrative units (regions) of the Republic of Sakha (Yakutia). The zoning results obtained in this way not only characterize the existing ecological situation and create the basis for its understanding, but can also serve as a basis for the development of recommendations for competent administrative decision-making on the regulation of further use of the studied landscapes.

**Keywords:** soil degradation, bio-contamination, geometric stratification, paleo-bio-contamination.

## ВВЕДЕНИЕ

### Биоагрязнения как форма деградации почв

Системный уровень почвоведения как научной дисциплины с аналитической детализацией процессов, в частности, деградации почв, сочетается в последнее время в исследованиях с иерархически более высоким уровнем ландшафтного подхода, способствующего интегральному охвату актуальных проблем землепользования.

Известны следующие типы деградации почв:

- технологическая деградация, включающая нарушение земель, физическую деградацию, агроистощение;
- эрозия, включающая водную эрозию и дефляцию (ветровую эрозию);
- засоление, включающее собственно засоление и осолонце-

вание;

- заболачивание;
- загрязнения (в том числе биозагрязнения).

На уровне ландшафтной оценки (отметим, что климат – одна из характеристик ландшафта) виды деградаций существенно дополняются аридизацией (опустыниванием), различными формами экологических трансформаций вплоть до социально значимых феноменов ([Перевергин, Козлов, 2018](#)).

Термин “паразитарное загрязнение” (ПЗ) был предложен в 1994 г. профессорами М.Д. Сониным, С.А. Беэром и В.А. Ройтманом ([Сонин, 1997](#)) для любых экосистем, в частности, реализовывалась программа по изучению ПЗ мегаполиса Москвы ([Перевергин, 2018](#)). При переводе на английский терминологически более точным определением было принято не “pollution”, подобно загрязнению почв тяжелыми металлами, а “contamination”. В настоящее время поисковые системы сети Интернет на запрос “parasitic contamination of soil” адресуют пользователей к работам, в основном посвященным почвообитающим стадиям паразитов человека и животных, что однако не исключает важности проблемы почвенных фитопаразитов. При этом, например, сорняки не являются паразитами, в то же время засоренность поля трудноискоренимым горчаком ползучим (*Rhaponticum repens*) снижает оценку почвенного плодородия и позволяет говорить о биозагрязнении.

Преобладающая тенденция учета в прикладном почвоведении в качестве характеристики почвенного плодородия именно “полезной” биоты (олигохеты, сапробиота, азотфиксирующие бактерии и т. д.) традиционно “отдавала на откуп” изучение “вредной” педофауны другим дисциплинам – “Защите растений” и “Паразитологии”. Отсутствие междисциплинарной координации приводит к разночтениям, в том числе из-за разноплановости системных уровней: земля-почва-ландшафт, что неоднократно отмечалось В.И. Кирюшиным: “Возникшая лавина научной информации, распыленной по множеству позиций, трудно поддается осмыслению и обобщению. Возникает проблема ее структурирования и интеграции” ([Кирюшин, 2015](#)). Переход от оценки почвенного плодородия (или деградации почв) к агроэкологической оценке

земель и выше – агроландшафтов – по определению требует если не единого, то согласованного (непротиворечивого) междисциплинарного подхода ([Перевертин, 2018](#)).

В связи с этим термин “биозагрязнение” представляется концептуально более логичным в системе оценки деградации почв, чем, например, предложенный академиком М.С. Соколовым термин “здоровье почв”, отражающий свойство экологической устойчивости ([Глинушкин и др., 2016](#)). В целом место биозагрязнений почв среди прочих форм деградации агроландшафтов показано на рисунке 1.



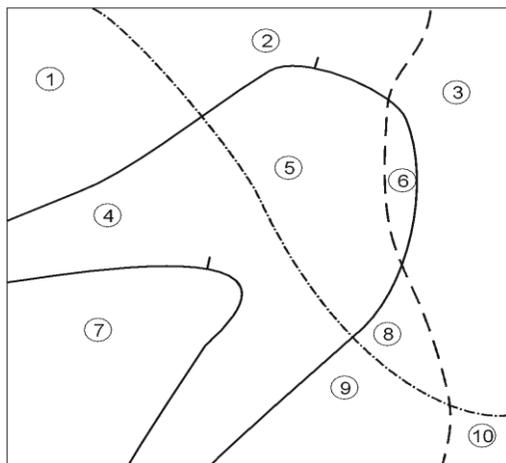
**Рис. 1.** Формы ландшафтной деградации, включая биозагрязнения.

**Fig. 1.** Forms of landscape degradation, including bio-contamination.

## ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Метод геометрической стратификации для выделения уникальных контуров сочетания почвенных разностей представлен на картограмме (рис. 2). Метод геометрической стратификации схож

с методикой ландшафтного анализа в области определения элементарных ареалов агроландшафта (ЭАА) (Кирюшин, 2004). Подобным образом стратифицировались сложившиеся производственные участки, физически приоритетно ограниченные дорогами, водоемами, административными и технологическими границами и т. д.



**Рис. 2.** Применение метода геометрической стратификации для выделения уникальных контуров сочетания почвенных разностей на картограмме:

- горизонтали микрорельефа;
- - - - - линия разности по механическому составу почвы;
- . - . - граница очага нематодного заражения почвы.

**Fig. 2.** Application of geometric stratification method to identify the unique contours of the combination of soil differences on the map:

- microrelief isohypse lines;
- - - - - line, dividing soils according to their texture;
- . - . - boundary of nematode soil infestation locus.

После нанесения на картограмму всех линий оцениваемых параметров было получено 10 уникальных замкнутых контуров (каждый обладает уникальным набором признаков), далее они нумеруются и каждому может быть присвоен соответствующий цвет.

В настоящей работе определялись риски палеобио-загрязнения оленьих пастбищ Республики Саха (Якутия). Площадь Республики составляет 3.084 млн км<sup>2</sup>, пастбища занимают около 550 тыс. км<sup>2</sup>, т. е. примерно 1/6 часть территории. Поголовье домашних северных оленей на 2020 г. составляло около 145 тыс. Слой контуров оленьих пастбищ для картограммы векторизован из атласа ([Географический атлас, 2000](#)). Слой контуров степени деградации криолитозоны векторизован из источника, приведенного на рисунке 3 ([Ершов, 1997](#)), где смоделированы сценарии таяния вечной мерзлоты на основе Геокриологических карт России и СССР, которые вошли в компиляции ([Brown, 1997](#)), и более свежих глобальных карт. Обе карты приведены к единой проекции WGS 84. Работа выполнялась автором с помощью пакета ArcGIS/Esri ArcMap 10.6.

Методика оценки риска палеобиозагрязнения оленьих пастбищ:

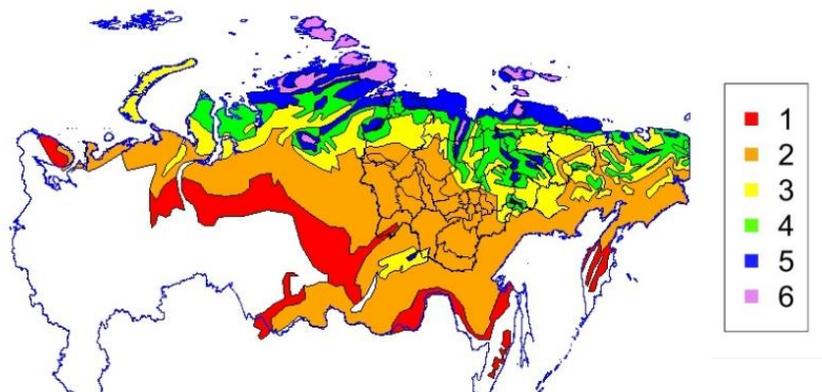
**А)** Три карты накладывались друг на друга: прогнозная геокриологическая, карта оленьих пастбищ и административная. В данной работе не использовался рельеф напрямую, его влияние заложено в модель протаивания почвы ([Ершов, 1997](#)). В случае учета микрорельефа, механического состава и очагового заражения почвы для конкретного административного региона метод может быть представлен, как показано рисунке 3, для трех факторов, определяющих границы деления территории.

На карте Республики Саха (Якутия) выделялись контуры, соответствующие риску заражения, которые были выявлены при наложении слоев: контуров оленьих пастбищ и степени деградации криолитозоны по 5-балльной шкале. Каждому баллу соответствуют цвета с повышением интенсивности цветовой гаммы в привязке к интенсивности деградации криолитозоны.

**Б)** Оценки и ранжирования рисков заражения по административным единицам (районам). Для каждого конкретного района определяли общую площадь пастбищ, площадь пересечений с каждой зоной протаивания мерзлоты. Затем вычисляли средневзвешенный риск заражения пастбищ в районе ( $r$ ):

$$r = \frac{\sum_i S_i k_i}{\sum_i S_i},$$

где  $i$  – номер контура, полученного в результате стратификации,  
 $S_i$  – площадь этого контура,  
 $k_i$  – соответствующий ему риск заражения, зависящий от степени протаивания мерзлоты (цвет на рис. 3).



**Рис. 3.** Векторизованная автором прогнозная геокриологическая карта на 110-й год от начала возможного глобального потепления по сценарию ИГКЭ (Ершов, 1997). 1 – область протаявшей мерзлоты; 2 – область распространения мерзлоты несливающегося типа с глубиной залегания кровли от 5 до 20 м; 3 – область островного распространения мерзлоты; 4–6 – область сплошного распространения мерзлоты, различающейся по температуре:  $t_0 = (-1) - (-5) \text{ } ^\circ\text{C}$  (область 4),  $t_0 = (-5) - (-6) \text{ } ^\circ\text{C}$  (область 5) и  $t_0 = (-6) - (-8) \text{ } ^\circ\text{C}$  (область 6).

**Fig. 3.** Vectorized geocryological map forecasting the 110<sup>th</sup> year from the beginning of possible global warming according to the IGCE scenario (Institute of Global Climate and Ecology) (Ershov, 1997). 1 – region of thawed permafrost; 2 – region with permafrost depth of 5–20 m, which is covered by shallow seasonal freeze-thaw layer (active layer), and in freezing period it does not consolidate with permafrost; 3 – region with spotty distribution of permafrost; 4–6 – region of continuous permafrost with different temperatures:  $t_0 = (-1) - (-5) \text{ } ^\circ\text{C}$  (region 4),  $t_0 = (-5) - (-6) \text{ } ^\circ\text{C}$  (region 5) and  $t_0 = (-6) - (-8) \text{ } ^\circ\text{C}$  (region 6).

Для построения карты рисков заражения пастбищ использовалась линейная зависимость риска от степени протаивания:

$$k_i = 7 - n_i,$$

где  $n_i$  – номер зоны протаивания.

Большей степени протаивания соответствует больший риск. Также рассматривались зависимости выпуклого и вогнутого вида (логарифмическая и квадратичная), которые показали качественно похожий результат для ранжирования и группировки. Районы группировались по величине суммарного риска ( $R$ ):

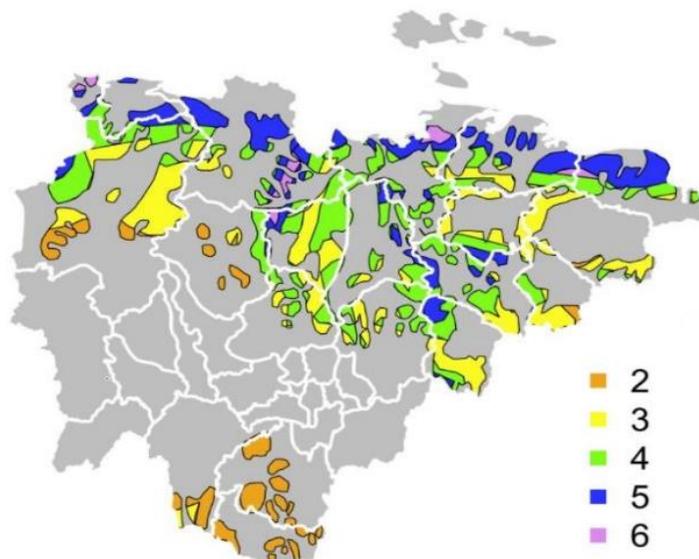
$$R = \sum_i S_i k_i.$$

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На рисунке 4 представлены полученные дифференцированные зоны риска заражения оленьих пастбищ. Видно, что каждое отдельное пастбище, как правило, пересекается с несколькими зонами протаивания. В легенде картограммы указан красный цвет – наивысший риск заражения, который на представленной карте отсутствует. Он соответствует еще одному фактору (слою) – факту случившихся ранее вспышек инфекции, приведших к массовому падежу оленей, что, безусловно, повышает риск рецидива ([Short, 2017](#)). Этот фактор с соответствующей раскраской контура в красный цвет может быть представлен для п-ва Ямал (именно 1-й балл наивысшего риска – красный по признаку рецидива в отличие от рис. 1), но для Якутии пока сочтен неактуальным, хотя возможность его применения в данной модели предусмотрена.

