

ПОЧВЫ И ОКРУЖАЮЩАЯ СРЕДА

Научный журнал

2022

Том 5. Выпуск 4

ISSN 2618-6802 (online)

Зарегистрирован в Роскомнадзоре: ЭЛ № ФС 77 – 72325 – сетевое издание от 14.02.2018 г.

Учредитель: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт почвоведения и агрохимии Сибирского отделения Российской академии наук

Адрес издателя и редакции: 630090, Россия, Новосибирская область, г. Новосибирск, проспект Академика Лаврентьева 8/2, тел.: +7(383) 363-90-35, ИПА СО РАН, e-mail: redactor@soils-journal.ru, сайт: <https://www.soils-journal.ru>

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Главный редактор

Якименко Владимир Николаевич – доктор биологических наук, зав. лабораторией агрохимии, ФГБУН Институт почвоведения и агрохимии СО РАН

Заместители главного редактора

Дергачева Мария Ивановна – доктор биологических наук, главный научный сотрудник лаборатории биогеоценологии, ФГБУН Институт почвоведения и агрохимии СО РАН (Новосибирск, Россия)

Соколов Денис Александрович – доктор биологических наук, зав. лабораторией рекультивации почв, ФГБУН Институт почвоведения и агрохимии СО РАН (Новосибирск, Россия)

Члены редколлегии

Андроханов Владимир Алексеевич – доктор биологических наук, директор, ФГБУН Институт почвоведения и агрохимии СО РАН (Новосибирск, Россия)

Абакумов Евгений Васильевич – профессор РАН, доктор биологических наук, профессор, заведующий кафедрой прикладной экологии, ФГБОУ ВО Санкт-Петербургский государственный университет

Бойко Василий Сергеевич – доктор сельскохозяйственных наук, доцент, заместитель директора по научной работе, ФГБНУ Омский аграрный научный центр (Омск, Россия)

Будажанов Лубсан-Зонды Владимирович – член-корреспондент РАН, доктор биологических наук, профессор, директор, ФГБНУ Бурятский НИИ сельского хозяйства (Улан-Удэ, Россия)

Гамзиков Геннадий Павлович – академик РАН, доктор биологических наук, профессор, ФГБОУ ВО Новосибирский государственный аграрный университет (Новосибирск, Россия)

Гольева Александра Амуриевна – доктор географических наук, ведущий научный сотрудник, ФГБУН Институт географии РАН (Москва, Россия)

Кулижский Сергей Павлович – доктор биологических наук, профессор, проректор по социальным вопросам, ФГБОУ ВО Национальный Исследовательский Томский государственный университет (Томск, Россия)

Колесников Сергей Ильич – доктор сельскохозяйственных наук, профессор, заведующий кафедрой экологии и природопользования, ФГБОУ ВО Южный федеральный университет (Ростов-на-Дону, Россия)

Пузанов Александр Васильевич – доктор биологических наук, профессор, директор, ФГБУН Институт водных и экологических проблем СО РАН (Барнаул, Россия)

Рожков Вячеслав Александрович – член-корреспондент РАН, доктор сельскохозяйственных наук, профессор, главный научный сотрудник, ФГБУН Почвенный институт им.В.В. Докучаева (Москва, Россия)

Седов Сергей Николаевич – кандидат биологических наук, ведущий исследователь Института геологии Национального автономного университета Мексики (UNAM, Мехико, Мексика)

Сиромля Татьяна Ивановна – доктор биологических наук, старший научный сотрудник лаборатории биогеохимии почв, ФГБУН Институт почвоведения и агрохимии СО РАН (Новосибирск, Россия)

Сысо Александр Иванович – доктор биологических наук, заместитель директора по науке, ФГБУН Институт почвоведения и агрохимии СО РАН (Новосибирск, Россия)

Убугунов Леонид Лазаревич – доктор биологических наук, профессор, директор, ФГБУН Институт общей и экспериментальной биологии СО РАН (Улан-Удэ, Россия)

Чевычелов Александр Павлович – доктор биологических наук, заведующий лабораторией генезиса почв и радиоэкологии, ФГБУН Институт биологических проблем криолитозоны СО РАН (Якутск, Россия)

Танасиенко Анатолий Алексеевич – доктор биологических наук, доцент, ведущий научный сотрудник лаборатории почвенно-физических процессов, ФГБУН Институт почвоведения и агрохимии СО РАН (Новосибирск, Россия)

Шарков Иван Николаевич – доктор биологических наук, доцент, руководитель Сибирского НИИ земледелия и химизации СФНЦА РАН (Новосибирск, Россия)

Шпедт Александр Артурович – доктор сельскохозяйственных наук, доцент, директор, ФИЦ Красноярский научный центр СО РАН (Красноярск, Россия)

Якутин Михаил Владимирович – доктор биологических наук, доцент, ведущий научный сотрудник лаборатории биогеоценологии, ФГБУН Институт почвоведения и агрохимии СО РАН (Новосибирск, Россия)

Содержание

Якименко В.Н., Наумова Н.Б., Нечаева Т.В., Гопп Н.В.

От редакции

e196

Почвы и круговорот химических элементов

Головацкая Е.А., Дюкарев Е.А., Веретенникова Е.Э., Никонова Л.Г.,

Смирнов С.В. Оценка динамики баланса углерода в болотах южнотаежной подзоны Западной Сибири (Томская область)

e194

Физика и гидрология почв

Михеева И.В., Оплеухин А.А. Информационная оценка изменений содержания ила и физической глины в пахотных черноземах Прииртышской равнины

e186

Антропогенные, агрогенные и городские почвы

Баженов А.В., Игловский С.А., Яковлев Е.Ю. Техногенная радиоактивность почв в районе маяка «Моржовский» (остров Моржовец, Архангельская область)

e193

Деградация и рекультивация почв

Елизаров Н.В., Попов В.В. Влияние колебаний уровня грунтовых вод на мелиорированные солонцы северной лесостепи Барабинской низменности

e190

Методология почвенно-агрохимических исследований

Нечаева Т.В. Влияние калибровочных растворов на результаты определения содержания подвижного фосфора в почвах

e187

Обзоры и рецензии

Попов В.В. Обзор результатов исследований почвенных растворов солонцовых почв

e189



ОТ РЕДАКЦИИ

Уважаемые читатели! Рады представить вам очередной номер журнала «Почвы и окружающая среда».

В настоящее время мировая проблема изменения климата и природной среды остро стоит на повестке дня. Россия занимает особое место в глобальной климатической системе благодаря своим уникальным лесным и болотным экосистемам, занимающим обширные пространства. Торфообразование на болотах является бесспорным и весьма значительным стоком CO₂. Интересные результаты по данной теме представлены в работе Головацкой Е.А. с соавторами по изучению динамики баланса углерода в олиготрофных и эвтрофных естественных ненарушенных болотах южнотаежной подзоны Западной Сибири (Томская область). Авторы убедительно показали, что в настоящее время болотные экосистемы на территории исследования являются местом постоянного стока углерода и способствуют смягчению последствий изменения климата.

В статье Михеевой И.В. и Оплеухина А.А. дана информационная оценка изменений содержания ила и физической глины в пахотных черноземах Прииртышской равнины. Полученные авторами вероятностно-статистические распределения содержания ила и физической глины являются весьма информативными и могут служить в качестве эталонов для сравнения результатов мониторинговых исследований почв на изучаемой и прилегающих территориях.

Проводимые испытания ядерного оружия могут вызывать значительные экологически неблагоприятные изменения в окружающей среде, превращая громадные пространства в опасные районы. Работа Баженова А.В. с соавторами посвящена изучению техногенной радиоактивности почв в районе маяка «Моржовский» и его окрестностях (остров Моржовец, Архангельская область). Полученные авторами данные по распределению активности ¹³⁷Cs в почвах свидетельствуют об устойчивом закреплении элемента в верхней (0–5 см) органической части профиля, являющегося первичным биогеохимическим барьером. Растительность не накапливает ¹³⁷Cs. Установлено, что в районах Западного сектора Арктики активность ¹³⁷Cs закономерно снижается с востока на запад, по мере удаления от ядерного полигона на архипелаге Новая Земля.

Мониторинг состояния почвенно-грунтовых вод и подпитываемых ими почв северной лесостепи Барабинской низменности представлен в статье Елизарова Н.В. и Попова В.В. В условиях увеличения увлажнения территории авторы диагностировали развитие деградационных процессов, таких как вторичное засоление и осолонцевание почв. Химическая мелиорация не только улучшила свойства почвы, но и показала высокую устойчивость действия и последствий при вторичном засолении. Мелиорирование солонцов агробиологическим методом также способствовало улучшению качества почв и поддержанию их плодородия.

В работе Нечаевой Т.В. установлено, что способ подготовки калибровочных растворов для построения шкалы на фосфор отражается на результатах определения содержания подвижного фосфора в почвах. В статье обосновывается необходимость учета тонкостей проведения почвенно-агрохимических анализов и изучения свойств и режимов почв по единым методикам. Автор считает целесообразным обратить внимание на то, что все калибровочные растворы для шкалы должны быть как можно ближе по химическому составу к исследуемым вытяжкам, т.е. готовить их лучше всего на том же экстрагирующем растворе, что и почвенные вытяжки.

Обзор основных результатов исследований, посвященных изучению почвенных растворов солонцовых почв, приведен в статье Попова В.В. Анализ литературных данных показал, что ввиду методических и технических трудностей, связанных с извлечением раствора из плотных горизонтов солонцовых почв, опубликованные работы по этой проблематике немногочисленны и посвящены, главным образом, генетическим и галохимическим вопросам. Автор резюмирует, что многие вопросы генезиса и мелиорации солонцов все еще остаются открытыми, поэтому дальнейшее изучение почвенных растворов солонцовых почв является весьма актуальным.

Редакция журнала надеется, что представленные статьи будут интересны для специалистов в области почвоведения, агрохимии и экологии, а также для широкого круга читателей.

Редакция журнала

В.Н. Якименко, Н.Б. Наумова, Т.В. Нечаева, Н.В. Гопп



УДК 631.4

<https://doi.org/10.31251/pos.v5i4.194>

ОЦЕНКА ДИНАМИКИ БАЛАНСА УГЛЕРОДА В БОЛОТАХ ЮЖНОТАЕЖНОЙ ПОДЗОНЫ ЗАПАДНОЙ СИБИРИ (ТОМСКАЯ ОБЛАСТЬ)

© 2022 Е. А. Головацкая , Е. А. Дюкарев , Е. Э. Веретенникова , Л. Г. Никонова ,
С. В. Смирнов 

ФГБУН Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, Академический проспект 10/3, г. Томск, 634055, Россия. E-mail: golovatskayaea@gmail.com

Цель исследования: оценка запасов и баланса углерода в олиготрофных и эвтрофных болотах южнотаежной подзоны Западной Сибири.

Место и время проведения. Исследования проводили на научно-исследовательском стационаре «Васюганье» (56° 57' с.ш., 82° 30' в.д.) Института мониторинга климатических и экологических систем СО РАН на олиготрофных и эвтрофных естественных ненарушенных болотах. Экспедиционные работы проводили в течение вегетационного периода (май-сентябрь) с 1999 по 2012 гг.

Методология. Изучение биологической продуктивности (запасов фитомассы и чистой первичной продукции) проводили укосным методом, подземную продукцию определяли методом монолитов. Оценку скорости трансформации растительных остатков растений-торфообразователей проводили методом частично изолированных проб. Скорость разложения и потери углерода рассчитывали как процент от исходной массы и исходного содержания углерода. Измерение эмиссии CO₂ проводили камерным методом. Годовой поток CO₂ с поверхности торфяной залежи был смоделирован на основе данных, полученных в результате натурных измерений эмиссии CO₂ и выявленных зависимостей интенсивности потока от температуры воздуха. Дополнительные потери углерода, такие как эмиссия метана, зимние эмиссии CO₂ и метана, вынос углерода с болотными водами, были оценены на основе литературных данных. Годовой баланс углерода для исследуемых болотных экосистем был рассчитан как разница между эмиссией углерода и NPP болотных экосистем.

Основные результаты. Основные запасы углерода в болотных экосистемах сосредоточены в торфяных залежах. В среднем для исследуемой территории они составляют: на олиготрофном болоте 74 кг/м², эвтрофном – 161 кг/м². Запасы углерода в виде органического вещества растений значительно ниже (в среднем в 50 раз). В результате многолетних исследований выявлено, что при высокой межгодовой вариабельности баланса углерода в период с 1999 по 2012 гг., для исследуемых болотных экосистем отсутствуют значимые тенденции изменений во временном ходе углеродного баланса. Ежегодное поглощение углерода болотными экосистемами ключевого участка «Бакчарский» площадью 212 тыс. га составляет около 3 × 10⁵ т.

Заключение. Болотные экосистемы южнотаежной подзоны Западной Сибири в настоящее время являются местом постоянного стока углерода и, кроме того, являясь устойчивыми природными образованиями, способствуют смягчению последствий изменения климата.

Ключевые слова: болотные экосистемы; запасы углерода; эмиссия CO₂; баланс углерода

Цитирование: Головацкая Е.А., Дюкарев Е.А., Веретенникова Е.Э., Никонова Л.Г., Смирнов С.В. Оценка динамики баланса углерода в болотах южнотаежной подзоны Западной Сибири (Томская область) // Почвы и окружающая среда. 2022. Том 5. № 4. е194. DOI: [10.31251/pos.v5i4.194](https://doi.org/10.31251/pos.v5i4.194)

ВВЕДЕНИЕ

Биогеохимический цикл углерода является одним из важнейших процессов, протекающих в биосфере. Динамика содержания CO₂ в атмосфере привлекает внимание различных специалистов, поскольку наблюдается постоянное увеличение концентрации CO₂, которое в основном связывают с антропогенной деятельностью (IPCC, 2021; Кобак, 1977; Noughton et al., 1983). При этом из общего потока CO₂ в атмосферу из разных источников, лишь около половины остается в атмосфере, а остальное представляет «неизвестный сток», которым может быть либо океан, либо наземные экосистемы. В результате обмена между атмосферой, растительностью, почвами и океанами, рост концентрации в атмосфере составляет меньше половины его поступления. Россия занимает особое место в глобальной климатической системе благодаря своим уникальным поглотителям и накопителям парниковых газов, лесным и болотным экосистемам, занимающим обширные

пространства. Бесспорным стоком CO₂ для России служит торфообразование на болотах (Заварзин, 1994). На долю торфяных болот приходится около 3,5% поверхности земли, что составляет 5×10^6 км², а мировые запасы торфа в углеродном эквиваленте составляют 120–455 млрд. т углерода, из которых не менее 1/3 углеродного пула болот мира приходится на Россию (Вомперский, 1994). Согласно оценкам С.Э. Вомперского с соавторами (1999) общая площадь оторфованных почв в России составляет 369 млн га (21,6% территории страны). На территории Западной Сибири болотные экосистемы занимают почти 50% площади; в них содержится около 36% общего пула почвенного углерода России (Вомперский, 1994; Бирюкова, Орлов, 1995; Ефремов и др., 1994; Титлянова и др., 1998). Баланс углерода природных экосистем, в том числе и болотных, определяется по соотношению процессов поглощения углерода растениями (чистая первичная продукция) и выделения (эмиссия CO₂ и метана почвами). Наиболее детально изучены болотные экосистемы США, Канады, Финляндии и др. стран (Backeus, 1990; Bartsch, 1985; Dyck, Shay, 1999; Grigal et al., 1985; Vasander, 1982; Moore et al., 2002). На территории бывшего СССР проводились исследования в Белоруссии, Карелии, Западной Сибири, Дальнем Востоке (Валуцкий, Храмов, 1976; Ефремова и др., 1994; Косых и др., 2003; Миронычева-Токарева, 2001; Титлянова, 2001; Титлянова, 2007; Козловская и др., 1978; Елина и др., 1984; Копотева, 1986). В результате накоплен большой фактический материал; проводятся исследования особенностей биологического круговорота углерода на региональном уровне, оцениваются балансовые характеристики углеродного цикла, изучаются механизмы функционирования болотных экосистем (Ефремова и др., 1994; Косых и др., 2003; Миронычева-Токарева, 2001; Титлянова, 2001; Паников и др., 1993; Косых, 2001; Пьявченко, 1985; Храмов, Валуцкий, 1977; Титлянова и др., 1996, 2000).

Основной поток CO₂, идущий с поверхности болотных экосистем, формируется за счет высвобождения углерода, связанного в органическом веществе растений гетеротрофными организмами. При этом минерализация опада на болотах составляет от 25 до 60% в зависимости от типа болотных экосистем. Кроме того, болота считаются одним из основных поставщиков метана в атмосферу, хотя в результате деятельности микроорганизмов всего лишь 0,5–7% ежегодной первичной нетто-продукции болотного фитоценоза превращается в CH₄ (Вомперский, 1994; Brown et al., 1989; Aselmann, Crutzen, 1989).

Цель работы заключалась в оценке запасов углерода, а также баланса углерода в олиготрофных и эвтрофных болотах южнотаежной подзоны Западной Сибири.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследования проводили на территории восточной части Обь-Иртышского междуречья в пределах восточной окраины Васюганского плато – ключевой участок (КУ) «Бакчарский» (Бакчарский район, Томская область). Характерными особенностями климата для исследуемой территории является: продолжительная и суровая зима, значительный снежный покров, высокая относительная влажность воздуха, значительное количество осадков, превышающее испарение, короткое и теплое лето.