В таблице 1 представлены результаты для районов республики, ранжированные по убыванию суммарного риска ( $R$ ). Суммарный риск для района вычисляли путем суммирования площадей пересечения контуров с весом в соответствии с предполагаемой степенью протаивания мерзлоты. В таблице приведена информация об общей площади района, суммарной площади пастбищ внутри района и их разбивка по площадям пересечения с зонами протаивания мерзлоты, а также средневзвешенный риск для района. Средневзвешенный риск заражения указывает на среднюю оценку рискованности всех пастбищ по 5-балльной шкале, в то

время как суммарный риск отражает масштаб риска и абсолютное количество “усилий” при организации мероприятий, связанных с управлением потенциальной проблемой в данном районе.



**Рис. 4.** Дифференциальные зоны риска заражения оленьих пастбищ, определяемые по пересечению с областями разной степени протаивания: с областью протаявшей мерзлоты (2), с областью распространения мерзлоты несливающегося типа с глубиной залегания кровли от 5 до 20 м (3), с областью островного распространения мерзлоты (4) и с областями сплошного распространения мерзлоты, различающейся по температуре (5, 6).

**Fig. 4.** Differential risk zones for reindeer pasture infestation, defined by overlap with areas of varying degrees of thawing: (2) – region of thawed permafrost; (3) – region with permafrost at the depth of 5–20 m, non consolidated with seasonal freeze-thaw layer; (4) – region with spotty distribution of permafrost; (5, 6) – region of continuous permafrost with different temperatures.

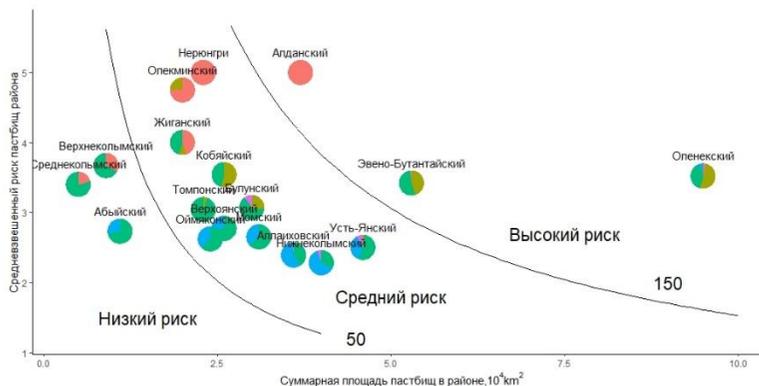
**Таблица 1.** Районы Якутии, ранжированные по суммарному риску заражения пастбищ.  
**Table 1.** Yakutia districts ranked by total risk of pasture infestation.

Район РС(Я)	Площадь, тыс. кв.км	Общая площадь пастбищ, тыс. кв.км	Площадь пересечения с зонами протаивания (зоны 1-6)						Средневзвешенный риск	Суммарный риск
			1	2	3	4	5	6		
Оленекский	320	95	0	3	49	37	6	0	3,5	334
Алданский	158	37	0	37	0	0	0	0	5	185
Эвено-Бытантайский	81	53	0	0	24	28	0	1	3,4	181
ГО Нерюнгри	95	23	0	23	0	0	0	0	5,0	115
Усть-Янский	121	46	0	0	1	25	16	4	2,5	115
Олекминский	167	20	0	15	5	0	0	0	4,8	95
Кобяйский	105	26	0	0	14	12	0	0	3,5	92
Булунский	183	30	0	0	8	19	0	3	3,1	92
Нижнеколымский	88	40	0	0	0	13	25	2	2,3	91
Аллаиховский	102	36	0	0	0	15	20	1	2,4	86
Момский	104	31	0	0	0	20	11	0	2,6	82
Жиганский	138	20	0	9	2	9	0	0	4,0	80
Верхоянский	111	26	0	0	0	20	6	0	2,8	72
Томпонский	136	23	0	0	1	22	0	0	3,0	70
Оймяконский	93	24	0	0	0	15	9	0	2,6	63
Верхнеколымский	67	9	0	3	0	6	0	0	3,7	33
Абыйский	71	11	0	0	0	8	3	0	2,7	30
Среднеколымский	124	5	0	1	0	4	0	0	3,4	17

Рисунок 5 представляет собой оценку риска заражения пастбищ для каждого административного района Республики. Полученные оценки, показанные в виде расположения районов в координатах “суммарная площадь пастбищ” – “средневзвешенный риск” их заражения, наглядно позволяют сгруппировать административные районы в группы риска. Каждый район отмечен круговой диаграммой, показывающей соотношение площадей пастбищ, находящихся в различных зонах протаивания: 2 – пастбища в зоне протаявшей мерзлоты, 3 – в области распространения мерзлоты несливающегося типа с глубиной залегания кровли от 5 до 20 м, 4 – в области островного распространения мерзлоты и в областях сплошного распространения мерзлоты, различающейся по температуре (5, 6). Изолинии суммарного риска (50 и 150) делят график на три области. В зону низкого риска попадают три района – Верхнеколымский, Абыйский и Среднеколымский, в зону высокого риска – Оленекский, Алданский и Эвено-Бутантайский. Остальные районы располагаются в области среднего риска заражения пастбищ.

Подобно тому как весеннее снеготаяние в мегаполисекратно увеличивает объемы подлежащих утилизации загрязнений, латентно присутствовавших в зимнее время, планетарное потепление также неизбежно детерминирует ряд серьезных проблем (вызовов). Особую тревогу представляет выход из криобиоза высокопатогенных вредных организмов. Объективно ускорившиеся процессы глобального потепления приводят к масштабным процессам деградации ледников и почв криолитозоны (“вечной” мерзлоты). Ландшафтно-климатические изменения способны активизировать палеобиоту, ранее находившуюся в биосферной изоляции. В частности, исследования актуальности возможных негативных последствий в ходе изменения климата в Арктическом регионе для скотомогильников проведены в недавних работах ([Ревич и др., 2021](#); [Игловский и др., 2021](#)). Наряду с CO<sub>2</sub> серьезную угрозу действительно глобального масштаба при “таянии тундры” представляет эмиссия метана (CH<sub>4</sub>), образующегося при трансформации огромных запасов плейстоценовой биогенной органики ранее “законсервированной” в вечной мерзлоте. Этот газ более чем на порядок “эффективнее” CO<sub>2</sub> по вкладу в парниковый эффект и

вполне реальной представляется угроза возникновения значимого контура положительной обратной связи в процессе катастрофического сценария потепления ([Перевертин, 2019](#); [Эдельгериев, 2019](#)).



**Рис. 5.** Оценка риска заражения пастбищ для районов. Сплошные черные линии (гиперболы) являются изолиниями суммарного риска (равного 50 и 150, соответствующие величинам среднего суммарного риска по всем районам  $\pm$  станд.  $\text{jk}$ клонение /  $\sqrt{2}$ ) и разделяют координатное пространство условно на три области – низкого, среднего и высокого риска.

**Fig. 5.** Estimated risk of pasture infestation for the districts. The solid black lines (hyperbolas) are total risk isolines (equal to 50 and 150, corresponding to the average total risk for all districts  $\pm$  standard deviation /  $\sqrt{2}$ ) and divide the coordinate space conditionally into three areas – low, medium and high risk.

Впрочем, биота “мамонтового периода” может дойти до нас и непосредственно в живом виде ([Shatilovich, 2011](#); [Shmakova, 2021](#)). В пробах почв криолитозоны соответствующего возраста (32 и 42 тыс. лет) в Якутии (низовья р. Колыма и р. Алазея) были обнаружены самки нематод в состоянии криобиоза. При размораживании в лабораторных условиях в Институте физико-химических проблем почвоведения они восстановили функции передвижения и питания, что послужило поводом для резонанс-

ных сообщений в ряде СМИ даже федерального уровня. Например: “Гости из прошлого: ученые оживили древних червей” (Российская газета, 27 июля 2018 г.). Конечно важно, что нематоды относятся к животным, но среди “оттаявших” особей не отмечены высокопатогенные гельминты. Впрочем, для более простых организмов криобиоз достаточно давно известен, например, споры бактерий сохраняют жизнеспособность миллионы лет. Очень тревожным прецедентом является эпизоотия сибирской язвы на Ямале в 2016 г., когда аномально жаркое лето с активизацией таяния мерзлоты привело к падежу десятков тысяч голов северного оленя. Вспышка эпизоотии *Rangifer tarandus* представляла(ет) реальную угрозу трансформации эпидемических процессов. Сейчас невозможно определить в каких слоях почвы был “законсервирован” возбудитель болезни – периода плейстоцена или голоцена, но это и не принципиально в формате оценки потенциального паразитарного загрязнения почв (ландшафтов).

Полученные в данной работе результаты можно рассматривать как “первое приближение”. Более комплексная оценка риска палеобиозагрязнений требует учета и иных факторов (рельеф и почвы, как минимум).

Планируемый этап совершенствования данной оценочной модели рисков в дальнейшей работе – учет особенностей почвенного рельефа. Подобно примеру геометрической стратификации (рис. 2) область “плато” соответствует классической тундре с изолированными озерами и болотами, в то время как дифференцированный рельеф (пологий склон/крутой склон), несомненно, определяет контуры рисков в связи с влагопереносом инфекционного начала (Сагитов, 2018).

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Активно протекающие процессы деградации криолитозоны, принявшие беспрецедентные масштабы, в настоящее время актуализируют новые вызовы. Ландшафтно-климатические изменения способны активизировать палеобиоту почв ранее находившуюся в биосферной изоляции. Особую опасность представляет выход из криобиоза высокопатогенных вредных организмов. Детоксикация агроландшафтов в ряде случаев может оказаться не только техно-

логически-проблематичной (паразитические фитонематоды), но и неразрешимой (оттаивание стихийных скотомогильников сибирской язвы *Bacillus anthracis* с необходимостью агроландшафтного отчуждения загрязнённых земель).