Исследования проводили на научно-исследовательском стационаре «Васюганье» (56° 57' с.ш., 82° 30' в.д.) Института мониторинга климатических и экологических систем СО РАН на олиготрофных и эвтрофных естественных ненарушенных болотах (рис. 1). В качестве модельного объекта наблюдения на олиготрофном болоте «Бакчарское» принята территория малого заболоченного водосбора р. Ключ (водосборная площадь 58 км²), в пределах которой был заложен ландшафтный профиль, пересекающий основные виды болотных фитоценозов: сосново-кустарничково-сфагновые фитоценозы (высокий рям, ВР, и низкий рям, НР), грядово-мочажинный комплекс (гряда, ГМКГ, и мочажина, ГМКМ) и осоково-сфагновую топь (ОТ). Мощность торфяной залежи на ландшафтном профиле изменяется от 100 до 350 см (Головацкая, 2009). Для сравнения режимов верховых и низинных болотных экосистем проводили исследования на эвтрофном болоте «Самара». Исследование проводили в центральной части эвтрофного болота – ерничково-осоковом фитоценозе (СЕ), на окраине – осоково-ерничково-гипновом фитоценозе (СО) и в сосново-елово-кедрово-березовой согре (СС). Мощность торфяной залежи эвтрофного болота – 375–430 м. Подробное описание растительного покрова исследуемых болотных экосистем приведено ранее (Головацкая, 2009).

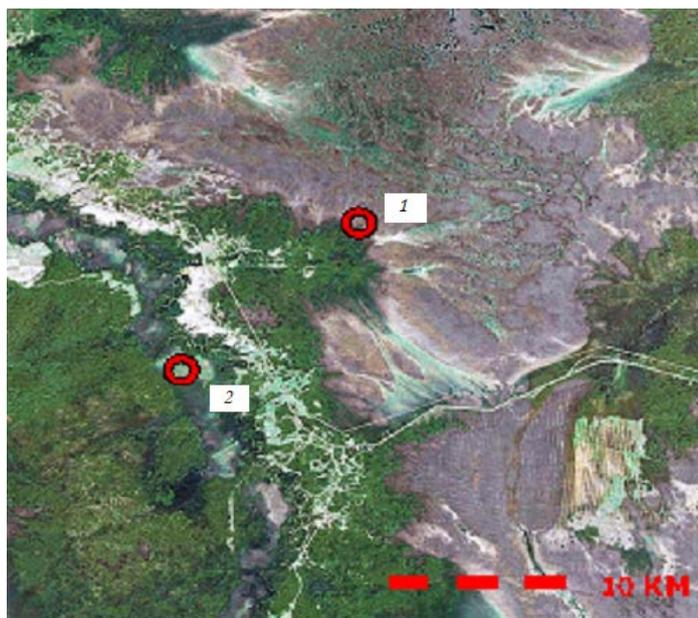


Рисунок 1. Объекты исследования на территории КУ «Бакчарский»: 1 – Ландшафтный профиль олиготрофного болота «Бакчарское»; 2 – эвтрофного болота «Самара». Космический снимок Landsat 7, сенсор ETM+, дата съемки 7 июля 1999 г.

Изучение биологической продуктивности (запасов биомассы) проводилось в период максимального ее развития в конце июля - начале августа. Надземную продукцию определяли укосным методом (без учета древесного яруса), подземную - методом монолитов (Головацкая, 2009). Чистая первичная продукция фитоценоза (NPP) была рассчитана как сумма надземной и подземной продукции (Титлянова и др., 1988).

В 2008 году был заложен опыт по определению скорости разложения растений-торфообразователей методом закладки растительности в торф (Козловская и др., 1978). Для этого осенью 2008 г. на болоте были собраны растения, характерные для исследуемых болотных фитоценозов (*Sph. angustifolium*, *Sph. magellanicum*, *Sph. fuscum*, *Andromeda polifolia*, *Ledum palustre*, *Betula nana*, *Vaccinium vitis-idea*, *Chamaedaphne calyculata*, *Vaccinium oxycoccus*, *Pinus sylvestris*, *Menyanthes trifoliata*, *Rubus chamaemorus*, *Carex rostrata*, *Eriophorum vaginatum*, *Comarum palustre*, *Scheuchzeria palustris*). Высушенные образцы в нейлоновых мешочках (масса навески 3-6 г) закладывали в торфяную залежь на глубину 10 см от поверхности в сентябре 2008 г. Через 12 месяцев в образцах определяли убыль массы растительного вещества весовым методом, а также изменение содержания углерода по общепринятым методикам (Агрохимические методы..., 1975; Пономарева, Плотникова, 1975). Скорость разложения и потери углерода рассчитывали как процент от исходной массы и исходного содержания углерода.

С 1999 по 2002 гг. измерения эмиссии CO₂ проводили два раза в месяц абсорбционным методом в трехкратной повторности (Головацкая, 2002). С 2004 года измерение эмиссии CO₂ проводилось с использованием инфракрасного газоанализатора ОПТОГАЗ 500.4 (ЗАО «ОПТЭК», Санкт-Петербург, Россия). Измерение эмиссии CO₂ проводилось камерным методом (объем камеры 16,6 л, площадь основания 590 см²) (Головацкая, Дюкарев, 2011). Скорость эмиссии CO₂ с поверхности торфяной залежи рассчитывали по формуле:

$$F = dc \times V/S \quad (1)$$

где F – скорость эмиссии CO₂, мг CO₂/м²/час; dc – изменение концентрации CO₂ в камере, мг/м³ ч; V – объем камеры, м³; S – площадь основания камеры, м².

Сравнительные измерения эмиссии CO₂ абсорбционным методом и с помощью газоанализатора показали, что абсорбционный метод дает заниженные (в 2,5-2,7 раз) оценки интенсивности потока CO₂. В соответствии с этими данными для потоков, измеренных в течение 1999-2003 гг., была проведена дополнительная коррекция.

Годовой поток CO₂ с поверхности торфяной залежи был смоделирован на основе данных, полученных в результате натуральных измерений эмиссии CO₂ и выявленных зависимостей интенсивности потока от температуры воздуха:

$$F = a \exp (b T), \quad (2)$$

где F – поток CO_2 , T – температура воздуха, b – коэффициент чувствительности эмиссии к температуре, a – коэффициент, соответствующий эмиссии CO_2 при $T=0$ °C.

Дополнительные потери углерода, такие как эмиссия метана, зимние эмиссии CO_2 и метана, вынос углерода с болотными водами были оценены на основе литературных данных (Panikov, Dedysh, 2000; Nykanen et al., 2003; Heikkinen et al., 2002; Heikkinen et al., 2004; Вомперский, 1994; Прокушкин, Гуггенбергер, 2007; Veretennikova, Dyukarev, 2021). Годовой баланс углерода для исследуемых болотных экосистем был рассчитан как разница между потоками углерода (CO_2 - и CH_4 -эмиссия, вынос с болотными водами) и NPP болотных экосистем.

Погодные условия периода исследования (1999-2012 гг.) оценивались по данным метеостанции «Бакчар» (57°05' N, 81°55' E).

Плотность торфа, содержание углерода в торфе и растительных остатках определяли в Лаборатории мониторинга лесных экосистем ИМКЭС СО РАН по стандартным методикам.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Запасы углерода в болотных экосистемах

Основные запасы углерода болотных экосистем сосредоточены в биомассе растений и торфяных залежах. При этом время пребывания углерода в том или ином резервуаре различно. Для растительности оно зависит от продолжительности жизни растений, и, как правило, в болотных экосистемах составляет от 1-2 лет у травянистых растений, до нескольких десятков лет у древесных. В торфяной залежи углерод консервируется на несколько тысяч лет.

Запасы углерода в растительности. Запасы фитомассы определяются составом растительного покрова (Головацкая, 2009). Оценка запасов фитомассы показала, что среди исследуемых болотных фитоценозов максимальные запасы характерны для эвтрофного болота, а на олиготрофном болоте максимальными запасами фитомассы характеризуется высокий рям (табл. 1). Для всех фитоценозов максимальный вклад в запасы фотосинтезирующей фитомассы вносят зеленые части мхов (46-91%). Также достаточно велико содержание листьев кустарничков (21-28%), за исключением открытой топи, мочажины ГМК и согры эвтрофного болота, где кустарничковый ярус слабо выражен. На открытой топи и эвтрофном болоте увеличивается роль травянистых растений в запасе фотосинтезирующей фитомассы (от 17 на открытой топи до 76% в осоково-ерниковом фитоценозе) (табл. 1).

Таблица 1

Запасы растительного вещества (среднее за 1999-2012 гг.), г/м²

Фракции фитомассы		Фотосинтезирующая фитомасса	Нефотосинтезирующая фитомасса	Итого фитомасса
Олиготрофное болото «Бакчарское»	ВР	405 ± 63*	864 ± 327	1269 ± 390
	НР	456 ± 104	716 ± 311	1172 ± 415
	ОТ	433 ± 88	574 ± 147	980 ± 980
	ГМКГ	294 ± 23	584 ± 239	878 ± 170
	ГМКМ	302 ± 18	267 ± 58	569 ± 76
Эвтрофное болото «Самара»	СЕ	395 ± 79	1669 ± 497	2064 ± 576
	СО	189 ± 89	1546 ± 214	1735 ± 303
	СС	195 ± 10	1762 ± 791	1957 ± 801

Примечание.

* – представлены среднее значение ± стандартное отклонение.

ВР – высокий рям; НР – низкий рям; ОТ – осоково-сфагновая топь; ГМКГ – гряда грядово-мочажинного комплекса; ГМКМ – мочажина грядово-мочажинного комплекса; СЕ – ерниково-осоковый фитоценоз; СО – осоково-ерниково-гипновый фитоценоз; СС – сосново-елово-кедрово-березовый согра (здесь и далее в таблицах и на рисунках).

Полученные нами данные в целом соответствуют оценкам, полученным ранее для западносибирских болот (Титлянова и др., 1995; Косых, 2003; Валуцкий, Храмов, 1976).

Запасы фитомассы древесного яруса для болотных экосистем оцениваются крайне редко и, в основном, для оценки изменения растительного покрова при осушении болот в целях лесомелиорации (Елина, Кузнецов, 1977; Биогеоэкологическое..., 1982; Валетов, 1992, 1999; Грабовик, 2006, 2008; Кузнецов, Саковец, 2006). Наиболее изученными в этом плане являются болотные экосистемы европейской части России, территории Беларуси, Швеции, Финляндии,

Норвегии и др. стран (Медведева, 1978; Медведева, Егорова, 1977; Биогеоэкологическое ..., 1982; Валетов, 1992; Кузнецов, Саковец, 2006). На территории Западной Сибири подобные исследования также проводились (Храмов, Валуцкий, 1977; Ефремов и др., 2005; Углерод ..., 1994; Косых, Коронатова, 2010; Копотева, Косых, 2011; Головацкая, Никонова, 2017). На верховых болотах продукция древесного яруса не велика, а сами деревья не представляют ценности для хозяйственных нужд, что, видимо, и является основной причиной недостаточного внимания к древесному ярусу болот. Однако, с точки зрения оценки баланса углерода, в болотных экосистемах исследование продукции и запасов биомассы именно древесного яруса является актуальной задачей, что также обусловлено широким распространением сосново-кустарничково-сфагновых биоценозов на олиготрофных болотах (Вомперский и др., 2005, 2011). Для низкого рьяма Бакчарского болота была проведена оценка запасов древесного яруса. При пересчете деревьев на пробной площади к древостою относили деревья диаметром 2 см и больше. Формула древостоя 10СедК, средняя высота древесного яруса 1,4 м (максимальная 3,6 м), средний диаметр ствола 1,4 см (максимальный – 7 см). Количество деревьев на 1 га 12 560 шт., подрост сильно развит – 19 600 шт./га. Исследование запасов фитомассы древесного яруса рьяма Бакчарского болота показало, что в зависимости от размеров дерева запасы фитомассы изменяются от 0,3 до 4,0 кг, в среднем составляя 0,67 кг/м². Основная часть биомассы сосредоточена в стволах (в среднем 54%). На долю хвои в запасах биомассы приходится около 18%. Согласно литературным данным (Козловская и др., 1978), масса корней деревьев составляет 25% от веса их надземной части.

Согласно данным, полученным нами в результате анализа химического состава растений-торфообразователей, содержание углерода в растениях составляет в среднем 46%. Минимальное содержание углерода характерно для сфагновых мхов, максимальное – для кустарничков. Для оценки запаса углерода в болотной растительности использовали данные по среднему содержанию углерода в разных группах растений и запасам фитомассы каждой группы. С учетом древесного яруса запасы углерода в растительном покрове возрастают в 2-8 раз (табл. 2).

Таблица 2

Запасы углерода в исследуемых торфяных залежах и растительности олиготрофных и эвтрофных болот, кг/м²

Пул углерода	«Бакчарское»					«Самара»		
	ВР	НР	ОТ	ГМКГ	ГМКМ	СЕ	СО	СС
Растительность*	1,3	1,2	1,0	0,9	0,6	2,1	1,7	2,0
Древесный ярус	2,7**	0,8	0	0,1	0	-	-	17
Торф	46	66	109	65	86	137	159	189

Примечание.

* – без учета древесного яруса; ** – по литературным данным (Храмов, Валуцкий, 1977); прочерк – нет данных.

Содержание углерода в торфе. Результаты исследования показали, что в исследуемых торфах олиготрофного болота «Бакчарское» содержание общего углерода ($C_{\text{общ}}$) изменяется от 39 до 53%, в среднем составляя 45%. Среднее содержание $C_{\text{общ}}$ в торфах эвтрофного болота составляет 33%, изменяясь в пределах от 12 до 50%.

На основании данных по содержанию углерода в торфе, плотности торфа и мощности исследуемых торфяных залежей был выполнен расчет содержания углерода во всей торфяной толще для всех исследуемых фитоценозов, а также в слое торфа 1 м (рис. 2). Общие запасы углерода в торфе в первую очередь определяются мощностью торфяной залежи. Однако следует учитывать, что существенную роль играет также плотность торфа, слагающего торфяную залежь, которая изменяется в широких пределах, как для олиготрофного (41-157 г/дм³), так и для эвтрофного (76-540 г/дм³) болот. Общие запасы углерода для всех исследуемых торфяных залежей приведены в таблице 2.

Как правило, оценки содержания углерода в почвенном покрове выполняются для верхнего метрового слоя. Согласно оценкам, полученным О.Н. Бирюковой и Д.С. Орловым (1995), запасы углерода в метровом слое почвы на территории России в среднем составляют 17 кг/м². Болотные экосистемы по занимаемой площади и запасам углерода являются одним из важнейших резервуаров углерода. По разным оценкам запасы углерода в метровом слое торфяной залежи изменяются от 36

до 81 кг/м² (Боч и др. 1994; Вомперский и др., 1994; Ефремов и др., 1994; Stolbovoi, 2002; Честных и др., 2004). Суммарные оценки запасов углерода в болотных экосистемах существенно различаются, что связано с недостаточно достоверными данными по площадям, занимаемым разными типами болот. С учетом того, что торфяная залежь не ограничивается 1-метровым слоем, а в среднем составляет, например, для Западной Сибири 2,7 м (Лисс и др., 2001), остается неучтенным значительное количество углерода, депонированного в торфяных залежах. Общие запасы углерода в исследуемых торфяных залежах составляют от 46 до 189 кг/м², в зависимости от мощности торфяных залежей (см. рис. 2).

Сопоставление данных по запасам углерода в торфе и растительности, показало, что углерод торфяной залежи (1 м) значительно превышает (в среднем в 14 раз) запасы углерода в биомассе растительности. Для почв и биомассы мира и России это соотношение составляет всего лишь 3 и 7,5 раз соответственно (Пулы и потоки..., 2007).

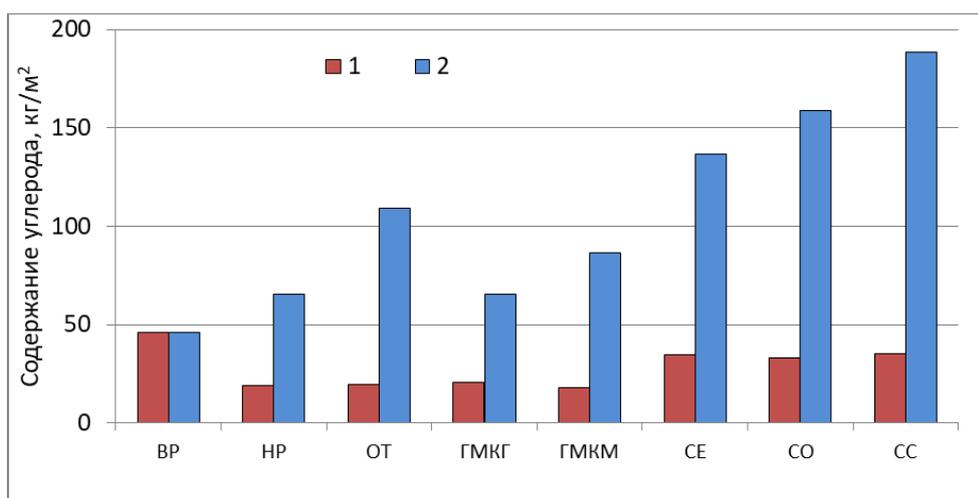


Рисунок 2. Запасы углерода в 1-метровом слое торфа (1) и в торфяной залежи (2).

Баланс углерода болотных экосистем

Чистая первичная продукция. Результаты исследования показали, что в среднем олиготрофные болотные экосистемы имеют близкие величины NPP травяно-кустарничково-мохового яруса на высоком и низком рьяе, открытой топи и ГМК, изменяясь от 542 г/м² на открытой топи до 659 на гряде ГМК. NPP на эвтрофном болоте в среднем незначительно отличается от продукции олиготрофного болота (рис. 3). Основной вклад в продукцию на исследуемых олиготрофных болотных фитоценозах вносят корни трав и кустарничков (44-60%). На эвтрофном болоте вклад подземной продукции составляет от 31 до 63% (см. рис. 3).

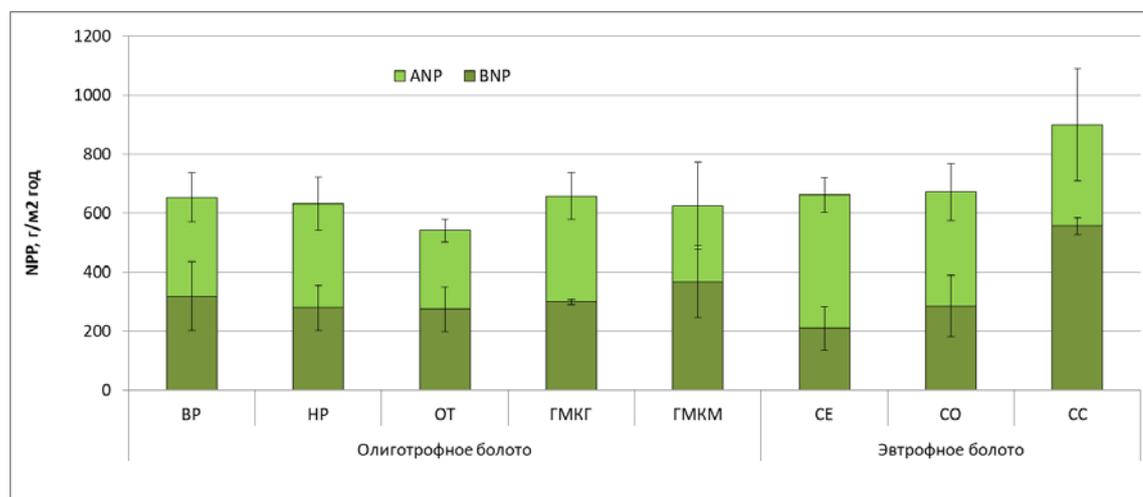


Рисунок 3. Чистая первичная продукция на исследуемых болотных фитоценозах, среднее за 1999-2012 гг.: ANP и BNP – надземная и подземная продукция.

Годичный прирост древесного яруса низкого ряма болота «Бакчарское» в среднем на единицу площади составляет 48 г/м². Основной вклад в продукцию древесного яруса дает хвоя последней генерации (48%). Таким образом, доля древесного яруса в продукции сосново-кустарничково-сфагновых фитоценозов на низком ряме Бакчарского болота составляет 18% (рис. 4).



Рисунок 4. Вклад древесного яруса в надземную продукцию сосново-кустарничково-сфагновых биоценозов: 1 – деревья, 2 – мхи, 3 – кустарнички, 4 – травы.

Сезонная динамика выделения CO₂ с поверхности олиготрофных и эвтрофных болот. Эмиссия CO₂ с поверхности олиготрофных фитоценозов на «Бакчарском» болоте имеет четко выраженный сезонный ход (рис. 5). Динамика эмиссии CO₂ определяется гидротермическими условиями вегетационного периода (Bubier et al., 2003; Aurela et al., 2001). Интенсивность эмиссии CO₂ изменяется от 20-60 мг CO₂/м² час весной (май) и осенью (сентябрь) до 400-600 мг CO₂/м² час в середине лета (июль) в зависимости от типа болотной экосистемы. В летний период (июль-август) значительно возрастает амплитуда суточных колебаний эмиссии CO₂ во всех исследуемых фитоценозах. Интенсивность выделения CO₂ на эвтрофном болоте в течение вегетационного периода в среднем не отличается от динамики на других болотных фитоценозах (см. рис. 5). Практически в течение всего времени наблюдения окраина болота характеризуется более низкой интенсивностью выделения CO₂; возможно, это связано с тем, что при высоких уровнях болотных вод на окраине болота наблюдается постоянный поверхностный сток воды, в результате которого, вероятно, и происходит вынос углерода с болотными водами.

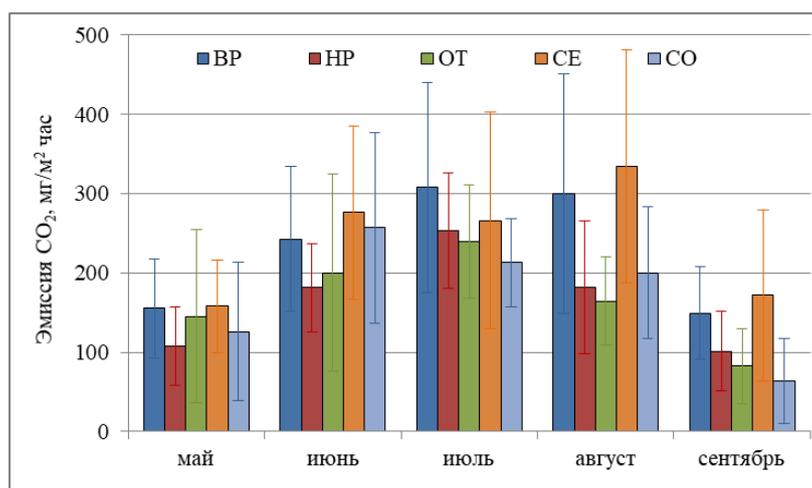


Рисунок 5. Среднемесячная эмиссия CO₂ с поверхности олиготрофных фитоценозов на болоте «Бакчарское» (за период 1999-2012 гг.).

Изменчивость потоков увеличивается во всех исследуемых экосистемах в сухие годы. Снижение потока CO₂ во влажные годы и увеличение дыхания в сухие годы, также установлено и другими авторами (Strack et al., 2006; Moore, Dalva, 1993; Bubier et al., 2003).

Эмиссия CO_2 с поверхности торфяных почв болотных экосистем имеет тесную связь с температурой воздуха и почвы (Wickland et al., 2001; Lafleur et al., 2005; Strack et al., 2006; и др.). Для оценки влияния температуры воздуха на изменения потока CO_2 был проведен корреляционный анализ и выявлена положительная зависимость между эмиссией CO_2 и температурой воздуха. Линейный коэффициент корреляции Пирсона (r) равен 0,63, что свидетельствует об интенсификации эмиссии CO_2 с увеличением температуры воздуха. Выявленные зависимости между температурой воздуха и потоком CO_2 использовались для оценки потоков на исследуемых болотах в течение вегетационных периодов 1999-2012 гг.

Баланс углерода. Углеродный баланс любой экосистемы характеризует чистый углеродный поток, представляющий собой сумму валовой первичной продукции и валового дыхания как разнонаправленных потоков. Особенность болот обуславливается незамкнутостью круговорота веществ, когда системы возвращают в биосферу меньше веществ, чем забирают из нее. Накопление торфа происходит за счет более медленного разложения растительных остатков. Современную скорость депонирования торфа и соответственно углерода, косвенно можно оценить, используя данные по NPP, отмиранию и скорости разложения растительных остатков.

Количественную оценку депонирования углерода получали путем вычитания потерь углерода при разложении растительных остатков из годового опада (табл. 3). Исходя из полученных данных, текущая скорость аккумуляции углерода в среднем для исследуемых фитоценозов составляет 147 г C/m^2 год, изменяясь от 122 г C/m^2 год на эвтрофном болоте, до 163 г C/m^2 год на высоком ряме Бакчарского болота. Приведенные в таблице 3 значения соответствуют накоплению углерода в результате разложения растительных остатков на поверхности (опада трав, кустарничков и мхов) и разложения опада корней в 20 сантиметровом слое торфа. Максимальный вклад в депонирование углерода оказывают корневые системы трав и кустарничков (46-73%), за счет медленной скорости деструкции. Значительную роль в накоплении углерода играют сфагновые мхи (во всех исследуемых фитоценозах) и кустарнички (на рямовых участках олиготрофных болот и на эвтрофном болоте).

Таблица 3

Депонирование углерода при разложении растительных остатков, г C/m^2 год

Болото, фитоценоз		NPP	Ежегодный опад	Потери С при разложении	Ежегодное депонирование С в слое 20 см
«Бакчарское»	ВР	294	212	49	163
	НР	284	191	36	155
	ОТ	243	189	41	148
«Самара»	СЕ	297	189	67	122

Одним из методов оценки текущего связывания углерода болотами является оценка по разнице между NPP и эмиссией CO_2 , так как накопление углерода происходит не только в виде торфа, но и в виде растительности. Наиболее часто при оценке депонирования углерода используют измеренные данные по NPP и эмиссии углекислого газа с поверхности почвы. Однако, на наш взгляд, такая оценка для болотных фитоценозов может быть существенно занижена, так как эмиссия CO_2 на болотных фитоценозах определяется с поверхности мохового покрова, то есть включает в себя не только эмиссию из торфяной залежи, но и в результате дыхания сфагновых мхов. Тогда как NPP это накопление углерода растениями в результате процесса фотосинтеза за вычетом дыхания растений. Следовательно, в данном случае мы дважды учитываем дыхание мхов. Согласно данным А.В. Наумова (2009) дыхание сфагновых мхов в зависимости от вида и местообитания составляет от 54 до 87 мг C/m^2 час. Полученные в результате значения скорости накопления углерода, оцененные балансовым методом (табл. 4), сопоставимы со скоростью накопления углерода в торфе при разложении растительных остатков (см. табл. 3). Современное накопление углерода составляет в среднем около 50% от NPP, изменяясь от 26 до 66% в зависимости от типа фитоценоза.

В результате преобладания процесса аккумуляции углерода (NPP) над его выделением (эмиссия CO_2 и CH_4 , вынос углерода с болотными водами), в болотах происходит накопление органической массы торфа. При близких значениях NPP, полученных для олиготрофных болотных фитоценозов КУ «Бакчарский», из-за различия в интенсивности потоков углекислого газа с поверхности торфяной залежи баланс углерода может отличаться в 1,5-2 раза в зависимости от типа фитоценоза (например, высокий и низкий рям). Эвтрофное болото является более продуктивным по

сравнению с олиготрофным, но за счет более богатых минеральных условий, процессы трансформации органического вещества протекают интенсивнее, потоки CO₂ выше по сравнению с олиготрофным болотом. В результате баланс углерода на эвтрофном болоте в среднем в 1,5 раза ниже, чем на олиготрофном.

Таблица 4

Депонирование углерода, рассчитанное балансовым методом
(депонирование = NPP – эмиссия CO₂), г C/м² год

Фитоценоз		NPP	Эмиссия CO ₂	Депонирование C	Дыхание мхов	Депонирование без учета дыхания мхов
«Бакчарское»	BP	293	232	61	74	135
	HP	284	183	101	87	188
	OT	243	164	79	54	133
	ГМКГ	296	206	90	87	177
	ГМКМ	281	218	63	54	117
«Самара»	CE	297	243	54	68	112
	CO	302	196	106	68	174
	CC	404	356	48	68	116

Многолетние наблюдения (1999-2012 гг.) за потоками углерода позволяют оценить изменения баланса углерода в зависимости от погодных условий (рис. 6).

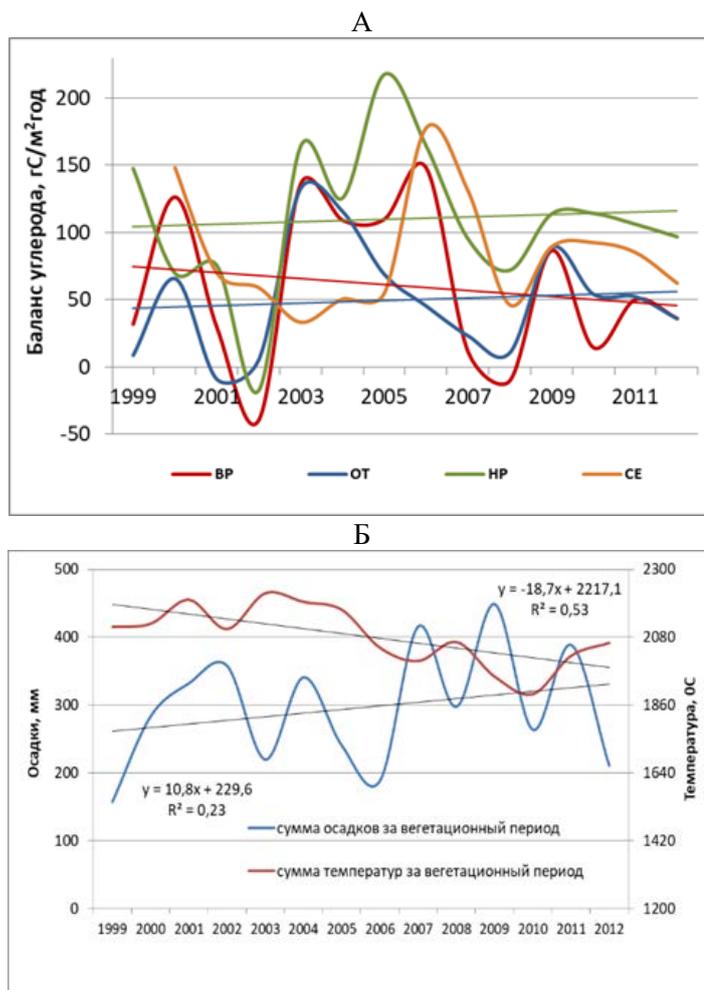


Рисунок 6. Динамика баланса углерода на примере олиготрофного и эвтрофного болот (А) и изменение погодных условий (Б) за период 1999-2012 гг.

Согласно полученным данным, в отдельные периоды болотные фитоценозы могут являться источником углекислого газа, однако в целом наблюдается тренд увеличения стока углерода в болотные фитоценозы. Притом, что за исследуемый период температура в течение вегетации снижается, а количество осадков, наоборот, увеличивается (см. рис. 6Б).

Высокая межгодовая вариабельность баланса углерода обусловлена межгодовой изменчивостью чистой первичной продукции. Стандартное отклонение эмиссии углерода в 8-15 раз ниже по сравнению со стандартным отклонением NPP. Такая изменчивость и приводит к получению отрицательного баланса углерода. Отрицательный годовой баланс углерода является частью нормальной климатической вариабельности.

Оценка составляющих углеродного баланса ключевого участка «Бакчарский» показала, что олиготрофные болотные экосистемы, занимающие площадь 166 тыс. га, в течение года накапливают 477 тыс. тонн углерода в год в виде первичной продукции растений, при этом из них выделяется около 203 тыс. тонн углерода. Эвтрофные болотные экосистемы (площадь 42,6 тыс. га) накапливают 158 тыс. тонн углерода в год, а выделяют 129 тыс. тонн. Углеродный баланс олиготрофных и эвтрофных экосистем положителен и составляет 274 и 29 тыс. тонн углерода в год, соответственно, при этом накопление углерода на единицу площади болот составляет 165 и 65 г С/м² в год для олиготрофных и эвтрофных болот. Установленная нами скорость аккумуляции углерода, оцененная балансовым методом, практически совпадает с оценкой скорости современного депонирования, полученной нами на основании данных по разложению растительных остатков.

Таким образом, исследуемые болотные экосистемы ключевого участка «Бакчарский» (площадь 212 тыс. га) ежегодно поглощают 3×10^5 т углерода из атмосферы (табл. 5). Площадь ключевого участка составляет 0,06% от площади болот мира, 0,15% от площади болот России и 0,26% от площади болот Западной Сибири. Следовательно, по нашим оценкам, поглощение углерода болотами ключевого участка составляет 0,32, 0,62 и 4% от поглощения болотами мира, России и Западной Сибири соответственно.

Таблица 5

Депонирование углерода болотными экосистемами

Болота	Площадь, км ²	Поглощение углерода, т С в год	Поглощение углерода, г С/м ² в год	Источник
КУ «Бакчарский»	2120	3×10^5	51	Головацкая, 2013
Южнотаежная подзона Западной Сибири	327000*	$9,2 \times 10^{6**}$	28	*Efremov, Efremova, 2001; ** Головацкая, 2013.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На территории южнотаежной подзоны Западной Сибири болотные экосистемы олиготрофного типа занимают площадь 121 тыс. км², эвтрофные и мезотрофные – 206 тыс. км² (Efremov, Efremova, 2001). Олиготрофные и эвтрофные болота на этой территории ежегодно депонируют 8,3 и 0,8 млн т С соответственно. Таким образом, болотные экосистемы южнотаежной подзоны Западной Сибири в настоящее время являются постоянным стоком углерода и, кроме того, являясь устойчивыми природными образованиями, способствуют смягчению последствий изменения климата.

ФИНАНСОВАЯ ПОДДЕРЖКА

Исследование выполнено в рамках государственного задания ИМКЭС СО РАН (регистрационный номер 122110100001-1) в соответствии с распоряжением Правительства Российской Федерации № 2515-р от 2 сентября 2022 г. в целях реализации важнейшего инновационного проекта государственного значения, направленного на создание единой национальной системы мониторинга климатически активных веществ.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Агробиохимические методы исследования почв* / Под ред. А.В. Соколова. М.: Наука, 1975. 656 с.
2. *Биогеоценологическое изучение болотных лесов в связи с опытной гидромелиорацией* / Под ред. А.А. Молчанова. М.: Наука, 1982. 207 с.