Метод геометрической стратификации позволяет оценивать и ранжировать риски палеобиозагрязнений почв. Согласно приведенным результатам расчетов для территории республики Саха (Якутия), наибольшие риски активизации палеобиозагрязнений отмечены для Оленекского, Алданского и Эвено-Бутонтайского районов (улусов), наименьшие – для Верхнеколымского, Среднеколымского и Абыйского.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Географический атлас “Республика Саха (Якутия)”. Роскартография, 2000.
2. Глинушкин А.П., Соколов М.С., Торопова Е.Ю. Фитосанитарные и гигиенические требования к здоровой почве. М.: “Издательство Агрорус”, 2016. 288 с.
3. Геокриологическая карта СССР. Масштаб 1 : 2 500 000 / Под ред. Ершова Э.Д. М., 1991.
4. Ершов Э.Д. Деградация мерзлоты при возможном глобальном потеплении климата // Соросовский образовательный журнал. 1997. № 2. С. 70–74. URL: [http://window.edu.ru/resource/834/20834/files/9702\\_070.pdf](http://window.edu.ru/resource/834/20834/files/9702_070.pdf).
5. Игловский С.А., Крячюнас В.В. Сибирезвенные захоронения – потенциальная угроза при изменении криолитозоны Европейского Севера России // Анализ риска здоровью. 2021. № 1. С. 108–114. DOI: [10.21668/health.risk/2021.1.11](https://doi.org/10.21668/health.risk/2021.1.11).
6. Кирюшин В.И. Развитие представлений о функциях ландшафтов в связи с задачами оптимизации природопользования // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2015. Вып. 80. С. 16–25. DOI: [10.19047/0136-1694-2015-80-16-25](https://doi.org/10.19047/0136-1694-2015-80-16-25).
7. Кирюшин В.И., Иванов А.Л. Модель адаптивно-ландшафтного земледелия Владимирского ополья // Вестник российской сельскохозяйственной науки / Под ред. В.И. Кирюшина и А.Л. Иванова. М.: “Агроконсалт”, 2004. 456 с.
8. Перевертин К.А. Некоторые фитосанитарные аспекты деградации почв агроландшафтов России в условиях климатических изменений // Национальный доклад “Глобальный климат и почвенный покров России:

оценка рисков и эколого-экономических последствий деградации земель. Адаптивные системы и технологии рационального природопользования (сельское и лесное хозяйство)” (под редакцией А.И. Бедрицкого). М.: Почвенный ин-т им. В.В. Докучаева, ГЕОС, 2018. С. 182–185.

9. *Перевертин К.А., Васильев Т.А.* Экспессы рисков палеобиозагрязнений ландшафтов в условиях глобального потепления // Мат-лы конф. “Математическое Моделирование в Экологии”. Пущино, 2019. С. 158–159.

10. *Перевертин К.А., Козлов Д.Н.* Учет паразитарного загрязнения почв в формате внедрения АЛСЗ (Адаптивно ландшафтных систем земледелия) // Труды Центра паразитологии. 2018. Т. L. М.: Товарищество научных изданий КМК. С. 192–195.

11. *Ревич Б.А., Шапошников Д.А., Раичич С.Р., Сабурова С.А., Симонова Е.Г.* Зонирование административных районов российской арктики по степени опасности разрушения скотомогильников в результате деградации многолетней мерзлоты // Анализ риска здоровью. 2021. № 1. С. 115–125. DOI: [10.21668/health.risk/2021.1.12](https://doi.org/10.21668/health.risk/2021.1.12).

12. *Сагитов А.О., Перевертин К.А., Васильев Т.А.* Климатические детерминанты фитосанитарной деградации агроландшафтов – от расширения ареалов вредных организмов до актуализации палеобиозагрязнений почв // В кн.: Материалы международной научной конференции “Становление и развитие науки по защите и карантину растений в Республике Казахстан”. Алматы: КазНИИЗКР, 2018. С. 530–535.

13. *Сонин М.Д., Беэр С.А., Ройтман В.А.* Паразитарные системы в условиях антропопрессии (проблемы паразитарного загрязнения) // Паразитология. 1997. Т. 31. № 5. С. 453–457.

14. *Эдельгериев Р.С.-Х.* Глобальный климат и почвенный покров России опустынивание и деградация земель, институциональные, инфраструктурные, технологические меры адаптации (сельское и лесное хозяйство) / Под ред. Эдельгериева Р.С.-Х. Т. 2. М.: ООО Издательство МБА, 2019. 476 с.

15. *Brown J., Ferrians O.J.Jr., Heginbottom J.A., Melnikov E.S.* (eds.). Circum-Arctic map of permafrost and ground-ice conditions // Geological Survey in Cooperation with the Circum-Pacific Council for Energy and Mineral Resources. Circum-Pacific Map Series CP-45, scale 1:10,000,000, 1 sheet. Washington, DC, 1997.

16. *Perevertin K.A., Vasiliev T.A.* Biological contamination of soils as a form of agricultural landscapes degradation 2020 // Landscape science and landscape ecology: Considering responses to global changes. Proc. 1st IALE-Russia International Online Conference. Moscow, 2020, p. 192. URL:

[http://iale.conflab.ru/files/IALE-Russia2020\\_Abstracts.pdf](http://iale.conflab.ru/files/IALE-Russia2020_Abstracts.pdf).

17. *Shatilovich A.V., Tchesunov T.V., Neretina I.P., Grabarnik S.V., Gubin T.A., Vishnivetskaya T.C., Onstott E.M., Rivkina E.M.* Viable nematodes from late Pleistocene permafrost of the Kolyma River lowland // *Doklady Akademii Nauk*. 2018. Vol. 480. No. 2. pp. 253–255.

18. *Shmakova L., Malavin S., Iakovenko N., Vishnivetskaya T., Shain D., Plewka M., Rivkina E.* A living bdelloid rotifer from 24,000-year-old Arctic permafrost // *Current Biology*. 2021. Vol. 31. Iss. 11. pp. 712–713.

19. *Short E., Caminade C., Thomas B.* Climate Change Contribution to the Emergence or Re-Emergence of Parasitic Diseases // *Infect Dis (Auckl)*. 2017. DOI: [10.1177/1178633617732296](https://doi.org/10.1177/1178633617732296).

## REFERENCES

1. *Geograficheskii atlas Respublika Sakha (Yakutiya)* (Geographic atlas Republic of Sakha (Yakutia)), Roskartografiya, 2000.

2. *Glinushkin A.P., Sokolov M.S., Toropova E.Yu., Fitosanitarnye i gigenicheskie trebovaniya k zdorovoi pochve* (Phytosanitary and hygienic requirements for healthy soil), Moscow: “Izdatel'stvo Agrorus”, 2016, 288 p.

3. *Ershov E.D., Geokriologicheskaja karta SSSR, scale 1 : 2,500,000*, Moscow, 1991.

4. *Ershov E.D., Degradatsiya merzloty pri vozmozhnom global'nom poteplenii klimata* (Degradation of permafrost with a possible global warming of the climate), *Sorosovskii obrazovatel'nyi zhurnal*, 1997, No. 2, pp. 70–74, URL: [http://window.edu.ru/resource/834/20834/files/9702\\_070.pdf](http://window.edu.ru/resource/834/20834/files/9702_070.pdf).

5. *Iglovskij S.A., Krjauchjunas V.V., Sibirejazvennye zahoronenija – potencial'naja ugroza pri izmenenii kriolitozony Evropejskogo Severa Rossii* (Anthrax burials – a potential threat when changing the permafrost zone of the European North of Russia), *Analiz riska zdorov'ju*, 2021, Vol. 1, pp. 108–114, DOI: [10.21668/health.risk/2021.1.11](https://doi.org/10.21668/health.risk/2021.1.11).

6. *Kiriushin V.I., The development of concepts of landscape functions in view of optimizing the environment conservation*, *Dokuchaev Soil Bulletin*, 2015, Vol. 80, pp. 16–25, DOI: [10.19047/0136-1694-2015-80-16-25](https://doi.org/10.19047/0136-1694-2015-80-16-25).

7. *Kiryushin V.I., Ivanov A.L., Model' adaptivno-landshaftnogo zemledeliya Vladimirskogo opol'ya* (Model of adaptive landscape farming in Vladimir opolye), *Vestnik rossiiskoi sel'skokhozyaistvennoi nauki*, Moscow: “Agrokonsalt”, 2004, 456 p.

8. *Perevertin K.A., Some phytosanitary aspects of soil degradation of agrolandscapes in Russia under climate change*, In: National report “Global climate and soil cover in Russia: assessment of risks and ecological and economic consequences of land degradation. Adaptive systems and

- technologies for rational nature management (agriculture and forestry)”, Moscow: Pochvennyi in-t im. V.V. Dokuchaeva, GEOS, 2018, pp. 182–185.
9. Perevertin K.A., Vasil'ev T.A., Ekstsessy riskov paleobiozagyaznenii landshaftov v usloviyakh global'nogo potepeniya (Excesses of the risks of paleobio-pollution of landscapes in the context of global warming), *Proc. Conf. Matematicheskoe Modelirovanie v Ekologii* (Mathematical modeling in Ecology), Pushchino, 2019, pp. 158–159.
10. Perevertin K.A., Kozlov D.N., Uchet parazitarnogo zagryazneniya pochv v formate vnedreniya ALSZ (Adaptivno landshaftnykh sistem zemledeliya) (Accounting for parasitic soil contamination in the format of the ALSZ implementation (Adaptive landscape farming systems)), *Trudy Tsentra parazitologii*, 2018, T. L, Moscow: Tovarischestvo nauchnykh izdaniy KMK, pp.192-195.
11. Revich B.A., Shaposhnikov D.A. et al., Zonirovanie administrativnykh raionov rossiiskoi artkiki po stepeni opasnosti razrusheniya skotomogil'nikov v rezul'tate degradatsii mnogoletnei merzloty (Zoning of the administrative districts of the Russian arkika by the degree of danger of destruction of cattle burial grounds as a result of degradation of permafrost), *Analiz riska zdorov'yu*, 2021, No. 1, pp. 115–125, DOI: [10.21668/health.risk/2021.1.12](https://doi.org/10.21668/health.risk/2021.1.12).
12. Sagitov A.O., Perevertin K.A., Vasil'ev T.A., Klimaticheskie determinanty fitosanitarnoi degradatsii agrolandshaftov – ot rasshireniya arealov vrednykh organizmov do aktualizatsii paleobiozagyaznenii pochv (Climatic determinants of phytosanitary degradation of agricultural landscapes – from the expansion of the habitats of harmful organisms to the actualization of paleobiological contamination of soils), *Proc. Int. Sci. Conf. “Stanovlenie i razvitie nauki po zashchite i karantinu rastenii v Respublike Kazakhstan”* (Establishment and development of plant protection and quarantine in the Republic of Kazakhstan), Almaty: KazNII ZKR, 2018, pp. 530–535.
13. Sonin M.D., Bejer S.A., Rojtmann V.A., Parazitarnye sistemy v usloviyakh antropopressii (problemy parazitarnogo zagryazneniya) (Parasitic systems in conditions of anthropopression (problems of parasitic contamination)), *Parazitologiya*, 1997, Vol. 31, No. 5, pp. 453–457.
14. Edel'geriev R.S.-Kh. (Ed.), *Global'nyi klimat i pochvennyi pokrov Rossii opustynivanie i degradatsiya zemel', institutsional'nye, infrastrukturalnye, tekhnologicheskie mery adaptatsii (sel'skoe i lesnoe khozyaistvo)* (Global climate and soil cover in Russia desertification and land degradation, institutional, infrastructural, technological adaptation measures (agriculture and forestry)), Vol. 2, Moscow: OOO Izdatel'stvo MBA, 2019, 476 p.
15. Brown J., Ferrians O.J.Jr., Heginbottom J.A., Melnikov E.S. (eds.), *Circum-Arctic map of permafrost and ground-ice conditions*, Geological Survey in Cooperation with the Circum-Pacific Council for Energy and

Mineral Resources. Circum-Pacific Map Series CP-45, scale 1 : 10,000,000, 1 sheet. Washington, DC, 1997.

16. Perevertin K.A., Vasiliev T.A., Biological contamination of soils as a form of agricultural landscapes degradation 2020, *Landscape science and landscape ecology: Considering responses to global changes*, Proc. 1st IALE-Russia International Online Conference, Moscow, 2020, p. 192, URL: [http://iale.confab.ru/files/IALE-Russia2020\\_Abstracts.pdf](http://iale.confab.ru/files/IALE-Russia2020_Abstracts.pdf).

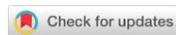
17. Shatilovich A.V., Tchesunov T.V., Neretina I.P., Grabarnik S.V., Gubin T.A., Vishnivetskaya T.C., Onstott E.M., Rivkina E.M., Viable nematodes from late Pleistocene permafrost of the Kolyma River lowland, *Doklady Akademii Nauk*, 2018, Vol. 480, No. 2, pp. 253–255.

18. Shmakova L., Malavin S., Iakovenko N., Vishnivetskaya T., Shain D., Plewka M., Rivkina E., A living bdelloid rotifer from 24,000-year-old Arctic permafrost, *Current Biology*, 2021, Vol. 31, Iss. 11, pp. 712–713.