3. Бирюкова О.Н., Орлов Д.С. Запасы углерода органических соединений в почвах Российской Федерации // *Почвоведение*. 1995. № 1. С. 21–32.
4. Боч М.С., Кобак К.И., Кольчугина Т.П., Винсон Т. Содержание и скорость аккумуляции углерода в болотах бывшего СССР // *Бюллетень Московского общества испытателей природы. Отделение биологическое*. 1994. Т. 99. Вып. 4. С. 59–69.
5. Валетов В.В. *Влияние осушительной мелиорации на биопродуктивность сосновых олиготрофных болот севера Беларуси* // Болота и заболоченные леса в свете задач устойчивого природопользования. М.: Изд-во ГЕОС, 1999. С. 244–246.
6. Валетов В.В. *Фитомасса и первичная продукция безлесных и лесных болот (на примере севера Беларуси)*. Автореф. дисс. ... д.б.н. М.: Институт лесоведения РАН, 1992. 36 с.
7. Валущий В.И., Храмов А.А. *Структура и первичная продуктивность рямов юго-восточного Васюганья* // Теория и практика лесного болотоведения и гидролесомелиорации. Красноярск: ИЛИД СО АН СССР, 1976. С. 59–82.
8. Вомперский С.Э. *Роль болот в круговороте углерода* // Биогеоэкологические особенности болот и их рациональное использование. М.: Наука, 1994. С. 5–37.
9. Вомперский С.Э. Биосферное значение болот в углеродном цикле // *Природа*. 1994. № 7. С. 44–50.
10. Вомперский С.Э., Сиринов А.А., Цыганова О.П., Валяева Н.А., Майков Д.А. Болота и заболоченные земли России: попытка анализа пространственного распределения и разнообразия // *Известия Российской академии наук. Серия географическая*. 2005. № 5. С. 39–50.
11. Вомперский С.Э., Сиринов А.А., Сальников А.А., Цыганова О.П., Валяева Н.А. Оценка площади болотных и заболоченных лесов России // *Лесоведение*. 2011. № 5. С. 3–11.
12. Вомперский С.Э., Цыганова О.П., Ковалев А.Г., Глухова Т.В., Валяева Н.А. *Заболоченность территории России как фактор связывания атмосферного углерода* // Круговорот углерода на территории России. М.: Миннаука РФ, 1999. С. 124–145.
13. Головацкая Е.А. Биологическая продуктивность олиготрофных и эвтрофных болот южно-таежной подзоны Западной Сибири // *Журнал сибирского федерального университета. Сер. Биология*. 2009. Т. 2. № 1. С. 38–53.
14. Головацкая Е.А., Белова Е.В., Санникова Ю.В., Петкевич М.В. *Влияние лесомелиорации на биологическую продуктивность олиготрофного болота* // Контроль и реабилитация окружающей среды: сб. матер. Междунар. симп. (Томск, 6–12 июля 2002 г.). Томск: Копировальный центр «Южный», 2002. С. 96–97.
15. Головацкая Е.А., Дюкарев Е.А. Сезонная и суточная динамика эмиссии CO₂ с поверхности олиготрофной торфяной почвы // *Метеорология и гидрология*. 2011. № 6. С. 84–93.
16. Головацкая Е.А., Никонова Л.Г. Влияние уровня болотных вод на процессы трансформации сфагновых мхов в торфяной почве олиготрофных болот // *Почвоведение*. 2017. № 5. С. 606–613. DOI: 10.7868/80032180X17030030
17. Грабовик С.И. *Постмелиоративная динамика структуры и биологической продуктивности мезотрофных травяно-сфагновых болот южной Карелии* // Болотные экосистемы севера Европы: разнообразие, динамика, углеродный баланс, ресурсы и охрана: сб. матер. Междунар. симп. (Петрозаводск, 30 августа – 2 сентября 2005 г.). Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2006. С. 73–82.
18. Грабовик С.И., Ананьев В.А. Структура и формирование растительного покрова в ненарушенных ельниках и после сплошного ветровала // *Труды Карельского научного центра Российской академии наук*. 2008. № 12. С. 9–13.
19. Елина Г.А., Кузнецов О.Л. *Биологическая продуктивность болот Южной Карелии* // Стационарное изучение болот и заболоченных лесов в связи с лесомелиорацией. Петрозаводск: Карельский филиал АН СССР, 1977. С. 105–123.
20. Елина Г.А., Кузнецов О.П., Максимов А.И. *Структурно-функциональная организация и динамика болотных экосистем Карелии*. Л.: Наука, 1984. 128 с.
21. Ефремов С.П., Ефремова Т.Т., Блойтен Б. Биологическая продуктивность и углеродный пул фитомассы лесных болот Западной Сибири // *Сибирский экологический журнал*. 2005. № 1. С. 29–44.
22. Ефремова Т.Т., Ефремов С.П., Косых Н.П., Титлянова А.А. Биологическая продуктивность и почвы болот южного Васюганья // *Сибирский экологический журнал*. 1994. № 3. С. 253–267.
23. Ефремов С.П., Ефремова Т.Т., Мелентьева Н.В. *Запасы углерода в экосистемах болот* // Углерод в экосистемах лесов и болот России. Красноярск, 1994. С. 128–139.
24. Заварзин Г.А. Цикл углерода в природных экосистемах России // *Природа*. 1994. № 7. С. 15–18.
25. Кобак К.И. *Углекислота в биосфере*. Л.: ЛТА, 1977. 47 с.
26. Козловская Л.С., Медведева В.М., Пьявченко Н.И. *Динамика органического вещества в процессе торфообразования*. Л.: Наука ЛО, 1978. 172 с.
27. Копотева Т.А. Продукционно-деструкционные процессы в экосистемах травяных болот Приамурья // *Экология*. 1986. № 3. С. 35–41.
28. Копотева Т.А., Косых Н.П. Сравнительная оценка структуры фитомассы и продуктивности мезотрофных кустарничково-сфагновых болот зоны тайги // *Сибирский экологический журнал*. 2011. Т. 8. № 2. С. 301–307.

29. Косых Н.П. *Динамика запасов фитомассы и продукция болот северной тайги* // Торфяники Западной Сибири и цикл углерода: прошлое и настоящее: материалы международного полевого симпозиума (Ноябрьск, 18–22 августа 2001 г.) / Е.Д. Лапшина (отв. ред.). Новосибирск: ООО Агенство Сибпринт, 2001. С. 94–96.
30. Косых Н.П., Коронатова Н.Г. Запасы общей фитомассы и чистая первичная продукция болотных экосистем Сургутского Полесья // *Динамика окружающей среды и глобальные изменения климата. 2010. Т. 1. № 2. С. 77–84.*
31. Косых Н.П. Миронычева-Токарева Н.П., Блейтен В. Продуктивность болот южной тайги Западной Сибири / Н. П. Косых, // *Вестник Томского государственного университета. Прил. № 7. 2003. С. 142–152.*
32. Кузнецов О.Л., Саковец В.И. Результаты комплексных стационарных исследований экосистем болот и заболоченных лесов южной Карелии // *Труды Карельского научного центра Российской академии наук. 2006. № 9. С. 119–129.*
33. Лисс О. Л., Абрамова Л. И., Аветов Н.А., Березина Н.А., Инишева Л.И., Курнишкова Т.В., Слукa З.А., Толпышева Т.Ю., Шведчикова Н.К. *Болотные системы Западной Сибири и их природоохранное значение.* Тула: Гриф и К0, 2001. 584 с.
34. Медведева В.М. *Биологическая продуктивность заболоченных лесов и болот* // Динамика органического вещества в процессе торфообразования. Л.: Наука, 1978. С. 8–32.
35. Медведева В.М., Егорова Н.В. *Типы заболоченных и болотных сосняков Южной Карелии и их продуктивность* // Биологическая и хозяйственная продуктивность лесных фитоценозов Карелии. Петрозаводск: Карельский филиал АН СССР, 1977. С. 44–58.
36. Миронычева-Токарева Н.П. *Динамика запасов и первичная продуктивность болот южной тайги* // Торфяники Западной Сибири и цикл углерода: прошлое и настоящее: материалы международного полевого симпозиума (Ноябрьск, 18–22 августа 2001 г.) / Е.Д. Лапшина (отв. ред.). Новосибирск: ООО Агенство Сибпринт, 2001. С. 106–107.
37. Наумов А.В. *Дыхание почвы: составляющие, экологические функции, географические закономерности.* Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2009. 207 с.
38. Паников Н.С., Титлянова А.А., Палеева М.В., Семенов А.М., Миронычева-Токарева Н.П., Макаров В.П., Дубинин Е.В., Ефремов С.П. Эмиссия метана из болот юга Западной Сибири // *Доклады академии наук. 1993. Т. 330. № 3. С. 388–390.*
39. Пономарева В.В., Плотникова Т.А. *Методические указания по определению содержания состава гумуса в почвах (минеральных и торфяных).* Л.: Наука, 1975. 105 с.
40. Прокушкин А.С., Гуггенбергер Г. Роль климата в выносе растворенного органического вещества с водосборов криолитозоны Средней Сибири // *Метеорология и гидрология. 2007. № 6. С. 93–106.*
41. Пулы и потоки углерода в наземных экосистемах России / Под ред. Г.А. Заварзин. М.: Наука, 2007. 315 с.
42. Пьявченко Н.И. *Торфяные болота, их природное и хозяйственное значение.* М.: Наука, 1985. 152 с.
43. Титлянова А.А. Чистая первичная продукция травяных и болотных экосистем // *Сибирский экологический журнал. 2007. № 5. С. 763–770.*
44. Титлянова А.А. *Что мы знаем о продукции болот?* // Торфяники Западной Сибири и цикл углерода: прошлое и настоящее: материалы международного полевого симпозиума (Ноябрьск, 18–22 августа 2001 г.) / Е.Д. Лапшина (отв. ред.). Новосибирск: ООО Агенство Сибпринт, 2001. С. 136–139.
45. Титлянова А.А., Булавко Г.И., Кудряшова С.Я., Наумов А.В., Смирнов В.В., Танасиенко А.А. Запасы и потери органического углерода в почвах Сибири // *Почвоведение. 1998. № 1. С. 51–59.*
46. Титлянова А.А., Косых Н.П., Миронычева-Токарева Н.П. *Биологическая продуктивность болот Южного Васюганья* // Чтения памяти Ю.А. Львова: сб. матер. (Томск, 1–28 февраля 1995 г.) / Г.Ф. Плеханов (отв. ред.). Томск: Изд-во ТГУ, 1995. С. 59–63.
47. Титлянова А.А., Косых Н.П., Миронычева-Токарева Н.П. Прирост болотных растений // *Сибирский экологический журнал. 2000. № 5. С. 653–658.*
48. Титлянова А.А., Миронычева-Токарева Н.П., Наумова Н.Б. Круговорот углерода в травяных экосистемах при зарастании отвалов // *Почвоведение. 1988. № 7. С. 164–174.*
49. Титлянова А.А., Наумов А.В., Кудряшова С.Я. Булавко Г.И. *Запасы органического углерода в почвах Сибири, эмиссия парниковых газов и сток CO₂ в почвах Западной Сибири* // Тез. докл. II съезда Общества почвоведов. (27–30 июня 1996 г.). С.–П.: ВНИИЦлесресурс, 1996. Кн. 1. С. 221–222.
50. *Углерод в экосистемах лесов и болот России* / Под ред. В.А. Алексеева и Р.А. Бердси. Красноярск: Изд-во ВЦ СО РАН, 1994. 226 с.
51. Храмов А.А., Валуцкий В.И. *Лесные и болотные фитоценозы Восточного Васюганья.* Новосибирск: Наука СО, 1977. 219 с.
52. Честных О.В., Замолодчиков Д.Г., Уткин А.И. Общие запасы биологического углерода и азота в почвах лесного фонда России // *Лесоведение. 2004. № 4. С. 30–42.*
53. Aselmann I., Crutzen P.J. Global distribution of natural freshwater wetlands and rice paddies, their net primary productivity, seasonality and possible methane emissions // *Journal of Atmospheric chemistry. 1989. No. 8. P. 307–358.* <https://doi.org/10.1007/BF00052709>
54. Aurela M., Laurila T., Tuovinen J.P. Seasonal CO₂ balances of subarctic mire // *Journal Geophysical Research Atmospheres. 2001. Vol. 106 (D2). P. 1623–1637.* <https://doi.org/10.1029/2000JD900481>

55. Backeus I. Production and depth distribution of fine roots in a boreal open bog // *Annales Botanici Fennici*. 1990. Vol. 27. No. 3. P. 261–265.
56. Bartsch I., Moore T.R. A preliminary investigation of primary production and decomposition in subarctic peatlands // *Canadian Journal of Botany*. 1985. Vol. 63. P. 1241–1248. <https://doi.org/10.1139/b85-17>
57. Brown A., Mathur S.P., Kushner D.J. An ombrotrophic bog as a methane reservoir // *Global Biogeochemical Cycles*. 1989. Vol. 3. No. 3. P. 205–213. <https://doi.org/10.1029/GB003i003p00205>
58. Bubier J.L., Crill P.M., Mosedale A., Frohling S., Linder E. Peatland responses to varying interannual moisture conditions as measured by automatic CO₂ chambers // *Global Biogeochemical Cycles*. 2003. Vol. 17. No. 2. P. 1066. <https://doi.org/10.1029/2002GB001946>
59. Dyck B.S., Shay J.M. Biomass and carbon pools of two bogs in the Experimental Lakes Area, northwestern Ontario // *Canadian Journal of Botany*. 1999. Vol. 77. P. 291–304. <https://doi.org/10.1139/b98-215>
60. Efremov S.P., Efremova T.T. *Present stocks of peat and organic carbon in bog ecosystems of West Siberia* // Carbon Storage and Atmospheric Exchange by West Siberian Peatlands. Utrecht, Netherlands: Utrecht Univ., 2001. P. 73–78.
61. Grigal D.F., Buttlesman C.G., Kernick L.K. Biomass and productivity of the woody strata of forested bogs in northern Minnesota // *Canadian Journal of Botany*. 1985. Vol. 63. P. 2416–2424. <https://doi.org/10.1139/b85-345>
62. Heikkinen J.E.P., Elsakov V., Martikainen P.J. Carbon dioxide and methane dynamics and annual carbon balance in tundra wetland in NE Europe, Russia // *Global Biogeochemical Cycles*. 2002. Vol. 16. No. 4. P. 62-1-62-15. <https://doi.org/10.1029/2002GB001930>
63. Heikkinen J.E.P., Virtanen T., Huttunen J.T., Elsakov V., Martikainen P.J. Carbon balance in East European tundra // *Global Biogeochemical Cycles*. 2004. Vol. 18. P. GB1023. DOI: 10.1029/2003GB002054
64. Houghton R.G., Hobbie J.E., Melillo J.M., Moore B., Peterson B.J., Shaver G.R., Woodwell G.M. Changes in the carbon content of terrestrial biota and soils between 1860 and 1980: a net release of CO₂ to the atmosphere // *Ecological Monographs*. 1983. Vol. 53. No. 3. P. 235–262. <https://doi.org/10.2307/1942531>
65. IPCC, 2021: *Index*. In Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press. https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC_AR6_WGI_FrontMatter.pdf (дата обращения 03.12.2022)
66. Lafleur P.M., Moore T.R., Roulet N.T., Frohling S. Ecosystem respiration in a cool temperate bog depends on peat temperature but not water table // *Ecosystems*. 2005. Vol. 8. P. 619–629. <https://doi.org/10.1007/s10021-003-0131-2>
67. Moore T.R., Dalva M. The influence of temperature and water table position on carbon dioxide and methane emissions from laboratory columns of peatland soils // *European Journal of Soil Science*. 1993. Vol. 44. No. 4. P. 651–664. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.1993.tb02330.x>
68. Moore T.R., Bubier J.L., Frohling S.E., Lafleur P.M., Roulet N.T. Plant biomass and production and CO₂ exchange in an ombrotrophic bog // *Journal of Ecology*. 2002. Vol. 90. No. 1. P. 25–36. <https://doi.org/10.1046/j.0022-0477.2001.00633.x>
69. Nykanen H., Heikkinen J.E.P., Pirinen L., Tiilikainen K., Martikainen P.J. Annual CO₂ exchange and CH₄ fluxes on a subarctic palsamire during climatically different years // *Global Biogeochemical Cycles*. 2003. Vol. 17. No. 1. P. 1018. <https://doi.org/10.1029/2002GB001861>
70. Panikov N.S., Dedysh S.N. Cold season CH₄ and CO₂ emission on from Boreal peat bogs (West Siberia) Winter fluxes and thaw activation dynamics // *Global Biogeochemical Cycles*. 2000. Vol. 14. No. 4. P. 1071–1080. <https://doi.org/10.1029/1999GB900097>
71. Sheng Y., Smith L.C., MacDonald G.M., Kremenetski K.V., Frey K.E., Velichko A.A., Lee M., Beilman D.W., Dubinin P. A high-resolution GIS-based inventory of the west Siberian peat carbon pool // *Global Biogeochemical Cycles*. 2004. Vol. 18. No. 3. P. GB3004. <https://doi.org/10.1029/2003GB002190>
72. Stolbovoi V. Carbon in Russia soils // *Climatic change*. 2002. Vol. 55. No. 1–2. P. 131–156. <https://doi.org/10.1023/A:1020289403835>
73. Strack M., Waddington J.M., Rochefort L., Tuittila E.S. Response of vegetation and net ecosystem carbon dioxide exchange at different peatland microforms following water table drawdown // *Journal Geophysical Research. Biogeosciences*. 2006. Vol. 111. No. G2. <https://doi.org/10.1029/2005JG000145>
74. Vasander H. Plant biomass and production in virgin, drained and fertilized sites in a raised bog in southern Finland // *Annales Botanici Fennici*. 1982. Vol. 19. No. 2. P. 103–125.
75. Veretennikova E.E., Dyukarev E.A. Comparison of methane fluxes of open and forested bogs of the southern taiga zone of Western Siberia // *Boreal Environment Research*. 2021. Vol. 26. No. 1. P. 43–59.
76. Wickland K.P., Striegl R.G., Mast M.A., Clow D.W. Carbon gas exchange at a southern Rocky Mountain wetland, 1996–1998 // *Global Biogeochemical Cycles*. 2001. Vol. 15. No. 2. P. 321–335. <https://doi.org/10.1029/2000GB001325>

Поступила в редакцию 01.12.2022

Принята 05.12.2022

Опубликована 05.12.2022

Сведения об авторах:

Головацкая Евгения Александровна – доктор биологических наук, профессор РАН, директор, ФГБУН Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН (г. Томск, Россия); golovatskayaea@gmail.com

Дюкарев Егор Анатольевич – кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории физики климатических систем, ФГБУН Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН (г. Томск, Россия); egor@imces.ru

Веретенникова Елена Эдуардовна – кандидат биологических наук, старший научный сотрудник лаборатории физики климатических систем, ФГБУН Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН (г. Томск, Россия); lena2701@yandex.ru

Никонова Лилия Гарифулловна – кандидат биологических наук, младший научный сотрудник лаборатории физики климатических систем, ФГБУН Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН (г. Томск, Россия); lili112358@mail.ru

Смирнов Сергей Васильевич – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник лаборатории физики климатических систем, ФГБУН Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН (г. Томск, Россия); smirnov@imces.ru

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.