19. Short E., Caminade C., Thomas B., Climate Change Contribution to the Emergence or Re-Emergence of Parasitic Diseases, *Infect Dis (Auckl)*, 2017, DOI: [10.1177/1178633617732296](https://doi.org/10.1177/1178633617732296).

УДК 631.4

DOI: 10.19047/0136-1694-2022-110-167-192



### Ссылки для цитирования:

Панкова Е.И., Ямнова И.А., Назарова Л.Ф., Соловьев Д.А., Исаев В.А. О работах Почвенного института им. В.В. Докучаева в Узбекистане // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2022. Вып. 110. С. 167-192. DOI: 10.19047/0136-1694-2022-110-167-192

### Cite this article as:

Pankova E.I., Yamnova I.A., Nazarova L.F., Soloviev D.A., Isaev V.A., On the works of the Dokuchaev Soil Science Institute in Uzbekistan, Dokuchaev Soil Bulletin, 2022, V. 110, pp. 167-192, DOI: 10.19047/0136-1694-2022-110-167-192

## О работах Почвенного института им. В.В. Докучаева в Узбекистане

© 2022 г. Е. И. Панкова\*, И. А. Ямнова\*\*, Л.Ф. Назарова, Д. А. Соловьев, В.А. Исаев

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

*\* e-mail: [pankova22@mail.ru](mailto:pankova22@mail.ru),*

*\*\* e-mail: [irinayamnova@mail.ru](mailto:irinayamnova@mail.ru).*

*Поступила в редакцию 08.02.2022, принята к публикации 24.05.2022*

**Резюме:** В статье рассмотрена история работы сотрудников Почвенного института им. В.В. Докучаева в Узбекистане, проведенной совместно с почвоведом Узбекистана. Эти работы были начаты в 30–40 гг. XX в. Особенно активно они проводились в годы Великой Отечественной войны, в период, когда Почвенный институт был эвакуирован в Ташкент. В эти годы в совместных работах участвовали и российские, и узбекские почвоведы. Среди российских почвоведов можно назвать выдающихся ученых: В.А. Ковду, А.А. Роде, А.Н. Розанова и многих других, внесших свой вклад в изучение почв Узбекистана. Особенно подробно в статье анализируются работы сотрудников Почвенного института им. В.В. Докучаева, выполненные на базе стационара в Голодной степи в связи с освоением засоленных земель на фоне создания новых оросительных систем в Средней Азии. В статье рассмотрены разные направления работ сотрудников стационара: вопросы мелиоративного освоения засоленных почв, картографирования засоления на основе

дистанционных методов исследования, углубленное изучение свойств мелиорированных почв с использованием химических, микроморфологических, минералогических и других методов изучения засоления и гипсоносности почв Новой Зоны Орошения (НЗО) Голодной и Джизакской степей. Результаты работ были представлены в серии публикаций. В 1990-х годах сотрудничество временно прекратилось, но уже в начале XXI в. оно было возобновлено.

**Ключевые слова:** засоление, гипсоносность, мелиорация, дистанционная диагностика засоления почв.

## On the works of the Dokuchaev Soil Science Institute in Uzbekistan

© 2022 E. I. Pankova\*, I. A. Yamnova\*\*, L. F. Nazarova,  
D. A. Soloviev, V. A. Isaev

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

\*e-mail: [pankova22@mail.ru](mailto:pankova22@mail.ru),

\*\*e-mail: [irinayamnova@mail.ru](mailto:irinayamnova@mail.ru).

*Received 08.02.2022, Accepted 24.05.2022*

**Abstract:** The article considers the history of the work of the Dokuchaev Soil Science Institute researchers in Uzbekistan, conducted jointly with soil scientists from Uzbekistan. These works were started in 1930–1940s. They were especially active during the Great Patriotic War, when the Soil Institute was evacuated to Tashkent. During these years, both Russian and Uzbek soil scientists participated in joint work. Outstanding scientists can be named among Russian researchers: V.A. Kovda, A.A. Rode, A.N. Rozanov and many others who contributed to the study of Uzbekistan soils. The work of the researchers from the Dokuchaev Soil Science Institute, performed on the basis of a station in the Hungry Steppe (Mirzacho'l) in connection with the development of saline lands during the creation of new irrigation systems in Central Asia, is analyzed in particular detail. Various work areas of the station researchers are discussed in the article: issues of ameliorative development of saline soils, salinity mapping based on remote sensing methods, detailed study of the reclaimed soils properties using chemical, micromorphological, mineralogical and other research methods for the determination of salinity and gypsum content of soils in the New Irrigation Zone (NIZ) of Hungry and Jizzakh steppes. The results of the work were presented in a series of publications. In the 1990s, cooperation was temporarily ceased, but at the beginning of the 21<sup>st</sup> century it was resumed.

**Keywords:** salinization, gypsum content, melioration, remote sensing of soil salinity.

## ВВЕДЕНИЕ

В 2021 г. Научно-исследовательский институт почвоведения и агрохимии Узбекистана отметил 100-ю годовщину своего рождения. Известно, что история создания и жизнь института почвоведения и агрохимии Узбекистана неразрывно связана с Почвенным институтом им. В.В. Докучаева России. Ведущие почвоведы России – сотрудники Почвенного института им. В.В. Докучаева – внесли свой вклад в развитие почвенной науки Средней Азии, и в том числе Узбекистана.

Сотрудничество почвоведов Почвенного института им. В.В. Докучаева и почвоведов Узбекистана началось с первых лет существования нашего института и продолжается до настоящего времени ([Панкова, Хитров, 2004](#)).

Ведущие сотрудники Почвенного института им. В.В. Докучаева: В.А. Ковда ([1946](#); [1947](#); [1948](#); [1968](#)), И.Н. Антипов-Каратаев, А.А. Роде, А.Н. Розанов ([1948](#); [1951](#)), С.А. Шувалов, М.А. Панков ([1956](#); [1957](#); [1962](#)) и др. специалисты работали в Узбекистане совместно с почвоведом республики. Итоги этих работ были отражены во многих публикациях, в том числе в монографии В.А. Ковды ([1946](#); [1947](#)) и в книге “Почвы аридной зоны как объект орошения” ([1968](#)).

В 1936 г. Почвенный институт им. В.В. Докучаева начал исследования засоленных почв Голодной степи Узбекистана. Орошение Голодной степи уже в первые годы освоения сопровождалось развитием вторичного засоления. В 1936–1942 гг. были начаты почвенные исследования в совхозе Пахта-Арал. Работы проводились под руководством В.А. Ковды и М.А. Панкова.

В более поздние годы работы по изучению засоленности почв центральной части Голодной степи проводились В.А. Ковдой, А.Н. Розановым, М.А. Панковым и другими почвоведом, изучающими генезис и проблему мелиорации засоленных почв этого региона. В Голодной степи Узбекистана был организован стационар (Пахта-Арал), на котором проводились режимные наблюдения за миграцией солей в орошаемых почвах (В.А. Ковда,

А.Н. Розанов, Ю.П. Лебедев). Следует особо отметить среди сотрудников стационара А.Н. Розанова, знатока Средней Азии, который за год до организации стационара был приглашен на работу в Почвенный институт им. В.В. Докучаева. Результаты работ в совхозе Пахта-Арал (Голодной степи) послужили фундаментом для создания теории развития вторичного засоления и методов борьбы с засолением орошаемых земель на базе комплексной мелиорации.

Великая Отечественная война 1941–1945 гг. способствовала сокращению проводимых научных работ, но даже в это трудное время, благодаря поддержке и гостеприимству братского узбекского народа, Почвенный институт им. В.В. Докучаева имел возможность продолжить начатые ранее исследования.

В октябре 1941 г., по решению правительства, институты АН СССР были эвакуированы в восточные регионы Европейской территории и в Среднюю Азию. Большая часть сотрудников Почвенного института им. В.В. Докучаева была эвакуирована в Ташкент и начала работать на базе Почвенного института Узбекской АН. С 1 июня 1942 г. А.А. Роде был назначен и. о. директора Почвенного института в Ташкенте.

Коллектив эвакуированных в Ташкент сотрудников Почвенного института вместе с сотрудниками Института ботаники и почвоведения Узбекского филиала АН СССР под руководством В.А. Ковды вели комплексные исследования по проблеме повышения плодородия почв под хлопчатником в целях получения высоких урожаев. Изучались процессы соленакопления в почвах Голодной степи, вопросы борьбы с их засолением, а также проблемы регулирования плодородия почв. В этих работах принимали участие Ю.П. Лебедев, Н.А. Димо, М.А. Панков и другие ученые. Итоги работ были опубликованы после войны в двухтомной монографии В.А. Ковды “Происхождение и режим засоленных почв” (1946–1947).

Сотрудники лаборатории биологии почв под руководством М.М. Кононовой изучали применение азотобактерина. А.А. Роде, А.Ф. Большаков изучали водный режим и физические свойства почв богарной зоны Узбекистана в связи с проблемой повышения плодородия почв под зерновыми культурами. Эти исследования

впоследствии положили начало развитию исследований влагооборота в системе почвы – растения – атмосфера.

В планы института была введена дополнительная тема по предложению НКЗ Уз ССР “Культура картофеля на почвах различной степени засоления”. По договору с Ташкентской овощной станцией А.А. Лазарев и А.Н. Розанов проводили полевые работы по теме: “Культура сахарной свеклы на засоленных и заболоченных почвах”. И.П. Сердобольский и Б.А. Ганжа работали над проблемой “Химизация каучуконосов”. Под руководством Б.Б. Полынова выполнялся большой объем работ по оборонной тематике по заданию комиссии, возглавляемой академиком А.Е. Ферсманом.

Одновременно с научными исследованиями сотрудники Почвенного института, находившиеся в Ташкенте, оказывали помощь в подготовке местных и эвакуированных из Москвы научных кадров; принимали участие в уборке хлопка, в уничтожении вредителей с.-х. культур, в строительстве Северного Ташкентского канала.

После реэвакуации сотрудников Почвенного института им. В.В. Докучаева в Москву связь с Узбекистаном не была прервана. Ввиду того, что перед отъездом из эвакуации были заложены полевые опыты, сотрудники Почвенного института им. В.В. Докучаева продолжили свою работу в Средней Азии. Так, Е.П. Логунова выезжала в Ташкент для учета урожая с.-х. культур на заложенных весной опытах с бактериальными удобрениями и сбора образцов почв и растений; В.Е. Гуссак – на Аккавакскую опытную станцию с инспекцией заложенных опытов с посевами картофеля и риса; А.Н. Розанов – в Мирзачуль для исследования почв под посадками сахарной свеклы.

В послевоенное время сотрудниками Почвенного института им. В.В. Докучаева были продолжены работы по изучению почв Среднеазиатского региона. Наряду с изучением засоленных почв большое место в работах Почвенного института им. В.В. Докучаева занимало изучение географии и генезиса других почв аридной зоны. В монографии А.Н. Розанова “Сероземы Средней Азии” (1951) подведены итоги почвенных исследований, проведенных в Средней Азии как самим автором, так и школой талантливого докучаевца и организатора почвенных исследований в Средней Азии

– Н.А. Димо. Под руководством А.Н. Розанова были изучены староорошаемые почвы Узбекистана (В.П. Костюченко). Эти работы были продолжены в оазисах Таджикской и Туркменской ССР. Результаты исследований отражены в монографии “Влияние орошения на почвы оазисов Средней Азии” (Н.Г. Минашина, В.А. Молодцов, Е.П. Логунова, 1963).

В данной статье ниже мы остановимся более подробно на работах сотрудников Почвенного института им. В.В. Докучаева в Узбекистане в 60–90х годах XX в. Это время активного развития почвенной науки в республиках Средней Азии и, в первую очередь, в Узбекистане, где в этот период осваивались новые земли на основе современных методов мелиорации. Одним из главных мелиоративных объектов в Узбекистане в 60–80 годы XX в. была Новая Зона Орошения Голодной степи (НЗО). Известно, что основная проблема в этом регионе связана с освоением засоленных земель на фоне инженерного дренажа. Это новый современный мелиоративный объект Узбекистана.

Обобщение опыта мелиорации засоленных почв нашло отражение в широко известном “Международном руководстве по орошению и дренажу засоленных почв” (1966), подготовленном под руководством В.А. Ковды, и монографии “Орошение и дренаж засоленных земель и их изменение при длительном использовании” (В.А. Ковда, Н.Г. Минашина, 1967). Была разработана и издана в 1967 г. новая классификация засоленных почв, которая до настоящего времени широко используется в научных разработках и в практических целях (Н.И. Базилевич, Е.И. Панкова, 1967).

В это время на территории НЗО Голодной степи работало большое количество научных и научно-производственных (мелиоративных) институтов Советского Союза, в том числе Почвенный институт им. В.В. Докучаева. Сотрудничество ведущих почвоведов страны Почвенного института имени В.В. Докучаева и Института почвоведения и агрохимии Узбекистана, естественно, еще более укрепились.

К этому периоду относится создание на территории НЗО в Голодной степи в совхозе № 5 им. Ю.А. Гагарина постоянно действующей базы – стационара Почвенного института им. В.В. Докучаева (Рис. 1).



**Рис. 1.** Сотрудники стационара в совхозе № 5, Голодная степь, 1972 г. Сидят: В.М. Мазиков, Е.И. Панкова, В.А. Молодцов, В.П. Игнатова; стоят: З.М. Мурадова, Н.Г. Вуколов, водитель, В.Я. Мотузов, студентки МГУ – И.В. Стоянова, Т.И. Борисочкина.

**Fig. 1.** The Researchers of the station at sovkhoz No. 5, Hungry Steppe, 1972. Sitting: V.M. Mazikov, E.I. Pankova, V.A. Molodtsov, V.P. Ignatov; standing: Z.M. Muradova, N.G. Vukolov, driver, V.Ya. Motuzov, MSU students – I.V. Stoyanova, T.I. Borisochkina.

Руководителем стационара в 60-е годы был сотрудник отдела генезиса и мелиорации засоленных почв Почвенного института им. В.В. Докучаева В.Ю. Маргулис. На стационаре работала большая группа специалистов Почвенного института: В.С. Муратова, В.А. Молодцов, В.П. Игнатова, В.Я. Мотузов, Е.И. Панкова, В.А. Исаев, В.М. Мазиков, И.А. Ямнова, З.М. Мурадова и др. Сотрудники стационара выполняли хозяйственные работы с институтом Средазгипроводхлопок. Этот институт руководил работами по мелиорации почв на территории всей Средней Азии, он занимал огромное здание в центре Ташкента. Темы работ согласовы-

вались с руководителем отдела изысканий этого института – В.Р. Шредером. Работы сотрудников стационара выполнялись в контакте с сотрудниками этого отдела (Г.Г. Решетов, Д. Зубков, Г.М. Хасанханова и др.). Сотрудники стационара взаимодействовали также с учеными Почвенного института Узбекистана (А.М. Расуловым, О.К. Камиловым и др.) (Рис. 2).



**Рис. 2.** Каршинская степь, 1974 г. Справа налево: Н.В. Кимберг, В.А. Исаев, В.Р. Шредер, водитель.

**Fig. 2.** Karshi steppe, 1974. From right to left: N.V. Kimberg, V.A. Isaev, V.R. Schroeder, driver.

Главной научной проблемой, решаемой на стационаре, являлась проблема, связанная с промывкой и освоением засоленных почв на фоне инженерного, постоянно действующего дренажа. Объектом исследования были засоленные, гипсоносные почвы Голодной степи. Работой руководил В.Ю. Маргулис. Этой проблемой кроме В.Ю. Маргулиса (1971; 1975) занимались и другие сотрудники стационара – В.А. Молодцов (1967; [1975](#)), В.Я. Мотузов, В.А. Муратова ([Муратова, Маргулис, 1971](#)), З.М. Мурадова ([Молодцов, Мурадова, 1976](#)) и др. На основе полу-

ченных им материалов по промывке тяжелых по гранулометрическому составу солончаков в 1971 г. В.Ю. Маргулис защитил кандидатскую диссертацию “Методы количественной оценки засоленности почв и уточнение состава изысканий для промывок засоленных земель”. По заданию ВАСХНИЛ проводилась работа по проверке эффективности электромелиорации (В.Я. Мотузов и др.). Электромелиорация не выявила преимуществ данного метода по сравнению с промывкой на фоне глубокого дренажа, усиленного временным мелким дренажом: были установлены большие расходы как электроэнергии, так и металла на изготовление электродов.

В течение многих лет на стационаре работал В.А. Молодцов – удивительно добрый человек и талантливый ученый. Тема его работы касалась изучения мелиоративных особенностей почв в разных природных районах НЗО Голодной и Джизакской степей. Он занимался также вопросами оценки эффективности работы дренажа при мелиорации засоленных почв ([Молодцов, Панкова, 1979](#)). К сожалению, он не успел завершить свою докторскую диссертацию из-за тяжелой болезни и ранней смерти. Под руководством В.А. Молодцова на территории 5-го совхоза НЗО Голодной степи З.М. Мурадова проводила работы по теме, касающейся влияния гипсовых горизонтов на мелиоративные свойства почв. По итогам этой работы ею была защищена кандидатская диссертация. Н.Г. Вуколов изучал особенности мелиоративных свойств солонцовых почв Обручевского понижения в Джизакской степи ([Вуколов, 1975](#)).

Голодностепский стационар Почвенного института им. В.В. Докучаева был не только крупным научно-экспериментальным полигоном на новоорошаемых трудномелиорируемых засоленных почвах Узбекистана, но и учебно-образовательным центром, где проходили обучение и стажировку студенты многих ВУЗов страны, в том числе и студенты из зарубежных стран (Египта, Монголии, Шри-Ланки, Сомали и др.).

Для осуществления работ, проводившихся на базе земель совхоза № 5, находящегося на наиболее тяжелых в мелиоративном отношении землях, на стационаре была создана химическая лаборатория, которая выполняла большой объем химических анализов. Руководила лабораторией В.П. Игнатова. В.А. Молодцовым и

В.П. Игнатовой для нейтральных и щелочных засоленных почв был модифицирован метод Пфедфера по определению обменных катионов ([Молодцов, Игнатова, 1975](#)), применяющийся в лаборатории Почвенного института до сих пор.

Впервые была разработана методика дистанционной оценки засоления орошаемых почв по состоянию (выпадам) хлопчатника. Руководителем этой темы была Е.И. Панкова. Над данной проблемой работала группа сотрудников стационара (В.М. Мазиков и др.). Эта тема разрабатывалась впервые для орошаемых почв Средней Азии. В итоге была создана и опубликована методика по дистанционной оценке полей хлопчатника ([Панкова, Мазиков, 1975; 1976; 1985; Панкова и др., 1978](#)). На основе разработанной методики (авторы Е.И. Панкова, В.М. Мазиков) впервые В.М. Мазиковым была составлена карта засоления почв НЗО Голодной степи (Мазиков, 1978). Эта работа легла в основу кандидатской диссертации В.М. Мазикова (1981).

В начале 1980-х годов благодаря активной поддержке академика И.С. Рабочева был создан новый опорный пункт Почвенного института в поселке Бустон, в 17 км от г. Джизак, расположенного на подгорной равнине Туркестанского хребта. Проблема мелиоративного освоения подгорных равнин была в центре внимания директора института В.В. Егорова ([Егоров, 1977](#)). Такое расположение стационара в Джизакской степи было обусловлено началом освоения земель на территории подгорной равнины Туркестанского хребта. Была выделена территория площадью 100 га, на землях которой был построен современный научно-технический комплекс: 2-этажный лабораторный корпус, административный корпус, машинный двор с АЗС и гаражом, коттеджи для размещения сотрудников опорного пункта и приезжающих специалистов. Возглавил опорный пункт С.С. Кочубей; лабораторией руководила Л.В. Кочубей (рис. 3).



**Рис. 3.** Сотрудники стационара в пос. Бустон, Джизакская степь, 1987 г. Сидит С.С. Кочубей; стоят: А.О. Шмит, Е.И. Панкова, Ю.Р. Хакназаров, З.М. Мурадова, Л.В. Кочубей, И.А. Ямнова, Л.П. Копикова, студент Р. Хамзин.  
**Fig. 3.** Researchers of the station in Buston village, Jizzakh steppe, 1987. S.S. Kochubey is sitting; standing: A.O. Shmit, E.I. Pankova, Yu.R. Khaknazarov, Z.M. Muradova, L.V. Kochubey, I.A. Yamnova, L.P. Kopikova, student R. Khamzin.

Условия для плодотворной работы и комфортного проживания дали возможность работать здесь не только специалистам, занимающимся проблемой мелиорации засоленных почв, но и сотрудникам других отделов института – минералогам, микробиологам, микроморфологам и многим другим. На землях опорного пункта было проведено комплексное изучение почвенно-экологических условий для оценки современного состояния экосистем. Были заложены трансекты, характеризующие почвы Джизакской степи разного гидроморфизма, засоления и гипсоносности, всего 190 разрезов и скважин. Полученные результаты исследований, характеризующие природу и почвы Джизакской степи до начала ее мелиоративного освоения, были опубликованы в Научных трудах Почвенного института “Условия формирования и свойства трудномелиорируемых почв Джизакской степи” ([Условия..., 1990](#)). Была создана серия природных карт Джизакской степи м-ба 1 : 100 000 (литолого-геоморфологическая, почвенная, карта засоления и карта гипсоносности почв).

Особо следует выделить тему дистанционного изучения и картографирования засоленных почв. Под руководством Е.А. Панковой эту тему активно развивал Д.А. Соловьев. Аэро- и космическая съемка производилась институтом ВНИЦ “АИУС-агроресурсы”, с Ташкентским филиалом которого Почвенный институт плодотворно сотрудничал. Анализ и сопоставление архивных аэроснимков разных лет позволили разработать метод ретроспективной оценки динамики засоления почв. Д.А. Соловьевым была создана карта динамики засоления орошаемых почв НЗО Голодной степи масштаба 1 : 50 000. Работа по изучению засоления орошаемых почв хлопкосеющей зоны на основе анализа фотозображения имела большое практическое значение. Она позволяла проводить учет площадей почв, характеризующихся разной степенью засоления. На основе этих материалов Д.А. Соловьевым в 1989 г. была успешно защищена диссертационная работа по теме: “Дистанционный мониторинг засоления орошаемых почв Голодостепской подгорной равнины”. Итоги этой работы были обобщены и опубликованы в монографии Е.И. Панковой, Д.А. Соловьева “Дистанционный мониторинг засоления орошаемых почв” ([1993](#)).

Далее работа, касающаяся дистанционной диагностики засоления орошаемых почв на основе материалов космической съемки, была продолжена Д.И. Руховичем ([Панкова, Рухович, 1999](#)). В 2009 г. им была защищена кандидатская диссертация по теме: “Многолетняя динамика засоления орошаемых почв центральной части Голодной степи и методы ее выявления”, в которой был подведен итог 25-летнему мониторингу засоления почв в М 1 : 10 000 с временным шагом в 1 год. Показано, что для почв изучаемой территории установлено явление суперротации засоления почв, при котором распределение местоположения сильно засоленных почв меняется ежегодно, что не позволяет определить направление процессов засоления-рассоления, сравнивая карты, созданные только по двум срокам. При этом общий запас солей Голодной степи в метровом слое остается неизменным ([Рухович и др., 2010](#)). Для мониторинга столь высоко динамичного процесса в 2016 г. на примере мониторинга засоления почв Голодной степи была разработана методология сравнения разновременных почвенных карт в целях выявления и описания динамики почвенного покрова ([Рухович и др., 2016](#)). Дальнейший мониторинг засоления почв Голодной степи потребовал применения технологии больших спутниковых данных и глубокого машинного обучения. Таким образом, работа по дистанционной диагностике засоления орошаемых почв получила свое развитие на современном уровне.