Статья доступна по лицензии [Creative Commons Attribution 4.0 License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

EVALUATION OF THE DYNAMICS OF THE CARBON BALANCE FOR PEATLANDS OF THE SOUTHERN-TAIGA SUBZONE OF WEST SIBERIA (TOMSK REGION)

© 2022 E. A. Golovatskaya , E. A. Dyukarev , E. E. Veretennikova , L. G. Nikonova ,
S. V. Smirnov 

Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Tomsk, Russia. E-mail: golovatskayaea@gmail.com

The aim of the study was to assess carbon reserves and balance in oligotrophic and eutrophic bogs of the southern-taiga subzone of West Siberia.

Location and time of the study. The study was carried out at the field station "Vasyuganye" (56° 57' N, 82° 30' E) of the Institute for Monitoring Climatic and Ecological Systems of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences in oligotrophic and eutrophic undisturbed native. Field work was carried out during the growing seasons (May-September) from 1999 to 2012.

Methods. The estimation of biological productivity (phytomass stocks and net primary production) was carried out by the cutting method, underground production was determined by the method of monoliths. The rate of transformation of plant residues of peat-forming plants was assessed using the method of partially isolated samples. The rate of decomposition and loss of carbon was calculated as a percentage of the original mass and the original carbon content. CO₂ emissions were measured by the chamber method. The annual CO₂ flux from the surface of the peat deposit was modeled on the basis of the data obtained as a result of field measurements of CO₂ emission. Additional carbon losses, such as methane emissions, winter emissions of CO₂ and methane, and carbon removal with bog waters, were estimated based on published data. The annual carbon balance for the studied mire ecosystems was calculated as the difference between the carbon fluxes and NPP of bog ecosystems.

Results. The main carbon pools in mire ecosystems are concentrated in peat deposits. On average, for the study area, they are 74 kg/m² for the oligotrophic bog, and 161 kg/m² for the eutrophic one. Carbon reserves in the form of plant organic matter are much lower (50 times on average). As a result of many years of research, it was revealed that with a high interannual variability of the carbon balance in the period from 1999 to 2012, there are no significant trends in temporal changes of the carbon balance for the studied ecosystems. The annual absorption of carbon by the peatland ecosystems of the key site "Bakcharsky" with an area of 212 thousand hectares is about 3 × 10⁵ tons.

Conclusion. Peatland ecosystems of the southern-taiga subzone of West Siberia are currently a constant sink of carbon and, as such, being sustainable natural formations, contribute to climate change mitigation.

Key words: peatland ecosystems; carbon stocks; CO₂ emissions; carbon balance

How to cite: Golovatskaya E.A., Dyukarev E.A., Veretennikova E.E., Nikonova L.G., Smirnov S.V. Evaluation of the dynamics of the carbon balance for peatlands of the southern-taiga subzone of West Siberia (Tomsk region) // *The Journal of Soils and Environment*. 2022. 5(4). e194. DOI: [10.31251/pos.v5i4.194](https://doi.org/10.31251/pos.v5i4.194) (in Russian with English abstract).

REFERENCES

1. *Agrochemical methods in soil research*. A.V. Sokolov (Ed.). Moscow: Nauka Publ., 1975, 656 p. (in Russian)
2. *Biogeocenological study of peatland forests in connection with experimental hydromelioration*. Molchanov A.A. (ed). Moscow: Nauka Publ., 1982, 207 p. (in Russian)
3. Biryukova O.N., Orlov D.S. Reserves of organic carbon in soils of the Russian Federation, *Pochvovedenie*, 1995, No. 1, p. 21–32. (in Russian)
4. Boch M.S., Kobak K.I., Kolchugina T.P., Vinson T. Content and rate of carbon accumulation in peatlands of the former USSR, *Bulletin of Moscow Society of Naturalists*, 1994, Vol. 99, No. 4, p. 59–69. (in Russian)
5. Valetov V.V. *Influence of drainage reclamation on the productivity of pine oligotrophic bogs in the north of Belarus*. In book: *Wetlands and wetland forests in the world are the objectives of sustainable nature management: Proc. of the Sci. Conf. (Moscow, 1 June, 1999)*. Vompersky S.E., Sirin A.A. (ed.). Moscow: GEOS Publ., 1999, p. 244–246. (in Russian)
6. Valetov V.V. *Phytomass and primary production of treeless and forest swamps (on the example of the north of Belarus)*. Abstract of Dissertation ... Doc. of Biol. Sci., Moscow, 1992. 36 p. (in Russian)
7. Valutsky V.I., Khramov A.A. *Structure and primary productivity of the ryams of the southeastern Vasyugan area*. In book: *Theory and practice of forest swamp science and hydroforest reclamation*. Krasnoyarsk: ILiD SB Publ., 1976, p. 59–82. (in Russian)
8. Vompersky S.E. *The role of mires in the carbon cycle*. In book: *Biogeocenotic Specificity of Mires and Their Rational Use*. Moscow: Nauka Publ., 1994, p. 5–37. (in Russian)
9. Vompersky S.E. Biospheric significance of the peatland in the carbon cycle, *Priroda*, 1994, No. 7. p. 44–50. (in Russian)
10. Vompersky S.E., Sirin A.A., Tsiganova O.P., Valyaeva N.A. Sal'nikov A. A., Maikov D.A. Peatlands and paludified lands of Russia: attempt of analyses of spatial distribution and diversity, *Regional Research of Russia*, 2005, No. 5, p. 39–50. (in Russian)
11. Vompersky S.E., Sirin A.A., Sal'nikov A.A., Tsiganova O.P., Valyaeva N.A. Estimation of the areas of peatland and paludified shallow – peat forest in Russia, *Lesovedenie*, 2011, No. 5, p. 3–11. (in Russian)
12. Vompersky S.E., Tsiganova O.P., Kovalev A.G., Glukhova T.V., Valyaeva N.A. *Carbon cycle in Russia*. In book: *Carbon Budget of Russia*. Moscow: Nauka Publ., 1999, p. 124–145. (in Russian)
13. Golovatskaya, E.A. Biological Productivity of Oligotrophic and Eutrophic Mires in the Southern Taiga of Western Siberia, *Journal of Siberian Federal University. Biology*, 2009, No. 2. p. 38–53. (in Russian)
14. Golovatskaya E.A., Belova E.V., Sannikova Yu.V., Petkevich M.V. *Influence of forest reclamation on the biological productivity of an oligotrophic bog*. In book: *Control and rehabilitation of the environment: Proc. of the International symp. (Tomsk, July 6-12, 2002)*. Tomsk: Yuzhny Publ., 2002, p. 96–97. (in Russian)
15. Golovatskaya E.A., Dyukarev E.A. Seasonal and diurnal dynamics of CO₂ emission from oligotrophic peat soil surface, *Meteorologiya i Gidrologiya (Russian Meteorology and Hydrology journal)*, 2011, No. 36, p. 413–419. (in Russian). DOI: [10.3103/S1068373911060094](https://doi.org/10.3103/S1068373911060094)
16. Golovatskaya E.A., Nikonova, L.G. The influence of the bog water level on the transformation of sphagnum mosses in peat soils of oligotrophic bogs, *Eurasian Soil Science*, 2017, No. 50, p. 580–588. DOI: [10.1134/S1064229317030036](https://doi.org/10.1134/S1064229317030036)
17. Grabovik S.I. *Post-reclamation dynamics of the structure and biological productivity of mesotrophic grass-sphagnum bogs in southern Karelia*. In book: *Mire Ecosystems in Northern Europe: Diversity, Dynamics, Carbon Balance, Resources and Conservation: Proc. of the International symp. (Petrozavodsk, 30 August – 2 September, 2005)*. Petrozavodsk: Karelian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences Publ., 2006, p. 73–82. (in Russian)
18. Grabovik S.I., Ananiev V.A. Structure and formation of vegetation cover in native spruce forests and after a continuous windfall, *Transactions of the Karelian Research Centre of the Russian Academy of Sciences*, 2008, No. 12, p. 9–13. (in Russian)
19. Elina G.A., Kuznetsov O.L. *Biological productivity of peatlands in South Karelia*. In book: *Stationary study of peatland and forests in connection with forest reclamation*. Petrozavodsk: Karelian branch of the Academy of Sciences of the USSR publ., 1977, p. 105–123. (in Russian)
20. Elina G.A., Kuznetsov O.L., Maksimov A.I. *Structural-functional organization and dynamics of mire ecosystems in Karelia*. Leningrad: Nauka Publ., 1984, 128 p. (in Russian)
21. Efremov S.P., Efremova T.T., Bloyten B. Biological Productivity and the Carbon Pool of Forest Swamps in West Siberia, *Sibirskij ekologicheskij zhurnal*, 2005, No. 1, p. 29–44. (in Russian)
22. Efremova T.T., Efremov S.P., Kosykh N.P., Titlyanova A.A. Biological Productivity and Bog Soils of Southern Vasyugan, *Sibirskij ekologicheskij zhurnal*, 1994, No 3, p. 253–267. (in Russian)

23. Efremov S.P., Efremova T.T., Melent'eva N.V. *Carbon Reserves in Bog Ecosystems*. In book: *Carbon in the Ecosystems of Russian Forests and Bogs*. Krasnoyarsk, 1994, p. 128–139. (in Russian)
24. Zavarzin G.A. Carbon Balance in Russia, *Priroda*, 1994, No. 7, p. 15–18. (in Russian)
25. Kobak K.I. *Carbon dioxide in the biosphere*. Leningrad: LTA Publ., 1977, 47 p. (in Russian)
26. Kozlovskaya L.S., Medvedeva V.M., P'yavchenko N.I., *Dynamics of Organic Matter in the Course of Peat Formation*. Leningrad: Nauka Publ., 1978, 172 p. (in Russian)
27. Kopoteva T.A. Production-destructive processes in the ecosystems of grassy swamps of the Amur Region, *Russian Journal of Ecology*, 1986, No. 3, p. 35–41. (in Russian)
28. Kopoteva T.A., Kosykh N.P. Comparative evaluation of the structure of phytomass and productivity of mesotrophic and dwarf shrub-sphagnum mires of the Taiga zone, *Sibirskij ekologicheskij zhurnal*, 2011, Vol. 8, No. 2, p. 301–307. (in Russian)
29. Kosykh N.P. *Dynamics of phytomass reserves and production of northern taiga bogs*. In book: *West Siberian peatlands and the carbon cycle: past and present: Proc. of the materials of the international field symp. (Noyabrsk, August 18–22, 2001)*. Lapshina E.D. (ed.). Novosibirsk: OOO Agency Sibprint Publ., 2001, p. 94–96. (in Russian)
30. Kosykh N.P., Koronatova N.G. Phytomass and primary production of mire ecosystems in Surgut polesie, *Environmental Dynamics and Global Climate Change*, 2010, Vol. 1, No. 2, p. 77–84. (in Russian)
31. Kosykh N.P., Mironycheva-Tokareva N.P., Blayten V. Productivity of peatland of the southern taiga of Western Siberia, *Tomsk State University Journal*, 2003, No. 7, p. 142–152. (in Russian)
32. Kuznetsov O.L., Sakovets V.I. Results of complex stationary studies of ecosystems of swamps and swampy forests of southern Karelia, *Transactions of the Karelian Research Centre of the Russian Academy of Sciences*, 2006, No. 9, p. 119–129. (in Russian)
33. Liss O.L., Abramova L.I., Avetov H.A., Berezina H.A., Inisheva L.I., Kurnishkova T.V., Sluka Z.A., Tolpysheva T.Y., Shvedchikova N.K. *Mire Systems of Western Siberia and Their Role in Nature Protection*. Tula: Grif Publ, 2001, 584 p. (in Russian)
34. Medvedeva V.M. *Biological productivity of paludified forests and bogs*. In book: *Organic matter dynamics during peat formation*. Leningrad: Nauka Publ., 1978, p. 8–32. (in Russian)
35. Medvedeva V.M., Egorova N.V. *Types of waterlogged and paludified pine forests of South Karelia and their productivity*. In book: *Biological and economic productivity of forest phytocenoses of Karelia*. Petrozavodsk: Karelian Branch of the Academy of Sciences of the USSR Publ., 1977, p. 44–58. (in Russian)
36. Mironycheva-Tokareva N.P. Dynamics of stocks and primary productivity of southern taiga bogs. In book: *West Siberian peatlands and the carbon cycle: past and present: Proc. of the materials of the international field symp. (Noyabrsk, August 18–22, 2001)*. Lapshina E.D. (ed.). Novosibirsk: OOO Agency Sibprint Publ., 2001, p. 106–107. (in Russian)
37. Naumov A.V. *Soil respiration: components, ecological functions, geographical patterns*. Novosibirsk: Publishing House of SB RAS, 2009, 207 p. (in Russian)
38. Panikov N.S., Titlyanova A.A., Paneeva M.V., et al. Methane Emission from Bogs in the Southern Part of Western Siberia, *Doklady Akademii Nauk*, 1993, Vol. 330, No. 3, p. 388–390. (in Russian)
39. Ponomareva V.V., Plotnikova T.A. *Methodological Recommendations for Determination of the Composition of Humus in Peat and Mineral Soils*. Leningrad: Nauka Publ, 1975, 105 p. (in Russian)
40. Prokushkin A.S., Guggenberger G. The role of climate in the removal of dissolved organic matter from the watersheds of the permafrost zone of Central Siberia, *Meteorologiya i Gidrologiya (Russian Meteorology and Hydrology journal)*, 2007, No. 6, p. 93–106. (in Russian)
41. *Carbon Pools and Fluxes in Terrestrial Ecosystems of Russia*. G. A. Zavarzin (Ed.). Moscow: Nauka Publ., 2007, 315 p. (in Russian)
42. Pyavchenko N.I. *Peatlands, their natural and economic significance*. Moscow: Nauka Publ., 1985, 152 p. (in Russian)
43. Titlyanova A.A. Net primary production of grass and bog ecosystems, *Sibirskij ekologicheskij zhurnal*. 2007, No. 5, p. 763–770. (in Russian)
44. Titlyanova A.A. *What do we know about productivity of bogs?* In book: *West Siberian peatlands and the carbon cycle: past and present: Proc. of the materials of the international field symp. (Noyabrsk, August 18–22, 2001)*. Lapshina E.D. (ed.). Novosibirsk: OOO Agency Sibprint Publ., 2001, p. 136–139. (in Russian)
45. Titlyanova A.A., Bulavko G.I., Kudryashova S.Y., Naumov A.V., Smirnov V.V., Tanasienko A.A. Storages and losses of organic carbon in Siberian soils, *Pochvovedenie*, No. 1, p. 51–59 (in Russian)
46. Titlyanova, A.A., Kosykh, N.P., Mironycheva-Tokareva, N.P. *Biological productivity of Bogs in Southern Vasyugan*. In book: *Yu.A. L'vov Memorial Lectures*. Tomsk: Tomsk St. Univ. Publ., 1995, p. 59–63. (in Russian)
47. Titlyanova A.A., Kosykh N.P., Mironycheva-Tokareva N.P. Growth of marsh plants, *Sibirskij ekologicheskij zhurnal*, 2000, No. 5, p. 653–658. (in Russian)
48. Titlyanova A.A., Mironcheva-Tokareva N.P., Naumova N.B. Carbon Cycle in the developing grass ecosystems of earth excavation, *Pochvovedenie*, 1988, No.7, p. 164–174. (in Russian)
49. Titlyanova A.A., Naumov A.V., Kudryashova S.Ya., Bulavko G.I., *Organic Carbon Storage in the Soils of Siberia, Emission of Greenhouse Gases, and CO₂ Sinking into the Soils of Western Siberia*. In book: *Abstr. 2nd Congress of the Russian Society of Soil Scientists*. St. Petersburg, 1996, Vol. 1, p. 221–222. (in Russian)