Сотрудниками стационара решались и другие научные проблемы, при этом круг изучаемых проблем с каждым годом расширялся. Помимо вопросов мелиорации, а также методов картографирования засоления почв, большое внимание уделялось проблеме гипсоносности почв как фактору, ограничивающему плодородие орошаемых земель. С 1974 г. сотрудники Почвенного института им. В.В. Докучаева (Н.Г. Минашина, В.А. Исаев, Ю.Р. Хакназаров) проводили исследования по изучению закономерностей распространения и разработке способов мелиорации сильно гипсоносных почв нового массива орошения в междуречье рек Зеравшан и Кашкадарья (на границе Самаркандской, Бухарской, Кашкадарьинской и Навоинской областей). Успеху работ способствовало заинтересованное участие крупных узбекских почвоведов – Н.В. Кимберга, А.М. Расулова и др. В этот период

впервые была создана методика по оценке гипсоносности почв (Минашина, Егоров, 1984). По этой теме В.А. Исаевым была защищена кандидатская диссертация “Гипсоносные почвы подгорных равнин Зиатдин-Зирабулакских гор и их мелиоративные особенности” ([Исаев, 1983](#)).

Проблему, связанную с диагностикой засоления почв новыми методами, разрабатывала И.А. Ямнова. Эти материалы легли в основу ее кандидатской диссертации “Микроморфологическая и минералогическая диагностика засоления почв” ([Ямнова, 1989](#)). Были разработаны новые показатели – микроморфологические и минералогические – для диагностики засоления почв, которые позволили охарактеризовать профилеобразующие процессы исследуемых почв, а также конкретизировать понятие “тип засоления”, дополнив традиционную химическую характеристику минералогическим составом солей, разнообразием их форм и локализацией их в профиле.

В 1996 г. вышла в свет коллективная монография “Природное и антропогенное засоление почв бассейна Аральского моря (география, генезис, эволюция)” (Е.И. Панкова, И.П. Айдаров, И.А. Ямнова, А.Ф. Новикова, Н.С. Благоволин). В работе обобщены результаты многолетних исследований засоленных почв республик Средней Азии. Приведена серия карт, характеризующих географию и особенности засоления почв, вскрыты причины активации вторичного засоления на орошаемых землях. Обоснована неизбежность активации процессов засоления при орошении в условиях ирригационно-гидроморфного режима. Проанализированы причины возникновения экологического кризиса в бассейне Аральского моря.

На базе нового стационара планировалось развернуть масштабные работы по изучению подгорных равнин Средней Азии как объекта мелиорации. Однако жизнь внесла свои коррективы. События 90-х годов XX в. не позволили осуществить эти планы. После распада СССР Почвенный институт им. В.В. Докучаева временно прекратил работы в Средней Азии. Тем не менее, жизнь продолжается, и работы российских и узбекских ученых по совместному изучению почв среднеазиатского региона возобновились.

В 2008–2009 гг. была выполнена работа по изучению почв территории бывшего Сырдарьинского Опорного пункта Почвенного института им. В.В. Докучаева в пос. Бустон Зарбдарского района Джизакской области по теме “Закономерности изменения гипсоносных почв подгорной Голодностепской равнины под влиянием антропогенных факторов” (совместный проект РФФИ и ККРНТ Республики Узбекистан № 08-04-90266-Узб\_а). Руководителем работ являлись: со стороны Республики Узбекистан – Л.А. Гафурова, с российской стороны – И.А. Ямнова.

В ходе этой работы были детально изучены содержание и формы гипсовых новообразований в гидроморфных почвах Джизакской степи и их изменение в ходе мелиорации (Почвенный институт им. В.В. Докучаева), а также было изучено влияние засоления на агрохимические и микробиологические особенности почв (Ташкентский Аграрный Университет). Исследования проводились на территории бывшего опорного пункта, на разрезах, сохранившихся с 1987 г. Было показано, что за 20 лет мелиорации в почвах произошли существенные изменения – снижение содержания гипса, изменение его форм; также были определены основные микропризнаки генетических горизонтов изученных почв, что позволило диагностировать основные тренды элементарных почвообразовательных процессов в связи с изменением факторов почвообразования при осушении гидроморфных почв. На основе полученных результатов интегральных показателей эколого-биологического состояния почв были рекомендованы диагностические индикаторы деградации для засоленных гипсоносных почв полупустынной зоны. Данные критерии дают возможность оценки, картирования и ведения почвенно-экологического и почвенно-мелиоративного мониторинга.

В настоящее время нами завершена работа по обобщению материалов по исследованию почв Джизакской степи, полученных сотрудниками еще до начала ее мелиоративного освоения. Мы считаем, что эти материалы представляют научный и практический интерес на современном этапе развития науки. Для того чтобы понять, как меняется мелиоративная обстановка в регионе, важно сопоставить засоленность и гипсоносность почв и выявить их изменение за определенный период времени. Сопоставление

данных о засоленности и гипсоносности почв до начала мелиорации и в настоящее время позволит определить направленность процессов засоления и рассоления. Считаем, что совместные работы российских и узбекских ученых должны быть продолжены. Мы полагаем, что эта работа будет представлять интерес для будущих поколений, т. к. она позволит оценить изменение почв Джизакской степи и, следовательно, оценить эффективность мелиоративных мероприятий, проведенных в Джизакской степи в XXI в.

В заключение хотелось бы подчеркнуть, что работа по решению научных проблем объединяет почвоведов разных стран. Мы уверены, что почвоведы России и Узбекистана продолжат свои совместные исследования по изучению уникальной природы среднеазиатского региона.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Базилевич Н.И., Панкова Е.И.* Опыт классификации почв по засолению // Почвоведение. 1968. № 11. С. 3–16.
2. *Базилевич Н.И., Панкова Е.И.* Инструкция по учету засоленных земель. М.: Гипроводхоз, 1968. 50 с.
3. *Базилевич Н.И., Панкова Е.И.* Методические указания по учету засоленных почв // Инструкция по учету засоленных земель. М.: Гипроводхоз, 1968. С. 3–91.
4. *Васильев И.К., Решетов Г.Г., Шредер В.Р.* Мелиоративное состояние земель в новой зоне освоения // Хлопководство. 1975. № 7. С. 10–13.
5. *Вуколов Н.Г.* Засоление и состав поглощенных оснований почв Заамино-Хавастской межконусной депрессии // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 1975. Вып. 11. С. 34–41.
6. *Егоров В.В.* Происхождение и мелиоративные особенности предгорных равнин аридной зоны // Орошение и мелиорация. М.: Наука, 1977. С. 84–97.
7. *Исаев В.А.* Некоторые свойства гипсоносных почв и особенности их освоения (на примере Маликчуйской степи Уз ССР) // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 1979. Вып. 21. С. 3–5.
8. *Исаев В.А.* Гипсоносные почвы подгорных равнин Зиаэтин-Зирабулакских гор и их мелиоративные особенности: Автореф. дис. ... канд. с.-х. наук. М., 1983. 24 с.
9. *Ковда В.А.* Происхождение и режим засоленных почв. М.–Л.: Из-во АН СССР. Т. 1, 1946. 568 с. Т. 2, 1947. 375 с.

10. *Ковда В.А.* Краткий очерк геологии и рельефа Голодной степи // Почвы Голодной степи объект орошения и мелиорации. М.: Изд-во АН СССР, 1948. С. 43–74.
11. *Ковда В.А.* Почвы аридной зоны // Почвы аридной зоны как объект орошения. М.: Наука, 1968. С. 5–30.
12. *Копикова Л.П., Скулкин В.С., Шмит А.О.* Гидрохимическая оценка грунтовых вод территории Сырдарьинского опорного пункта. // Науч. тр. Почв. ин-та им. В.В. Докучаева ВАСХНИЛ. Условия формирования и свойства трудномелиорируемых почв Джизакской степи. М., 1990. С. 39–47.
13. *Минашина Н.Г.* Мелиорация засоленных земель. М.: Колос, 1978. 269 с.
14. *Молодцов В.А.* Причины низкого плодородия сероземно-луговых почв Джизакской степи // Почвоведение. № 9. 1980. С. 85–96.
15. *Молодцов В.А.* Сезонная динамика солей в почвах новой зоны орошения Голодной степи при промывках и орошении // Бюллетень Почвенного института им. В.В. Докучаева. 1975. Вып. IX. С. 11–23.
16. *Молодцов В.А., Игнатова В.П.* Об определении состава поглощенных оснований в засоленных почвах // Почвоведение. 1975. № 6. С. 123–127.
17. *Молодцов В.А., Мурадова З.М.* Изменение засоления сероземно-луговых почв новой зоны Голодной степи при промывках и орошении // Бюллетень Почвенного института им. В.В. Докучаева. 1975. Вып. IX. С. 3–10.
18. *Молодцов В.А., Эльманси М.М.* Применение дренажа для рассоления почв в Голодной степи // Почвоведение. 1970. № 6.
19. *Муратова В.С., Маргулис В.Ю.* Содержание токсичных солей в водных вытяжках и в почвенных растворах гипсоносных почв Голодной степи // Почвоведение. 1971. № 12. С. 87–99.
20. *Панков М.А.* Почвы Голодной степи и их засоление // Труды ин-та Почвоведения Каз ССР. Т. 7. Алма-Ата, 1956.
21. *Панков М.А.* Почвы Голодной степи // Материалы по производительным силам Уз ССР. 1957. Вып. 6.
22. *Панков М.А.* Процессы засоления и рассоления почв Голодной степи. Ташкент, 1962. 334 с.
23. *Панкова Е.И.* Опыт составления крупномасштабных карт засоления почв орошаемых территорий // Составление почвенных карт орошаемых территорий. Государственный ин-т по контролю за качеством сельскохозяйственных продуктов и почв. Будапешт, 1973. С. 27–33.
24. *Панкова Е.И., Айдаров И.П., Ямнова И.А., Новикова А.Ф., Благоволин Н.С.* Природное и антропогенное засоление почв бассейна

Аральского моря (география, генезис, эволюция). М.: Почвенный институт им. В.В. Докучаева, 1996. 187 с.

25. *Панкова Е.И., Головина Н.Н. и др.* Опыт оценки засоления почв орошаемых территорий Средней Азии по материалам космической съемки // Почвоведение. 1986. № 3. С. 138–146.

26. *Панкова Е.И., Мазиков В.М.* Методические вопросы использования аэрофотоснимков для характеристики засоления почв // Почвенно-мелиоративные процессы в районах нового орошения. Тр. Почв. ин-та им. В.В. Докучаева. 1975. С. 97–111.

27. *Панкова Е.И., Мазиков В.М.* Оценка засоления почв однородных по фотоизображению контуров // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 1975. Вып. 9. С. 24–34.

28. *Панкова Е.И., Мазиков В.М.* Оценка засоления орошаемых почв хлопковых полей по аэрофотоснимкам (на примере Голодной степи) // Почвоведение. 1976. № 5. С. 55–65.

29. *Панкова Е.И., Мазиков В.М.* Дистанционные методы исследования при составлении карт засоления орошаемых территорий // Тезисы докл. У делегатского съезда. 1977. Вып. 4. С. 272–273.

30. *Панкова Е.И., Мазиков В.М.* Методические рекомендации по использованию материалов аэрофотосъемки для оценки засоления почв и проведения солевых съемок орошаемых территорий хлопкосеющей зоны в крупных и средних масштабах. М., 1985. 73 с.

31. *Панкова Е.И., Мазиков В.М., Исаев В.А., Ямнова И.А.* Опыт использования аэрофотоснимков для характеристики засоления почв неорошаемых территорий сероземной зоны // Почвоведение. 1978. № 3. С. 82–85.

32. *Панкова Е.И., Молодцов В.А.* Результаты производственных промывок на землях нового орошения Голодной степи // Почвоведение. 1970. № 8. С. 106–118.