50. *Carbon in the Ecosystems of Forests and mires of Russia*. Alekseev V.A., R.A. Birdsey (Eds.). Krasnoyarsk: Publishing House of the Computing Center of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 1994, 226 p. (in Russian)
51. Khranov A.A., Valutskii V.I. *Forest and bog phytocenoses of East Vasuganiya*. Novosibirsk: Nauka SB Publ., 1977, 219 p. (in Russian)
52. Chestnykh O.V., Zamolodchikov D.G., Utkin A.I. Total reserves of biological carbon and nitrogen in the soils of the forest fund of Russia, *Lesovedenie*, 2004, No. 4, p. 30–42. (in Russian)
53. Aselmann I., Crutzen P.J. Global distribution of natural freshwater wetlands and rice paddies, their net primary productivity, seasonality and possible methane emissions, *Journal of Atmospheric chemistry*, 1989, No. 8, p. 307–358. <https://doi.org/10.1007/BF00052709>
54. Aurela M., Laurila T., Tuovinen J.P. Seasonal CO₂ balances of subarctic mire, *Journal Geophysical Research Atmospheres*, 2001, Vol. 106 (D2), p. 1623–1637. <https://doi.org/10.1029/2000JD900481>
55. Backeus I. Production and depth distribution of fine roots in a boreal open bog, *Annales Botanici Fennici*, 1990, Vol. 27, No. 3, p. 261–265.
56. Bartsch I., Moore T.R. A preliminary investigation of primary production and decomposition in subarctic peatlands, *Canadian Journal of Botany*, 1985, Vol. 63, p. 1241–1248. <https://doi.org/10.1139/b85-17>
57. Brown A., Mathur S.P., Kushner D.J. An ombrotrophic bog as a methane reservoir, *Global Biogeochemical Cycles*, 1989, Vol. 3, No. 3, p. 205–213. <https://doi.org/10.1029/GB003i003p00205>
58. Bubier J.L., Crill P.M., Mosedale A., Frohling S., Linder E. Peatland responses to varying interannual moisture conditions as measured by automatic CO₂ chambers, *Global Biogeochemical Cycles*, 2003, Vol. 17, No. 2, p. 1066. <https://doi.org/10.1029/2002GB001946>
59. Dyck B.S., Shay J.M. Biomass and carbon pools of two bogs in the Experimental Lakes Area, northwestern Ontario, *Canadian Journal of Botany*, 1999, Vol. 77, p. 291–304. <https://doi.org/10.1139/b98-215>
60. Efremov S.P., Efremova T.T. *Present stocks of peat and organic carbon in bog ecosystems of West Siberia*. In book: Carbon Storage and Atmospheric Exchange by West Siberian Peatlands. Utrecht, Netherlands: Utrecht Univ., 2001, p. 73–78.
61. Grigal D.F., Buttlerman C.G., Kernick L.K. Biomass and productivity of the woody strata of forested bogs in northern Minnesota, *Canadian Journal of Botany*, 1985, Vol. 63, P. 2416–2424. <https://doi.org/10.1139/b85-345>
62. Heikkinen J.E.P., Elsakov V., Martikainen P.J. Carbon dioxide and methane dynamics and annual carbon balance in tundra wetland in NE Europe, Russia, *Global Biogeochemical Cycles*, 2002, Vol. 16, No. 4, p. 62-1-62-15. <https://doi.org/10.1029/2002GB001930>
63. Heikkinen J.E.P., Virtanen T., Huttunen J.T., Elsakov V., Martikainen P.J. Carbon balance in East European tundra, *Global Biogeochemical Cycles*, 2004, Vol. 18, p. GB1023. DOI: 10.1029/2003GB002054
64. Houghton R.G., Hobbie J.E., Melillo J.M., Moore B., Peterson B.J., Shaver G.R., Woodwell G.M. Changes in the carbon content of terrestrial biota and soils between 1860 and 1980: a net release of CO₂ to the atmosphere, *Ecological Monographs*, 1983, Vol. 53, No. 3, p. 235–262. <https://doi.org/10.2307/1942531>
65. IPCC, 2021: *Index*. In Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press. https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC_AR6_WGI_FrontMatter.pdf (accessed on 03/12/2022)
66. Lafleur P.M., Moore T.R., Roulet N.T., Frohling S. Ecosystem respiration in a cool temperate bog depends on peat temperature but not water table, *Ecosystems*, 2005, Vol. 8, p. 619–629. <https://doi.org/10.1007/s10021-003-0131-2>
67. Moore T.R., Dalva M. The influence of temperature and water table position on carbon dioxide and methane emissions from laboratory columns of peatland soils, *European Journal of Soil Science*, 1993, Vol. 44, No. 4, p. 651–664. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.1993.tb02330.x>
68. Moore T.R., Bubier J.L., Frohling S.E., Lafleur P.M., Roulet N.T. Plant biomass and production and CO₂ exchange in an ombrotrophic bog, *Journal of Ecology*, 2002, Vol. 90, No. 1, p. 25–36. <https://doi.org/10.1046/j.0022-0477.2001.00633.x>
69. Nykanen H., Heikkinen J.E.P., Pirinen L., Tiilikainen K., Martikainen P.J. Annual CO₂ exchange and CH₄ fluxes on a subarctic peat mire during climatically different years, *Global Biogeochemical Cycles*, 2003, Vol. 17, No. 1, p. 1018. <https://doi.org/10.1029/2002GB001861>
70. Panikov N.S., Dedysh S.N. Cold season CH₄ and CO₂ emission from Boreal peat bogs (West Siberia) Winter fluxes and thaw activation dynamics, *Global Biogeochemical Cycles*, 2000, Vol. 14, No. 4, p. 1071–1080. <https://doi.org/10.1029/1999GB900097>
71. Sheng Y., Smith L.C., MacDonald G.M., Kremenetski K.V., Frey K.E., Velichko A.A., Lee M., Beilman D.W., Dubinin P. A high-resolution GIS-based inventory of the west Siberian peat carbon pool, *Global Biogeochemical Cycles*, 2004, Vol. 18, No. 3, p. GB3004. <https://doi.org/10.1029/2003GB002190>
72. Stolbovoi V. Carbon in Russia soils, *Climatic change*, 2002, Vol. 55, No. 1–2, p. 131–156. <https://doi.org/10.1023/A:1020289403835>

73. Strack M., Waddington J.M., Rochefort L., Tuittila E.S. Response of vegetation and net ecosystem carbon dioxide exchange at different peatland microforms following water table drawdown, *Journal Geophysical Research. Biogeosciences*, 2006. Vol. 111. No. G2. <https://doi.org/10.1029/2005JG000145>
74. Vasander H. Plant biomass and production in virgin, drained and fertilized sites in a raised bog in southern Finland, *Annales Botanici Fennici*, 1982, Vol. 19, No. 2, p. 103–125.
75. Veretennikova E.E., Dyukarev E.A. Comparison of methane fluxes of open and forested bogs of the southern taiga zone of Western Siberia, *Boreal Environment Research*, 2021, Vol. 26, No. 1, p. 43–59.
76. Wickland K.P., Striegl R.G., Mast M.A., Clow D.W. Carbon gas exchange at a southern Rocky Mountain wetland, 1996–1998, *Global Biogeochemical Cycles*, 2001, Vol. 15, No. 2, p. 321–335. <https://doi.org/10.1029/2000GB001325>

Received 01 December 2022

Accepted 05 December 2022

Published 05 December 2022

About the authors:

Golovatskaya Evgeniya Aleksandrovna – Doctor of Biological Sciences, Professor of the Russian Academy of Sciences, Director, Institute for Monitoring Climatic and Ecological Systems of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Tomsk, Russia); golovatskayaea@gmail.com

Dyukarev Egor Anatolyevich – Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Leading Researcher of the Laboratory of Physics of Climate Systems, Institute for Monitoring Climatic and Ecological Systems of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Tomsk, Russia); egor@imces.ru

Veretennikova Elena Eduardovna – Candidate of Biological Sciences, Senior Researcher, Laboratory of Physics of Climate Systems, Institute for Monitoring Climatic and Ecological Systems, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Tomsk, Russia); lena2701@yandex.ru

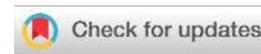
Nikonova Liliya Garifullovna – Candidate of Biological Sciences, Junior Researcher, Laboratory of Physics of Climate Systems, Institute for Monitoring Climatic and Ecological Systems, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Tomsk, Russia); lili112358@mail.ru

Smirnov Sergey Vasilyevich – Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Senior Researcher, Laboratory of Physics of Climate Systems, Institute for Monitoring Climatic and Ecological Systems, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Tomsk, Russia); smirnov@imces.ru

The authors read and approved the final manuscript



The article is available under [Creative Commons Attribution 4.0 License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)



ИНФОРМАЦИОННАЯ ОЦЕНКА ИЗМЕНЕНИЙ СОДЕРЖАНИЯ ИЛА И ФИЗИЧЕСКОЙ ГЛИНЫ В ПАХОТНЫХ ЧЕРНОЗЕМАХ ПРИИРТЫШСКОЙ РАВНИНЫ

© 2022 И. В. Михеева , А. А. Оплеухин 

ФГБУН Институт почвоведения и агрохимии СО РАН, проспект Академика Лаврентьева, 8/2, г. Новосибирск, 630090, Россия. E-mail: mikheeva@issa-siberia.ru

Цель исследования: количественно оценить изменения гранулометрического состава черноземов южных под влиянием длительного пахотного использования. Определить информационные эталоны содержания ила и физической глины в пахотных почвах в различные моменты времени.

Место и время проведения. Юг Западной Сибири, центральная часть Прииртышской равнины, период 60-90 годы 20-го столетия.

Методы. Используемая количественная модель состояния почвы представляет собой совокупность вероятностно-статистических распределений ее свойств в почвенных горизонтах. Произведены расчеты и графический анализ информационной энтропии и дивергенции почвенных свойств.

Основные результаты. За исследуемый период в черноземах южных на территории Прииртышской равнины в верхнем слое (0–20 см) произошло увеличение центральных значений и уменьшение вариабельности содержания ила и физической глины. Выявленные изменения произошли за счет модификации вероятностно-статистических распределений этих показателей, заключающейся в уменьшении вероятностей пониженных значений. Аналогичные тенденции выявлены также в слоях 20–30 и 30–50 см, но выражены они в меньшей степени, а глубже по профилю – минимальны. Эта перестройка вероятностно-статистических распределений содержания ила и физической глины осуществлялась в пределах интервалов варьирования, присущих изученным литологическим разновидностям.

Заключение. Для количественной оценки состояния и изменений почв в целом необходимо использовать информационные характеристики. Полученные вероятностно-статистические распределения содержания ила и физической глины являются информационными эталонами этих показателей на территории Прииртышской равнины. Они могут служить для сравнения с результатами прошедших, текущих и будущих мониторинговых исследований почв на изучаемой и соседних территориях. Величины информационной энтропии и дивергенции являются скалярными показателями для характеристики вариабельности и трансформаций вероятностно-статистических распределений свойств почв.

Ключевые слова: чернозем южный; гранулометрический состав; память почв; вероятностные распределения; информационная энтропия; дивергенция

Цитирование: Михеева И.В., Оплеухин А.А. Информационная оценка изменений содержания ила и физической глины в пахотных черноземах Прииртышской равнины // Почвы и окружающая среда. 2022. Том 5. № 4. с.186. DOI: [10.31251/pos.v5i4.186](https://doi.org/10.31251/pos.v5i4.186)

ВВЕДЕНИЕ

Гранулометрический состав считается одним из важнейших твердофазных свойств почвы, выступающих в качестве носителей почвенной (педо- и лито-) памяти, и может служить индикатором изменений среды (носителем памяти) геосистем (Память почв, 2008; Targulian, Bronnikova, 2019). Трансформации почв – процесс неизбежный вследствие глобальных и региональных природно-климатических изменений, а также антропогенного влияния. Антропогенные воздействия, включая пахотное использование почв, вызывают существенные изменения почвенного профиля, особенно его верхней части, при этом значительно изменяются характеристики почвы. Агрогенез весьма разнообразно влияет на различные почвообразовательные процессы, в том числе вызывает трансформацию глинистых минералов, при этом происходит разрушение и/или вынос смектитов из пахотной толщи, усиливается выветривание первичных слюд и хлоритов и другое. В почвенном профиле усиливается миграция твердого вещества, представляющая собой комплекс двух сложных взаимосвязанных процессов: элювиирования суспензий из верхних горизонтов и их иллювиирования в более глубокие слои почвы. Эти процессы происходят и в естественных почвах, но в пахотных они приобретают

ускоренный природно-агрогенный характер и приводят к необратимым результатам, которые можно рассматривать как память почв (Караева, 2008).

Некоторые авторы утверждают, что сельское хозяйство оказывает огромное влияние на деградацию почв (Lal, 2015), поэтому необходимо создание объединяющей теории почвообразования в рамках сельскохозяйственной практики, агропедогенеза (Kuzuakov, Zamanian, 2019). Для этого классическая концепция почвообразования должна быть расширена: факторы → процессы → свойства → функции, вместе с их обратными связями с процессами, при этом предлагается новая концепция аттракторов деградации почвы, для чего необходим выбор и анализ основных свойств почвы. Изменения свойств почв, в том числе гранулометрического состава, под влиянием длительного пахотного использования с применением удобрений, уже много лет являются предметом изучения в различных природно-климатических зонах и регионах. Результаты показывают, что в разных почвах степень их выраженности различна. В Европейской части России наиболее существенные изменения гранулометрического состава отмечены в дерново-подзолистых почвах, в пахотном слое которых содержание ила и физической глины убывает в процессе элювирования, а в черноземах выщелоченных обнаружены небольшие по величине изменения гранулометрического состава, имеющие характер тенденции (Байбеков, 2003). В Северном Зауралье в старопашотных черноземах выщелоченных проявляются процессы миграции фракций физической глины вглубь профиля, а перевод в залежное состояние не повлиял на восстановление антропогенных изменений гранулометрического состава (Еремин, 2012). В Западной Сибири наиболее выраженные изменения гранулометрического состава под влиянием длительного пахотного использования с применением удобрений отмечены также в дерново-подзолистых почвах, а черноземы и каштановые почвы представляют собой довольно устойчивую систему, по сравнению с дерново-подзолистыми (Кенжегулова, 2008). В Курганской области, при длительном использовании черноземов выщелоченных на овощном сортоиспытательном участке, отмечено весьма существенное увеличение содержания ила и физической глины в пахотном слое (Человечкова, 2022). При статистическом анализе данных крупномасштабных почвенных обследований юго-западной части Кулундинской степи выявлено статистически достоверное увеличение содержания ила в пахотном горизонте каштановых среднесуглинистых почв, а при орошении слабоминерализованными водами супесчаных и легкосуглинистых каштановых почв увеличение содержания ила в пахотном слое весьма существенное (Mikheeva, 2010).

Большая часть проведенных исследований выполнена на основе многолетних полевых опытов на небольших по площади участках почвенного покрова. В то же время свойства почв обладают существенной вариабельностью. Процессы, происходящие в отдельных почвенных профилях, приводят к более или менее количественно выраженным изменениям свойств в разных точках пространства, что приводит к трансформации варьирования. На вариабельность содержания частиц гранулометрического состава верхних горизонтов почвы могут оказывать влияние эрозионные процессы, как водные, так и ветровые, вследствие которых в пространстве возникают участки сноса и накопления частиц физической глины и/или физического песка. Вследствие этого для целостной оценки изменений почв на значительных по площади территориях необходимо применение статистических, вероятностно-статистических и информационных методов анализа данных крупномасштабных обследований почв. При этом для надежного установления трансформации почв на территории за короткое (<100 лет) время, свойственное периодам интенсивного земледельческого использования, необходимы новые характеристики, позволяющие оценивать и регистрировать небольшие по величине изменения свойств объекта с учетом их вариабельности, так как такие изменения диагностируют проявление возможных тенденций. Методика, предложенная ранее (Михеева, 2017), позволяет количественно оценивать результаты трансформации почв по информационному анализу изменений, произошедших в вероятностных распределениях почвенных свойств.

Многие физические, физико-химические и химические свойства почв зависят и статистически коррелируют с содержанием физической глины, и, в особенности, с наиболее дисперсной ее составляющей – с содержанием илистой фракции. Глинистые минералы участвуют в формировании структуры почвы и способности к катионному обмену через взаимодействие с органическим веществом почвы. Благодаря этим взаимодействиям глинистые минералы способствуют функционированию почв и выполнению ими экосистемных функций. Хотя глинистые минералы считаются стабильными в течение длительных периодов времени, недавние исследования показали, что кристаллографические структуры и типы глинистых минералов могут

подвергаться самопроизвольной модификации и трансформации в связи с изменениями условий окружающей среды (Liu et al, 2017). Вследствие этого даже небольшие по величине, но выраженные на обширной территории, сдвиги в содержании ила и физической глины могут иметь значительное влияние на многие свойства, а, следовательно, на экологические и утилитарные функции почв. Поэтому большую практическую значимость представляет достоверная оценка изменений этих показателей почвы в результате длительного пахотного использования агроландшафтов, в том числе в Западной Сибири, что и определило основную цель данной статьи.

Последние годы в России правительством взят курс на информатизацию и цифровизацию для совершенствования управления всех областях деятельности. В области почвоведения увеличилось количество работ по созданию региональных банков данных почвенной информации, почвенных дата-центров, в том числе по гранулометрическому составу почв (Болдырева, 2022). Возникла потребность в новых информационных теоретических и методологических подходах для анализа состояния и изменений почв. В этой связи важно иметь информационные эталоны свойств почв на территориях исследования в разные моменты времени, что является основой методологии информационного анализа. Поэтому практически и методологически важной, с точки зрения информационного анализа, было определение и анализ информационных эталонов содержания ила и физической глины в пахотных почвах Прииртышской равнины, являющихся объектом данного исследования.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Методология информационного анализа. Обычно при анализе изменений свойств почв используют статистическую оценку различий средних значений признаков, реже характеристик варьирования, таких как стандартные отклонения. Коэффициент вариации не всегда адекватно отражает закономерности различий варьирования, поскольку средние значения и стандартные отклонения почвенных свойств могут изменяться неоднозначно в результате протекания процессов трансформаций почв. Проведенные нами ранее исследования показали, что количественно изменения почв заключаются в трансформации структуры варьирования их свойств, что может отражаться или не отражаться в существенных различиях средних значений (рис. 1).

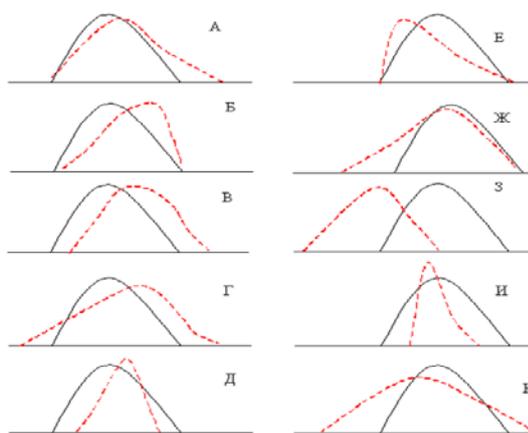


Рисунок 1. Типы изменений вероятностных распределений свойств почв за короткое время: а) пять типов возрастания (А–Д); б) пять типов убывания (Е–К). Обозначения: сплошная – исходное состояние, штриховая – измененное состояние.

При этом происходит перестройка вероятностей количественной выраженности значений свойств, увеличение или уменьшение разброса, появление или устранение асимметрии и (или) эксцесса статистического распределения. Функции вероятностно-статистических распределений дают наиболее полную информацию о количественной выраженности изучаемых свойств и их изменениях в результате как антропогенных, так и природных процессов, чем отдельные статистические показатели. Методика идентификации вероятностно-статистических распределений почвенных свойств на основе статистических выборок фактических данных о свойствах почвы была изложена в более ранних публикациях (Михеева, 2017; Михеева, Оплеухин,

2018). В данной методике характеристика вероятностного распределения дается с помощью информационной энтропии (Колмогоров, 1987):

$$(1) \quad s = -\int f(x) \ln f(x) dx$$

Изменения вероятностных распределений оценивают с помощью информационных показателей - относительного изменения энтропии Δs , % и информационной дивергенцией d :

$$(2) \quad \Delta s = \frac{s_1 - s_2}{s_1} \times 100, \text{ где } s_1 \text{ и } s_2 \text{ значения информационной энтропии в моменты}$$

времени t_1 и t_2 ;

$$(3) \quad d = \int (W1(x) - W2(x)) \ln \left(\frac{W1(x)}{W2(x)} \right) dx, \text{ где } W1(x) \text{ и } W2(x) - \text{сравниваемые функции}$$

вероятностных распределений.

Для идентификации распределений нами было использовано ППП «ISW» (Лемешко, 1995), и для расчета информационных показателей использовали программную среду «R».

Территория исследования. В статье представлены результаты вероятностно-статистической и информационной оценки свойств почв значительной территории юга Западной Сибири, расположенной на $53^{\circ}15'-53^{\circ}47'$ с.ш. и $75^{\circ}05'-77^{\circ}01'$ в.д. В геоморфологическом отношении территория является центральной частью Прииртышской равнины, сложенной породами супесчаного, легкосуглинистого и среднесуглинистого гранулометрического состава. Климат территории резко континентальный с сухим жарким летом и холодной малоснежной зимой; характеризуется сухостью весенне-летнего периода с максимумом осадков в середине лета. Годовое количество осадков составляет в среднем 275,5 мм, иногда до 400 мм, а коэффициент увлажнения равен 0,4–0,6, что характерно для засушливой степи.

Почвы преимущественно черноземы южные (Классификация..., 1977) или *Naptic Chernozem Pachic* по классификации IUSS Working Group WRB (2015), с небольшими участками комплексов засоленных и солонцеватых почв. Основную площадь использовали и продолжают интенсивно использовать под пахотное земледелие для выращивания пшеницы, кукурузы, многолетних трав. На изученной территории черноземы южные легко- и среднесуглинистого гранулометрического состава являются наиболее распространёнными почвами, поэтому в статье дана оценка состояния этих почв в начале шестидесятых (1963) и в конце восьмидесятых (1989) годов двадцатого столетия.

В начале этого периода значительно расширились площади пахотных территорий в рамках государственной программы Советского Союза по освоению целинных и залежных земель. Как известно, вследствие тотальной распашки, совпавшей во времени с высокой ветровой активностью, на больших площадях пахотных почв активизировались дефляционные процессы. Однако на изучаемой территории на черноземах южных легко- и среднесуглинистого гранулометрического состава процессы ветровой эрозии были не выражены, поскольку данные почвы проявляли устойчивость к развеванию (Mikheeva, Kuzmina, 2000). Кроме того, при обработке почвы широко использовали безотвальные технологии и другие противоэрозионные мероприятия.

Временной интервал 60-90-годов прошлого столетия для климатологов мира и России является базовым для построения трендов и выявления климатической аномалий. Начиная с середины восьмидесятых годов на изученной территории отмечают тренд на потепление. Это выражается в повышении среднегодовых и суммарных температур, в том числе за вегетационные периоды, по годам, что согласуются с общей тенденцией к потеплению в последние несколько десятков лет, выявленной также и в других районах юга Западной Сибири и России^{1, 2}.

Методы и исходные данные. Предложенная нами количественная модель состояния почвы представляет собой набор вероятностно-статистических распределений (ВСП) свойств почвы в пределах исследуемого объекта (Михеева, 2017). В статье проанализированы и оценены изменения ВСП содержания ила и физической глины (по Качинскому) в слоях почвы 0–20, 20–30, 30–50 и 50–100 см в начале шестидесятых и конце восьмидесятых годов двадцатого столетия.

¹<http://en.tutiempo.net/climate>

²<http://climatechange.su>

Исходными данными послужили материалы крупномасштабных (1:25000) почвенных исследований, проведенных на исследуемой территории в разное время стандартными методами (Общесоюзная инструкция..., 1973).

Все полученные данные по этой территории служили для создания банка данных. Построение базы данных, группирование и анализ данных проводили с использованием методов статистического анализа. Каждая информационная строка в базах данных характеризует такие параметры почвы, как глубина слоя, содержание гумуса, pH, содержание гранулометрических фракций и др. Первым обязательным этапом обработки данных была их группировка по почвенно-генетическому принципу. Каждая группа относится к одному моменту времени, одному подтипу и литологической разновидности почвы. Объем полученных статистических выборок составлял 39-130 почвенных разрезов, в зависимости от распространенности конкретной группы почв и возможностей проведения исследований, что было достаточно для проведения вероятностно-статистического и информационного анализа. Правильность и достоверность группировки была доказана унимодальностью полученных вероятностных распределений и высоким уровнем значимости (табл. 2).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В таблице 1 приведены статистические характеристики содержания ила и физической глины в черноземах южных, используемых в пахотном земледелии, на начало и конец исследуемого тридцатилетнего периода. Данные показывают, что как в легкосуглинистой, так и в среднесуглинистой разновидности черноземов южных существенно увеличились средние значения содержания ила, в меньшей степени физической глины, что особенно выражено в поверхностном слое. С другой стороны, данные показывают существенное уменьшение стандартного отклонения, что выражено весьма значительно в верхнем полуметре в обеих проанализированных в статье разновидностях черноземов южных.

Таблица 1

Статистические характеристики содержания ила и физической глины в черноземах южных, %

Глубина слоя, см	Ил		Физическая глина	
	Среднее значение	Стандартное отклонение	Среднее значение	Стандартное отклонение
Легкосуглинистые почвы				
1963 год (n = 53)				
0-20	12,16	2,05	24,84	3,11
20-30	15,62	3,24	26,75	4,30
30-50	15,20	3,73	25,00	6,26
50-100	14,93	3,53	23,10	5,38
1989 год (n = 65)				
0-20	15,97	1,70	26,41	2,48
20-30	16,59	1,95	26,48	2,66
30-50	16,90	2,50	25,12	3,66
50-100	15,17	3,03	23,01	5,13
Среднесуглинистые почвы				
1963 год (n = 39)				
0-20	15,63	3,09	32,58	2,46
20-30	19,93	3,59	34,60	4,59
30-50	20,46	3,95	32,85	6,71
50-100	19,20	5,38	30,57	9,35
1989 год (n = 130)				
0-20	20,72	1,99	34,56	2,60
20-30	21,94	2,14	34,61	3,29
30-50	21,54	3,06	31,73	6,01
50-100	19,54	3,74	32,43	6,38

Взаимное действие всех факторов, влияющих на формирование почвенной вариабельности, суммарно отражается в вероятностях проявления тех или иных значений изучаемых показателей.

При анализе этих вероятностей определение функций вероятностных распределений основных свойств почв или грунтов и их параметров по наблюдаемым данным является критическим начальным шагом, поскольку от этих оценок зависят последующий анализ состояния почв или грунтов, что имеет большое значение как в сельском хозяйстве, так и для оценки рисков и надежности геотехнических применений (Deng, 2022).

В таблице 2 для каждого слоя почвы приведены тип функции вероятностного распределения и параметры, полученные в результате статистической процедуры идентификации ВСП. Количество параметров для различных функций изменяется от двух до четырех, при этом с целью унификации они приведены в следующем порядке: параметр сдвига, или смещения (аналог среднего значения), параметр масштаба (аналог дисперсии), затем, если необходимо параметр(ы) формы. В таблице 2 приведены значения достигнутой вероятности в соответствии со статистиками четырех непараметрических критериев – Колмогорова, Смирнова, двух модификаций критерия Мизеса, а также средняя достигнутая вероятность по совокупности критериев. Необходимость использования совокупности критериев объясняется тем, что в ряде случаев значения статистических критериев могут значительно различаться, так как они характеризуют разные меры близости теоретического вероятностного распределения и фактического статистического распределения (Лемешко, 1995).

Достигнутая вероятность p по статистикам ряда непараметрических критериев довольно высока во всех слоях как легкосуглинистых, так и среднесуглинистых почв (см. табл. 2). Это означает, что: 1) набор функций вероятностных распределений, выбранных для моделирования варибельности гранулометрического состава, соответствует фактическим данным о почвах; 2) набор ВСП, полученный в результате процедуры идентификации ближайших по совокупности критериев функций вероятностных распределений, может рассматриваться как информационная вероятностно-статистическая модель содержания ила и физической глины в изученных почвах.

Полученные функции ВСП относятся к двум группам (см. табл. 2) – симметричные с разной выраженностью концентрации центральной части (нормальное, логистическое, Коши, Лапласа, двойное экспоненциальное) и несимметричные, обладающие в той или иной степени выраженной правой асимметрией и более или менее выраженной центральной частью (Ln-нормальное, максимального значения, Su-Джонсона).

Содержание ила. Вероятностно-статистические распределения содержания ила (ВСП СИ) в легкосуглинистой разновидности в начале 60-х годов в слоях верхней полуметровой толщи характеризовались симметричными функциями (нормальное, логистическое, Коши) и только во втором полуметре ВСП СИ обладало небольшой асимметрией (Ln-нормальное) (см. табл. 2). За исследуемый период ВСП СИ в легкосуглинистой разновидности сместилось вправо в сторону повышенных значений (рис. 2). Среднее значение, которое, в случае нормального распределения является параметром сдвига, увеличилось на 3,8%, при небольшом уменьшении параметра масштаба, в данном случае дисперсии (см. табл. 1, 2). Тип ВСП при этом не изменился, сохранилось нормальное распределение, однако вероятность пониженных значений содержания ила 5–10% уменьшилась практически до нуля, зато значительно увеличилась вероятность значений 15–20% (см. рис. 2).

В слоях 20–30 и 30–50 см перестройка ВСП СИ также заключается в уменьшении вероятностей пониженных для данных горизонтов значений содержания ила и небольшом увеличении вероятностей повышенных значений, что больше выражено в слое 30–50 см (см. рис. 2). Эта тенденция выражена в этих слоях намного менее значительно, чем в поверхностном горизонте и не привела к существенным смещениям ВСП, несмотря на выявленные изменения средних значений (см. табл. 1). Однако перестройка структуры вероятностей привела к изменению типов распределений исходно симметричных логистического и Коши в Ln-нормальное, с небольшой степенью выраженности правой асимметрии. В слое 50–100 см перестройка ВСП СИ аналогична, но выражена в гораздо меньшей степени, чем в более высоких горизонтах, при этом его тип и параметры существенно не изменились.

Содержание ила в среднесуглинистой разновидности исследованных черноземов южных в среднем по отдельным горизонтам на 3,5–5,0% выше, чем в легкосуглинистой разновидности (см. табл. 1). Дисперсия содержания ила в поверхностном горизонте и слое 50–100 см тоже существенно выше в более легкой разновидности почвы, а в слоях 20–30 и 30–50 см она в обеих разновидностях почв примерно одинакова.

Таблица 2

Вероятностно-статистические распределения содержания ила и физической глины в черноземах южных

Слой, см	Функция ^а	Параметры ^б $\theta_0, \theta_1, \theta_2, \theta_3$	Достигнутая вероятность p по критериям				p сред.
			Колмогорова	Смирнова	ω_2	Ω_2	
Легкосуглинистые почвы							
Содержание ила (%), 1963-1967 годы (n = 53)							
0-20	N	12,16; 2,03	0,22	0,44	0,26	0,35	0,32
20-30	Логист.	15,63; 1,8	0,99	0,98	1,00	1,00	0,99
30-50	Коши	14,91; 1,85	0,61	0,53	0,54	0,34	0,51
50-100	Лп-норм.	2,68; 0,23	0,65	0,88	0,70	0,82	0,76
1989 год (n = 65)							
0-20	N	15,97; 1,69	0,59	0,36	0,45	0,49	0,47
20-30	Лп-норм.	2,80; 0,12	0,35	0,70	0,59	0,51	0,54
30-50	Лп-норм.	2,81; 0,15	0,80	0,94	0,94	0,90	0,89
50-100	Лп-норм.	2,70; 0,20	0,90	0,56	0,84	0,82	0,78
Содержание физической глины (%), 1963-1967 годы (n = 53)							
0-20	ДЭ	24,80; 4,88; 2,69	0,46	0,00	0,64	0,50	0,4
20-30	N	26,75; 4,27	0,72	0,81	0,66	0,78	0,75
30-50	Макс.	22,11; 4,95	0,80	0,69	0,60	0,41	0,62
50-100	Лапласа	22,48; 3,78	0,79	0,74	0,86	0,63	0,75
1989 год (n = 65)							
0-20	N	26,40; 2,46	0,36	0,40	0,08	0,04	0,22
20-30	ДЭ	26,36; 4,44; 3,48	0,47	0,00	0,53	0,45	0,36
30-50	Макс.	23,41; 3,0	0,73	0,92	0,71	0,77	0,78
50-100	Лп-норм.	3,11; 0,22	0,72	0,48	0,75	0,70	0,66
Среднесуглинистые почвы							
Содержание ила (%), 1963-1967 годы (n = 30)							
0-20	Макс.	14,17; 2,58	0,63	0,81	0,75	0,81	0,75
20-30	Лп-норм.	3,00; 0,17	0,71	0,81	0,76	0,71	0,75
30-50	Коши	20,82; 1,93	0,30	0,16	0,33	0,32	0,28
50-100	Логист.	18,99; 2,93	0,77	0,62	0,80	0,83	0,75
1989 год (n = 95)							
0-20	N	20,72; 1,99	0,47	0,57	0,73	0,85	0,66
20-30	ДЭ	21,93; 3,52; 3,10	0,85	0,00	0,95	0,93	0,68
30-50	ДЭ	21,54; 4,75; 2,52	0,40	0,00	0,56	0,58	0,39
50-100	N	19,54; 3,72	0,78	0,53	0,83	0,92	0,76
Содержание физической глины (%), 1963-1967 годы (n = 30)							
0-20	Макс.	31,43; 1,99	0,92	0,76	0,60	0,52	0,7
20-30	Su-Джонс.	31,60; 3,09; -0,79; 1,22	0,76	0,00	0,54	0,70	0,5
30-50	Логист.	32,99; 3,70	0,73	0,90	0,67	0,62	0,73
50-100	Логист.	30,21; 5,26	0,81	0,67	0,68	0,53	0,67
1989 год (n = 95)							
0-20	Лп-норм.	3,54; 0,075	0,31	0,19	0,19	0,08	0,20
20-30	ДЭ	34,56; 5,19; 2,67	0,65	0,00	0,74	0,74	0,53
30-50	N	31,73; 5,98	0,51	0,58	0,59	0,34	0,51
50-100	N	29,71; 6,35	0,34	0,18	0,65	0,69	0,46

Примечания.

^а Обозначения функций: Макс. – максимального значения, Лп-норм – логарифмически нормальное, Логист. – логистическое, N – нормальное (Гаусса), ДЭ – двойное экспоненциальное.^б Порядок параметров: θ_0 – сдвига, θ_1 – масштаба, $\theta_2(\theta_3)$ – формы. ω_2 – критерий Крамера–Мизеса–Смирнова; Ω_2 – критерий Андерсона–Дарлингга.

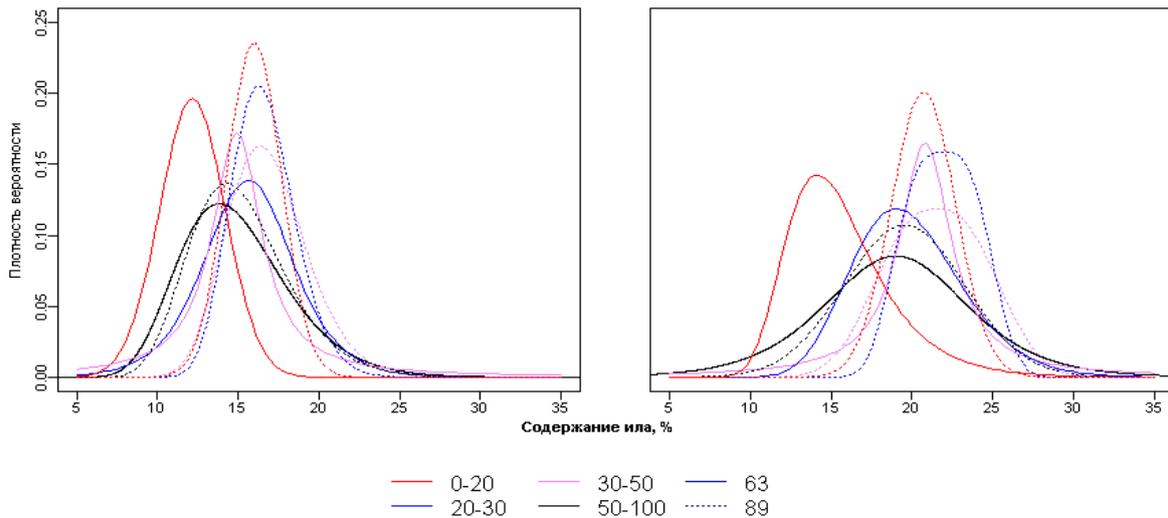


Рисунок 2. Функции вероятностно-статистического распределения содержания ила в черноземах южных в 1963 и 1989 годах: слева – легкосуглинистый; справа – среднесуглинистый.

Закономерности ВСР СИ в среднесуглинистой разновидности несколько отличаются от рассмотренных выше для легкосуглинистой почвы (см. рис. 2). Исходно в начале 60-х годов двадцатого столетия ВСР СИ в слоях 0–20 и 20–30 см обладали выраженной правой асимметрией, в большей степени в поверхностном горизонте. В начале 60-х годов в слоях 30–50 и 50–100 см ВСР СИ были симметричны, причем в слое 30–50 см оно отличалось более узким центром, здесь тип ВСР СИ был – Коши, а в слое 50–100 см – логистическим.