33. *Панкова Е.И., Молодцов В.А.* Солончаки сазовой зоны Голодностепской подгорной равнины и их мелиоративные особенности // Почвоведение. 1979. № 2. С. 116–129.

34. *Панкова Е.И., Мурадова З.М.* Почвенно-литолого-геоморфологическое районирование Голодностепской подгорной равнины // Условия формирования и свойства трудномелиорируемых почв Джизакской степи. М.: Почв. ин-т им. В.В. Докучаева, 1990. С. 4–12.

35. *Панкова Е.И., Рухович Д.И.* Дистанционный мониторинг засоления орошаемых почв аридных территорий // Почвоведение. 1999. № 2. С. 253–263.

36. *Панкова Е.И., Рухович Д.И.* Опыт оценки многолетней динамики засоления орошаемых почв Голодной степи по материалам дистанционного зондирования // Мат-лы IV съезда почвоведов и агрохимиков Узбекистана. Достижения почвенно-агрохимической науки – производству. Ташкент, 2005. С. 158–159.
37. *Панкова Е.И., Соловьев Д.А.* Дистанционный мониторинг засоления орошаемых почв. М.: Почвенный институт им. В.В. Докучаева РАСХН, 1993. 187 с.
38. *Панкова Е.И., Соловьев Д.А.* Дистанционный метод изучения динамики засоления орошаемых почв // Проблемы освоения пустынь. 1995. № 3. С. 39–41.
39. *Панкова Е.И., Соловьев Д.А.* Мониторинг засоления орошаемых почв Голодной степи по данным дистанционного зондирования // Современные естественные и антропогенные процессы в почвах и геосистемах. М.: Почв. ин-т им. В.В. Докучаева, 2006. 369 с.
40. *Панкова Е.И., Соловьев Д.А., Рухович Д.И., Савин И.Ю.* Организация мониторинга засоления почв орошаемых территорий центральной Азии с использованием данных дистанционного зондирования // Земельные ресурсы и продовольственная безопасность Центральной Азии и Закавказья. Рим, 2016. С. 309–369.
41. *Панкова Е.И., Хитров Н.Б.* История отдела генезиса и мелиорации засоленных почв Почвенного института им. В.В. Докучаева // Почвоведение. 2004. № 2. С. 243–250.
42. *Розанов А.Н.* Динамика пространственного развития вторичного засоления почв в Голодной степи // Труды Почвенного института. Т. 29. Почвы Голодной степи как объект орошения М.–Л., 1948. С. 324–342.
43. *Розанов А.Н.* Сероземы Средней Азии. М.: изд-во АН СССР, 1951. 459 с.
44. *Рухович Д.И.* Многолетняя динамика засоления орошаемых почв центральной части Голодной степи и методы ее выявления: Автореферат дис. ... канд. биол. наук. М., 2009. 24 с.
45. *Рухович Д.И., Панкова Е.И., Черноусенко Г.И., Королева П.В.* Многолетняя динамика засоления орошаемых почв Голодностепского плато и методы ее выявления по материалам дистанционного зондирования // Почвоведение. 2010. № 6. С. 728–739.
46. *Рухович Д.И., Симакова М.С., Куляница А.Л., Брызжев А.В., Королева П.В., Калинина Н.В., Черноусенко Г.И., Вильчевская Е.В., Долинина Е.А., Рухович С.В.* Методология сравнения разновременных почвенных карт в целях выявления и описания динамики почвенного покрова на примере мониторинга засоления почв // Почвоведение. 2016. № 2. С. 164–181.

47. Соловьев Д.А. Дистанционный мониторинг засоления орошаемых почв Голодностепской подгорной равнины: Дис. ... канд. с.-х. наук. М., 1989. 237 с.
48. Условия формирования и свойства трудномелиорируемых почв Джизакской степи / Л.Л. Шишов, Б.А. Зимовец (отв. ред.). М.: ВАСХНИЛ, Почв. ин-т им. В.В. Докучаева, 1990. 98 с.
49. Ямнова И.А. Микроморфологическая и минералогическая диагностика засоления почв: Автореф. дис. ... канд. биол. наук. М., 1989. 26 с.
50. Ямнова И.А. Гипсоносные почвы Джизакской степи // Условия формирования и свойства трудномелиорируемых почв Джизакской степи. М.: Почвенный ин-т им. В.В. Докучаева, 1990. С. 37–39.
51. Ямнова И.А., Голованов Д.Л. Формы и генезис гипсовых новообразований и их отражение на детальных почвенных картах аридных территорий // Почвоведение. 2010. № 8. С. 909–919.
52. Ямнова И.А., Панкова Е.И. Гипсовые новообразования и формирующие их элементарные почвообразовательные процессы // Почвоведение. 2013. № 12. С. 1423–1436.

## REFERENCES

1. Bazilevich N.I., Pankova E.I., Opyt klassifikatsii pochv po zasoleniyu (Experience in classifying soils by salinity), Pochvovedenie, 1968, No. 11, pp. 3–16.
2. Bazilevich N.I., Pankova E.I., *Instruktsiya po uchetu zasolennykh zemel'* (Instructions for accounting for saline lands), Moscow: Giprovodkhoz, 1968, 50 p.
3. Bazilevich N.I., Pankova E.I., Metodicheskie ukazaniya po uchetu zasolennykh pochv (Guidelines for accounting for saline soils), In: *Instruktsiya po uchetu zasolennykh zemel'* (Instructions for accounting for saline lands), Moscow: Giprovodkhoz, 1968, pp. 3–91.
4. Vasil'ev I.K., Reshetov G.G., Shreder V.R., Meliorativnoe sostoyanie zemel' v novoi zone osvoeniya (Ameliorative state of lands in the new development zone), *Khlopkovodstvo*, 1975, No. 7, pp. 10–13.
5. Vukolov N.G., Zasolenie i sostav pogloshchennykh osnovanii pochv Zaamino-Khavastskoi mezhkonusnoi depressii (Salinity and composition of absorbed soil bases in the Zaamino-Khavast intercone depression), *Dokuchaev Soil Bulletin*, 1975, Vol. 11, pp. 34–41.
6. Egorov V.V., Proiskhozhdenie i meliorativnye osobennosti predgornykh ravnin aridnoi zony (Origin and ameliorative features of the foothill plains of

the arid zone), In: *Oroshenie i melioratsiya* (Irrigation and melioration.), Moscow: Nauka, 1977, pp. 84–97.

7. Isaev V.A., Nekotorye svoystva gipsonosnykh pochv i osobennosti ikh osvoeniya (na primere Malikchul'skoi stepi Uz SSR) (Some properties of gypsum-bearing soils and features of their development (on the example of the Malikchul steppe of the Uzbek SSR)), *Dokuchaev Soil Bulletin*, 1979, Vol. 21, p. 3–5.

8. Isaev V.A., *Gipsonosnye pochvy podgornyykh ravnin Ziaetdin-Zirabulakskikh gor i ikh meliorativnye osobennosti: Avtoref. dis. ... kand. s.-kh. nauk* (Gypsum-bearing soils of the piedmont plains of the Ziaetdin-Zirabulak mountains and their ameliorative features, Extended abstract of cand. agric. sci. thesis), Moscow, 1983, 24 p.

9. Kovda V.A., *Proiskhozhdenie i rezhim zasolennykh pochv* (Extended abstract of cand. agric. sci. thesis), Moscow–Leningrad: Iz-vo AN SSSR, Vol. 1, 1946, 568 p.; Vol. 2, 1947, 375 p.

10. Kovda V.A., Kratkii ocherk geologii i rel'efa Golodnoi stepi (A brief outline of the geology and relief of the Hungry Steppe), In: *Pochvy Golodnoi stepi ob"ekt orosheniya i melioratsii* (Soils of the Hungry Steppe, an object of irrigation and melioration), Moscow: Izd-vo AN SSSR, 1948, pp. 43–74.

11. Kovda V.A., Pochvy aridnoi zony (Soils of the arid zone), In: *Pochvy aridnoi zony kak ob"ekt orosheniya* (Soils of the arid zone as an object of irrigation), Moscow: Nauka, 1968, pp. 5–30.

12. Kopikova L.P., Skulkin V.S., Shmit A.O., Gidrokhimicheskaya otsenka gruntovykh vod territorii Syrdar'inskogo opornogo punkta (Hydrochemical assessment of groundwater in the territory of the Syrdarya stronghold), In: *Nauch. tr. Pochv. in-ta im. V.V. Dokuchaeva VASKhNIL. Usloviya formirovaniya i svoystva trudnomelioriruemykh pochv Dzhizakskoi stepi* (Scientific works of V.V. Dokuchaev Soil Science Institute “Formation conditions and properties of hard-to-reclaim soils of the Jizzakh steppe”), Moscow, 1990, pp. 39–47.

13. Minashina N.G., *Melioratsiya zasolennykh zemel'* (Reclamation of saline lands), Moscow: Kolos, 1978, 269 p.

14. Molodtsov V.A., Prichiny nizkogo plodorodiya serozemno-lugovykh pochv Dzhizakskoi stepi (Causes of low fertility of sierozem-meadow soils of the Jizzakh steppe), *Pochvovedenie*, 1980, No. 9, pp. 85–96.

15. Molodtsov V.A., Sezonnaya dinamika solei v pochvakh novoi zony orosheniya Golodnoi steli pri promyvkhakh i oroshenii (Seasonal dynamics of salts in the soils of the new irrigation zone of the Golodnaya Stele during leaching and irrigation), *Dokuchaev Soil Bulletin*, 1975, Vol. IX, pp. 11–23.

16. Molodtsov V.A., Ignatova V.P., Ob opredelenii sostava pogloshchennykh osnovanii v zasolennykh pochvakh (On determination of the composition of absorbed bases in saline soils), *Pochvovedenie*, 1975, No. 6, pp. 123–127.
17. Molodtsov V.A., Muradova Z.M., Izmenenie zasoleniya serozemno-lugovykh pochv novoi zony Golodnoi stepi pri promyvках i oroshenii (Changes in salinity of sierozem-meadow soils of the new zone of the Hungry Steppe during leaching and irrigation), *Dokuchaev Soil Bulletin*, 1975, Vol. IX, pp. 3–10.
18. Molodtsov V.A., El'mansi M.M., Primenenie drenazha dlya rassoleniya pochv v Golodnoi stepi (Application of drainage for soil desalinization in the Hungry Steppe), *Pochvovedenie*, 1970, No. 6.
19. Muratova B.C., Margulis V.Yu., Soderzhanie toksichnykh solei v vodnykh vytyazhkakh i v pochvennykh rastvorakh gipsonosnykh pochv Golodnoi stepi (The content of toxic salts in water extracts and in soil solutions of gypsum-bearing soils of the Hungry Steppe), *Pochvovedenie*, 1971, No. 12, pp. 87–99.
20. Pankov M.A., Pochvy Golodnoi stepi i ikh zasolenie (Soils of the Hungry Steppe and their salinization), In: *Trudy in-ta Pochvovedeniya Kaz SSR* (Works of the Institute of Soil Science of the Kazakh SSR), Vol. 7, Alma-Ata, 1956.
21. Pankov M.A., Pochvy Golodnoi stepi (Soils of the Hungry Steppe), In: *Materialy po proizvoditel'nyim silam Uz SSR* (Materials on the productive forces of the Uzbek SSR), 1957, Vol. 6.
22. Pankov M.A., *Protsessy zasoleniya i rassoleniya pochv Golodnoi stepi* (Processes of salinization and desalinization of soils of the Hungry Steppe), Tashkent, 1962, 334 p.
23. Pankova E.I., Opyt sostavleniya krupnomasshtabnykh kart zasoleniya pochv oroshaemykh territorii (Experience in compiling large-scale maps of soil salinity in irrigated areas), In: *Sostavlenie pochvennykh kart oroshaemykh territorii. Gosudarstvennyi in-t po kontrolyu za kachestvom sel'skokhozyaistvennykh produktov i pochv* (Drawing up soil maps of irrigated areas. State institute for quality control of agricultural products and soils), Budapest, 1973, pp. 27–33.
24. Pankova E.I., Aidarov I.P., Yamnova I.A., Novikova A.F., Blagovolin N.S., *Prirodnoe i antropogennoe zasolenie pochv basseina Aral'skogo morya (geografiya, genezis, evolyutsiya)* (Natural and anthropogenic salinization of soils in the Aral Sea basin (geography, genesis, evolution)), Moscow: V.V. Dokuchaev Soil Science Institute, 1996, 187 p.
25. Pankova E.I., Golovina N.N. et al., Opyt otsenki zasoleniya pochv oroshaemykh territorii Srednei Azii po materialam kosmicheskoi s'emki (Experience in assessing soil salinity in irrigated areas of Central Asia based on satellite imagery), *Pochvovedenie*, 1986, No. 3, pp. 138–146.

26. Pankova E.I., Mazikov V.M., Metodicheskie voprosy ispol'zovaniya aerofotosnimkov dlya kharakteristiki zasoleniya pochv (Methodological issues of using aerial photographs to characterize soil salinity), In: *Pochvenno-meliorativnye protsessy v raionakh novogo orosheniya. Tr. Pochv. in-ta im. V.V. Dokuchaeva* (Soil-reclamation processes in areas of new irrigation. Selected works of V.V. Dokuchaev Soil Science Institute), 1975, pp. 97–111.
27. Pankova E.I., Mazikov V.M., Otsenka zasoleniya pochv odnorodnykh po fotoizobrazheniyu konturov (Estimation of salinity of soils of contours homogeneous according to the photographic image), *Dokuchaev Soil Bulletin*, 1975, Vol. 9, pp. 24–34.
28. Pankova E.I., Mazikov V.M., Otsenka zasoleniya oroshaemykh pochv khlopkovykh polei po aerofotosnimkam (na primere Golodnoi stepi) (Estimation of salinity of irrigated soils of cotton fields from aerial photographs (on the example of the Hungry Steppe)), *Pochvovedenie*, 1976, No. 5, pp. 55–65.
29. Pankova E.I., Mazikov V.M., Distsionnye metody issledovaniya pri sostavlenii kart zasoleniya oroshaemykh territorii (Remote Investigation Methods in Compiling Salinity Maps in Irrigated Territories), *Tezisy dokl. U delegatskogo s'ezda* (Abstracts of reports at the delegates' congress), 1977, Vol. 4, pp. 272–273.
30. Pankova E.I., Mazikov V.M., *Metodicheskie rekomendatsii po ispol'zovaniyu materialov aerofotos'emki dlya otsenki zasoleniya pochv i provedeniya solevykh s'emok oroshaemykh territorii khlopkoseyushchei zony v krupnykh i srednikh masshtabakh* (Guidelines for the use of aerial photography materials for assessing soil salinity and conducting salt surveys of irrigated areas of the cotton-growing zone on a large and medium scale), Moscow, 1985, 73 p.
31. Pankova E.I., Mazikov V.M., Isaev V.A., Yamnova I.A., Opyt ispol'zovaniya aerofotosnimkov dlya kharakteristiki zasoleniya pochv neoroshaemykh territorii serozemnoi zony (Experience in the use of aerial photographs to characterize the salinization of soils in non-irrigated territories of the serozem zone), *Pochvovedenie*, 1978, No. 3, pp. 82–85.
32. Pankova E.I., Molodtsov V.A., Rezul'taty proizvodstvennykh promyvok na zemlyakh novogo orosheniya Golodnoi stepi (Results of production leaching on lands of new irrigation of the Hungry Steppe), *Pochvovedenie*, 1970, No. 8, pp. 106–118.
33. Pankova E.I., Molodtsov V.A., Solonchaki sazovoi zony Golodnostepskoi podgornoj ravniny i ikh meliorativnye osobennosti (Solonchaks of the saz zone of the Hunger Steppe submountain plain and their ameliorative features), *Pochvovedenie*, 1979, No. 2, pp. 116–129.

34. Pankova E.I., Muradova Z.M., Pochvenno-litologo-geomorfologicheskoe raionirovanie Golodnostepskoi podgornoj ravniny (Soil-lithological-geomorphological zoning of the Hungry steppe piedmont plain), In: *Usloviya formirovaniya i svoystva trudnomelioriruemykh pochv Dzhizakskoi stepi* (Formation conditions and properties of hard-to-reclaim soils of the Jizzakh steppe), Moscow: V.V. Dokuchaev Soil Science Institute, 1990, pp. 4–12.
35. Pankova E.I., Rukhovich D.I., Distantсионnyi monitoring zasoleniya oroshaemykh pochv aridnykh territorii (Remote monitoring of salinization of irrigated soils in arid territories), *Pochvovedenie*, 1999, No. 2, pp. 253–263.
36. Pankova E.I., Rukhovich D.I., Opyt otsenki mnogoletnei dinamiki zasoleniya oroshaemykh pochv Golodnoi stepi po materialam distantсионного zondirovaniya (Experience in assessing the long-term dynamics of salinization of irrigated soils of the Hungry Steppe based on remote sensing data), In: *Maty IV s"ezda pochvovedov i agrokhimikov Uzbekistana. Dostizheniya pochvenno-agrokhimicheskoi nauki – proizvodstvu* (Proc. IV Congress of Soil Scientists and Agrochemists of Uzbekistan. Achievements of soil-agrochemical science – production), Tashkent, 2005, pp. 158–159.
37. Pankova E.I., Solov'ev D.A., *Distantсионnyi monitoring zasoleniya oroshaemykh pochv* (Remote monitoring of salinity of irrigated soils), Moscow: V.V. Dokuchaev Soil Science Institute, 1993, 187 p.
38. Pankova E.I., Solov'ev D.A., Distantсионnyi metod izucheniya dinamiki zasoleniya oroshaemykh pochv (Remote method for studying the dynamics of salinization of irrigated soils), *Problemy osvoeniya pustyn'*, 1995, No. 3, pp. 39–41.
39. Pankova E.I., Solov'ev D.A., Monitoring zasoleniya oroshaemykh pochv Golodnoi stepi po dannym distantсионного zondirovaniya (Monitoring of salinization of irrigated soils of the Hungry Steppe according to remote sensing data), In: *Sovremennye estestvennye i antropogennye protsessy v pochvakh i geosistemakh* (Modern natural and anthropogenic processes in soils and geosystems), Moscow: V.V. Dokuchaev Soil Science Institute, 2006, 369 p.
40. Pankova E.I., Solov'ev D.A., Rukhovich D.I., Savin I.Yu., Organizatsiya monitoringa zasoleniya pochv oroshaemykh territorii tsentral'noi Azii s ispol'zovaniem dannykh distantсионного zondirovaniya (Organization of monitoring of soil salinity in irrigated areas of Central Asia using remote sensing data), In: *Zemel'nye resursy i prodovol'stvennaya bezopasnost' Tsentral'noi Azii i Zakavkaz'ya* (Land resources and food security in Central Asia and Trans-Caucasus region), Rome: 2016, pp. 309–369.
41. Pankova E.I., Khitrov N.B., Istoriya ot dela genezisa i melioratsii zasolennykh pochv Pochvennogo instituta im. V.V. Dokuchaeva (History of

the department of genesis and melioration of saline soils of V.V. Dokuchaev Soil Science Institute), *Pochvovedenie*, 2004, No. 2, pp. 243–250.

42. Rozanov A.N., *Dinamika prostranstvennogo razvitiya vtorichnogo zasoleniya pochv v Golodnoi stepi* (Dynamics of spatial development of secondary salinization of soils in the Hungry Steppe), In: *Trudy Pochvennogo instituta, Pochvy Golodnoi stepi kak ob"ekt orosheniya* (Works of V.V. Dokuchaev Soil Science Institute, Soils of the Hungry steppe as an object of irrigation.), Moscow–Leningrad, 1948, Vol. 29, pp. 324–342.

43. Rozanov A.N., *Serozemy Srednei Azii* (Serozems of Central Asia), Moscow: izd-vo AN SSSR, 1951, 459 p.

44. Rukhovich D.I., *Mnogoletnyaya dinamika zasoleniya oroshaemykh pochv tsentral'noi chasti Golodnoi stepi i metody ee vyyavleniya: Avtoreferat dis. ... kand. biol. nauk* (Long-term dynamics of salinization of irrigated soils in the central part of the Hungry Steppe and methods for its detection, Extended abstract of cand. biol. sci. thesis), Moscow, 2009, 24 p.

45. Rukhovich D.I., Pankova E.I., Chernousenko G.I., Koroleva P.V., *Mnogoletnyaya dinamika zasoleniya oroshaemykh pochv Golodnostepskogo plato i metody ee vyyavleniya po materialam distantsionnogo zondirovaniya* (Long-term dynamics of salinization of irrigated soils of the Golodno-steppe plateau and methods for its detection based on remote sensing data), *Pochvovedenie*, 2010, No. 6, pp. 728–739.

46. Rukhovich D.I., Simakova M.S., Kulyanitsa A.L., Bryzzhev A.V., Koroleva P.V., Kalinina N.V., Chernousenko G.I., Vil'chevskaya E.V., Dolinina E.A., Rukhovich S.V., *Metodologiya sravneniya raznovremennykh pochvennykh kart v tselyakh vyyavleniya i opisaniya dinamiki pochvennogo pokrova na primere monitoringa zasoleniya pochv* (Methodology for comparing multitemporal soil maps in order to identify and describe the dynamics of soil cover on the example of soil salinity monitoring), *Pochvovedenie*, 2016, No. 2, pp. 164–181.

47. Solov'ev D.A., *Distantsionnyi monitoring zasoleniya oroshaemykh pochv Golodnostepskoi podgornoj ravniny: Dis. ... kand. s.-kh. nauk* (Remote monitoring of salinization of irrigated soils of the Golodno-steppe piedmont plain, Cand. agric. sci. thesis), Moscow, 1989, 237 p.

48. Shishov L.L., Zimovets B.A. (Eds), *Usloviya formirovaniya i svoistva trudnomelioriruemykh pochv Dzhizakskoi stepi* (Formation conditions and properties of hard-to-reclaim soils of the Jizzakh steppe), Moscow: VASKhNIL, V.V. Dokuchaev Soil Science Institute, 1990, 98 p.

49. Yamnova I.A., *Mikromorfologicheskaya i mineralogicheskaya diagnostika zasoleniya pochv: Avtoref. dis. ... kand. biol. nauk* (Micromorphological and mineralogical diagnostics of soil salinity, Extended abstract of cand. biol. sci. thesis), Moscow, 1989, 26 p.

50. Yamnova I.A., Gipsonosnye pochvy Dzhizakskoi stepi (Gypsum-bearing soils of the Jizzakh steppe), In: *Usloviya formirovaniya i svoistva trudnomelioriruemykh pochv Dzhizakskoi stepi* (Formation conditions and properties of hard-to-reclaim soils of the Jizzakh steppe), Moscow: V.V. Dokuchaev Soil Science Institute, 1990, pp. 37–39.
51. Yamnova I.A., Golovanov D.L., Formy i genezis gipsovykh novoobrazovaniy i ikh otrazhenie na detal'nykh pochvennykh kartakh aridnykh territorii (Forms and genesis of gypsum neoformations and their reflection on detailed soil maps of arid territories), *Pochvovedenie*, 2010, No. 8, pp. 909–919.
52. Yamnova I.A., Pankova E.I., Gipsovye novoobrazovaniya i formiruyushchie ikh elementarnye pochvoobrazovatel'nye protsessy (Gypsum neoformations and elementary soil-forming processes that form them), *Pochvovedenie*, 2013, Np. 12, pp. 1423–1436.

Научное издание

Бюллетень Почвенного института  
имени В.В. Докучаева

Выпуск 110

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](mailto:bulletin@esoil.ru)

Сдано в набор 25.06.2022 г.  
Подписано в печать 25.06.2022 г.  
Формат 60×84/16. Бумага офсетная.  
Усл. печ. л. 11,3 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](mailto:apr-rpa@list.ru)