В конце исследуемого периода во всех горизонтах среднесуглинистых черноземов южных ВСР СИ являлись симметричными: в поверхностном горизонте и в слое 50–100 см тип ВСР СИ – нормальное, а в слоях 20–30 и 30–50 см – двойное экспоненциальное. Перестройка ВСР в слоях 0–20 и 20–30 см заключалась в существенном уменьшении вероятности пониженных и увеличении вероятности повышенных значений, что привело к уменьшению интервала варьирования, выраженному сдвигу и изменению типа функций. В слоях 30–50 и 50–100 см изменения ВСР СИ аналогичные, но выражены в гораздо меньшей степени, что не привело к изменениям интервалов варьирования и смещению, тем не менее, тип функций изменился вследствие расширения центральной части распределений.

Содержание физической глины. Содержание физической глины (СФГ) отражает суммарное содержание в почве элементарных частиц с диаметром менее 0,01 мм. Помимо илистых частиц с диаметром менее 0,001 мм, в этот показатель входят также содержание мелкой и средней пыли с диаметрами, соответственно 0,001–0,005 мм и 0,005–0,01 мм. В изученных почвах доля мелкой и средней пыли в СФГ составляет 40–50%. Доля СИ в СФГ в начале 60-х годов составляла от 48–49% в поверхностном горизонте и 57–60% – в иллювиальном горизонте. За исследованный 30-летний период доля СИ в СФГ в поверхностном горизонте увеличилась до 60%, а в иллювиальном – до 63%, таким образом, относительное СИ в СФГ заметно возросло.

ВСР СФГ в легкосуглинистой разновидности в слоях 0–20 и 20–30 см в начале 60-х годов были симметричны с более или менее выраженным центром, двойное экспоненциальное и нормальное, соответственно (табл. 2, рис. 3). В слое 30–50 см отмечается правая асимметрия ВСР СФГ, которое характеризуется типом максимального значения, а в слое 50–100 см ВСР симметричное с очень узким центром – типом Лапласа.

Через 30 лет ВСР СФГ в верхних слоях легкосуглинистых черноземов южных сохранило симметричность, однако изменения, заключающиеся в уменьшении вероятности пониженных значений и увеличении вероятности значений выше центральных, привели к изменениям типов ВСР на нормальное и двойное экспоненциальное, соответственно. Эти изменения отразились и на статистических характеристиках: в слое 0–20 см среднее значение возросло на 1,6%, в 20–30 см оно практически не изменилось, однако стандартное отклонение СФГ весьма существенно уменьшилось в обоих слоях.

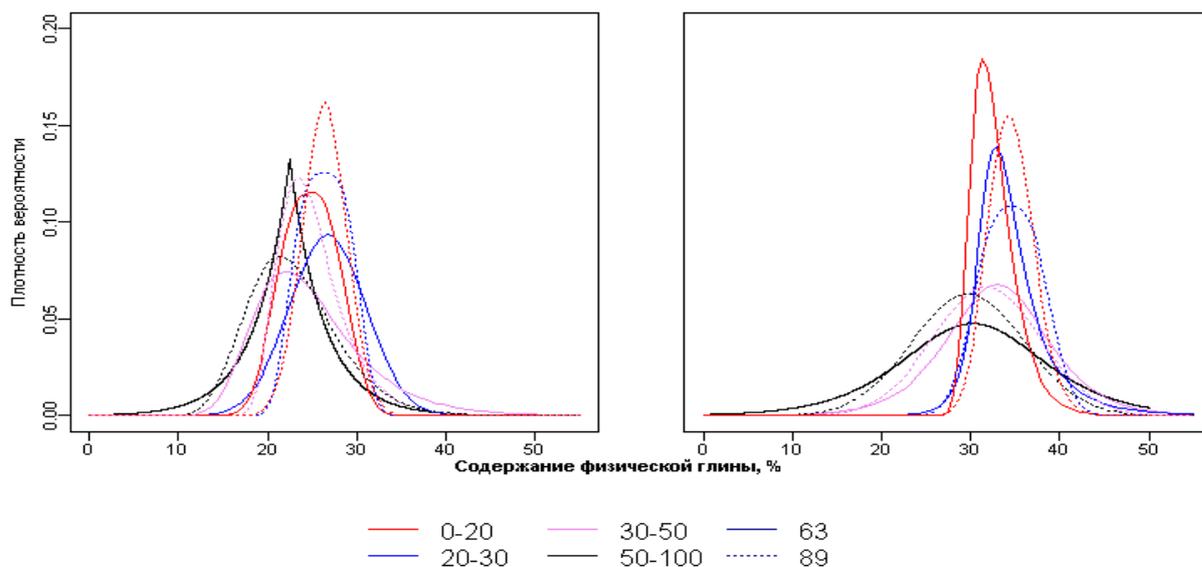


Рисунок 3. Функции распределения содержания физической глины в черноземах южных в 1963 и 1989 годах: слева – легкосуглинистый; справа – среднесуглинистый.

В слое 30–50 см сохранилась правая асимметрия ВСР, тип ВСР максимального значения не изменился, однако перестройка ВСР все-таки произошла. При изменении параметра сдвига на 1,3%, что, впрочем, не отражает среднее значение, очень сильно уменьшился параметр рассеяния, характеризующий значительное суживание варьирования, что отражается также весьма выраженным снижением стандартного отклонения.

В слое 50–100 см снижение вероятности пониженных и рост вероятности центральных значений привел к расширению центральной части ВСР, возникновению небольшой правой асимметрии, изменению типа распределения Лапласа на Ln-нормальное. Однако изменения статистических характеристик эти изменения практически не отражают, что лишний раз убеждает, что анализ динамики ВСР более информативен в случае изучения изменений объекта.

В среднесуглинистой разновидности черноземов южных ВСР СФГ в начале 60-х годов в слоях 0–20 и 20–30 см обладали правой асимметрией, более выраженной в поверхностном слое, где характеризуется типом максимального значения, в нижележащем слое – распределение Су-Джонсона. В слоях 30–50 и 50–100 см ВСР СФГ симметричны и идентифицированы как логистические.

За 30 лет в слое 0–20 см произошла перестройка ВСР СФГ вследствие уменьшения вероятностей пониженных и роста вероятностей центральных значений, что привело к расширению центра распределения и изменению типа ВСР на Ln-нормальный. В результате произошел некоторый сдвиг ВСР СФГ, что также отражается увеличением среднего значения на 2%, однако величина стандартного отклонения не отражает произошедших изменений.

Аналогичные изменения ВСР произошли и в слое 20–30 см, однако здесь они не привели к изменению среднего значения, хотя изменение типа распределения произошло. В слоях 30–50 и 50–100 см перестройка ВСР заключалась в расширении центральной части, причем в 30–50 небольшой сдвиг ВСР в сторону уменьшения СФГ на 1,2% и слабо выраженном снижении рассеяния привели к нормальному типу ВСР. Аналогично в слое 50–100 см, однако здесь существенно уменьшился и разброс значений.

Анализ информационных характеристик. На основе идентифицированных ВСР СИ и СФГ (см. табл. 2) по формулам 1 и 2 проведены расчеты информационной энтропии s и ее относительного изменения Δs , %. Эти величины можно использовать для количественной оценки степени варьирования содержания ила и физической глины в исследуемых почвах и ее относительного приращения или убывания в каждом почвенном слое за исследуемый период (табл. 3). Для скалярной информационной оценки перестройки ВСР СИ и СФГ за тридцатилетний период по формуле (3) рассчитана величина информационной дивергенции d (см. табл. 3).

Таблица 3

Информационные характеристики вероятностно-статистических распределений содержания ила и физической глины в черноземах южных

Глубина, см	s^l	$\Delta s, \%$	d	s	$\Delta s, \%$	d
	Ил			Физическая глина		
Легкосуглинистые почвы						
1963 год						
0-20	2,13	–	–	2,53	–	–
20-30	2,56	–	–	2,87	–	–
30-50	2,45	–	–	3,11	–	–
50-100	2,62	–	–	2,98	–	–
Σ по профилю	9,76	–	–	11,49	–	–
1989 год						
0-20	1,94	8,9	4,37	2,32	8,3	0,46
20-30	2,09	18,4	1,23	2,37	17,4	1,28
30-50	2,31	5,7	2,99	2,67	14,2	0,95
50-100	2,49	5,0	0,04	3,01	-1,0	0,31
Σ по профилю	8,83	38	8,63	10,37	38,9	3,0
Среднесуглинистые почвы						
1963 год						
0-20	2,46	–	–	2,27	–	–
20-30	2,40	–	–	2,81	–	–
30-50	2,27	–	–	3,29	–	–
50-100	2,68	–	–	3,57	–	–
Σ по профилю	9,81	–	–	11,94	–	–
1989 год						
0-20	2,08	15,4	5,19	2,37	-4,4	0,71
20-30	2,07	13,8	1,83	2,60	7,5	0,42
30-50	2,25	0,8	0,86	3,21	2,4	0,07
50-100	2,43	9,3	0,23	3,27	8,4	0,24
Σ по профилю	8,83	39,3	8,11	11,45	13,9	1,44

Примечание.

s^l , Δs , d – величины информационной энтропии, ее приращения и информационной дивергенции, вычисленные по формулам 1-3. Прочерк – нет данных.

В легкосуглинистых почвах относительное убывание информационной энтропии СИ в наибольшей степени (–18,4%) выражено в слое 20–30 см. В других слоях почвы это убывание совсем невелико (менее 10%). Энтропия СФГ в верхних слоях аналогична энтропии СИ, однако в слое 30–50 см убывание энтропии СФГ выражено сильнее (–15%), чем убывание энтропии СИ. При этом во втором полуметре энтропия СФГ за исследованный период практически не изменилась. В среднесуглинистых почвах относительное убывание энтропии СИ максимально в верхних тридцати сантиметрах (–15%), в слое 30–50 см энтропия СИ практически не изменилась, а глубже по профилю она уменьшилась на 9%. Информационная энтропия СФГ в слое 0–20 см немного увеличилась (на 5%), а глубже по профилю уменьшилась на 5–10%.

Графики, представленные на рисунке 4 показывают, что относительное приращение информационной энтропии содержания ила и физической глины за исследованный период отрицательно практически во всех слоях почвы, что говорит об убывании энтропии, а следовательно, уменьшении варьирования, которое произошло как было показано выше, вследствие перестройки ВСП, а в некоторых случаях сдвига.

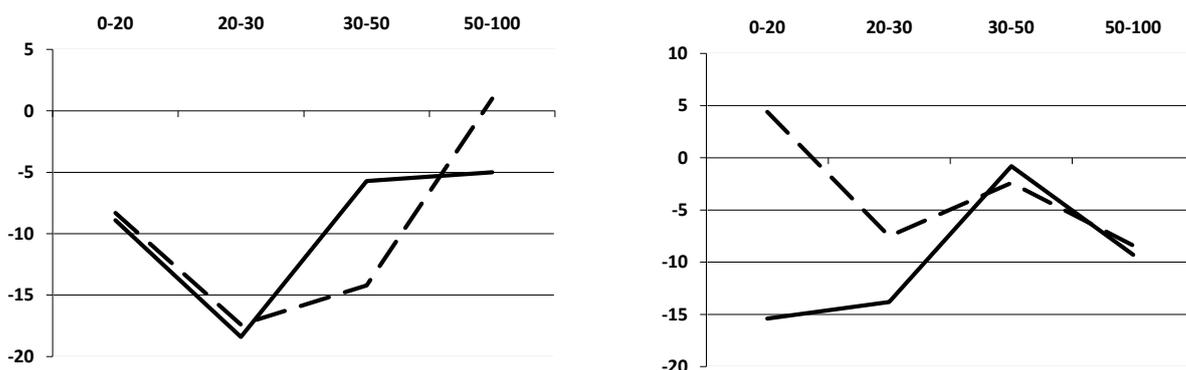


Рисунок 4. Относительное (%) приращение (убывание) информационной энтропии за период 1963–1989 гг. содержания ила (сплошная линия) и физической глины (штриховая линия) в черноземе южном: слева – легкосуглинистом; справа – среднесуглинистом.

Графики на рисунке 5 показывают, что информационная дивергенция СИ в обеих исследованных разновидностях черноземов южных максимальна в слое 0–20 см и равна 4,5–5,2, в слое 20–30 см – 1,2–1,8, а во втором полуметре совсем невелика, близка к нулю. В слое 30–50 см в легкосуглинистой разновидности наблюдается существенные информационные изменения СИ, что выражается величиной информационной дивергенции равной 3,0. Информационная дивергенция СФГ в обеих разновидностях невелика, она значительно меньше 1,0, и только в легкосуглинистой разновидности в слоях 20–30 и 30–50 см она равна 1,3–1,0.

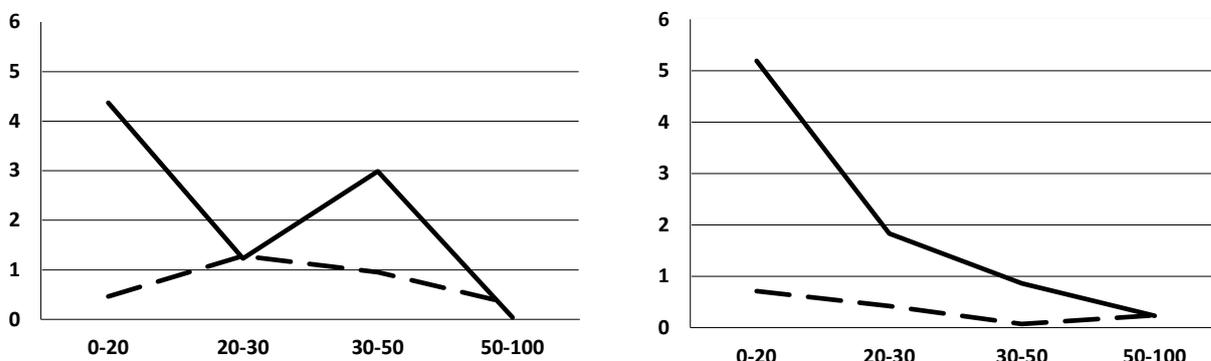


Рисунок 5. Информационная дивергенция за период 1963–1989 гг. содержания ила (сплошная линия) и физической глины (штриховая линия) в черноземе южном: слева – легкосуглинистом; справа – среднесуглинистом.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

В работе выявлено, что за период 1963–1991 годы произошло увеличение содержание ила и физической глины в поверхностном слое пахотных легко- и среднесуглинистых черноземов южных, которые являются наиболее распространенными почвами на исследуемой территории Прииртышской равнины. Возможно, это связано с возникшим в середине восьмидесятых годов прошлого столетия трендом на повышение температур, что могло усилить почвообразовательные процессы. Обнаруженные количественные изменения гранулометрического состава необратимы, поэтому их можно рассматривать природно-агрогенную память почв.

Для реальных сложных систем следствием увеличения степени открытости, то есть при усилении потоков энергии и вещества через их границы, является убывание энтропии их свойств (Прангишвили, 2004). В случае почвенных систем возрастание открытости означает усиление физических, химических и биологических антропогенных воздействий и природно-климатических процессов, вызывающих увеличение потоков вещества и энергии, проходящих через поверхность

почвы, а также через границы почвенных горизонтов, в виде тепла, почвенной влаги, органических и неорганических веществ.

В работе (Smeck et al, 1983), основываясь на общих представлениях термодинамики открытых систем (Prigogine, 1961) теоретически рассмотрены возможные изменения энтропии почвенных систем в зависимости от почвообразовательных процессов. При этом авторами было высказано, что изменения энтропии (ΔS) почвенной системы из-за различных почвообразовательных процессов могут иметь положительные или отрицательные величины, что оценивает изменение хаотичности или беспорядка в почве, вследствие почвообразовательных процессов. По мнению этих авторов физическое перемешивание, выветривание первичных минералов - процессы, приводящие к положительному приращению энтропии, а элювиально-иллювиальный процесс, формирование вторичных минералов, выщелачивание, накопление органического вещества приводят к убыванию энтропии.

Установленное нами убывание энтропии содержания ила и физической глины в пахотных черноземах южных, как и показанное ранее снижение энтропии содержания гумуса, по-видимому, является фундаментальным системным процессом, характерным для почв открытых сложных систем в связи с увеличением их открытости. Убывание энтропии различных почвенных свойств происходит по-разному как в отдельных горизонтах, так и в почвенном профиле в целом: снижение энтропии содержания ила (СИ) составляет в поверхностном горизонте не более 10–15%, а уменьшение энтропии содержания гумуса (СГ) до 60% от начального состояния (Михеева, Оплеухин, 2015).

Анализ полученных результатов показал, что в черноземах южных за тридцать лет интенсивного пахотного использования на исследуемой территории наиболее существенные изменения ВСР СИ произошли в верхнем двадцатисантиметровом слое почвы; в слое 20–30 см эти изменения выражены менее значительно. Трансформация ВСР заключается в убывании вероятностей пониженных и росте вероятностей центральных и повышенных значений (вариант Б возрастания свойства на рис. 1). Именно, произошедшие изменения ВСР СИ являются причиной роста средних значений и уменьшения стандартных отклонений этого показателя. Вследствие произошедших изменений ВСР, при том, что верхний предел практически не изменился, варьирование содержания ила сократилось, что отражается весьма существенным снижением стандартного отклонения – на 20–40% от исходной величины. Уменьшение информационной энтропии менее чем на 10–15% от начального состояния дает более умеренное восприятие убывания варьирования СИ, и эта оценка более обоснована, так как она учитывает трансформацию ВСР, поэтому для оценки изменений варьирования свойств предпочтительна информационная энтропия.

Информационная оценка изменений свойств почвы проведена нами с помощью скалярной, независимой от единиц измерения, величины информационной дивергенции. Ее преимущество в том, что она применима для количественной оценки различий ВСР свойств всякого рода, в различных интервалах варьирования, объектах, горизонтах и т.п. В данной статье проведено сравнение одних и тех же свойств (СИ и СФГ) в пределах одного объекта (черноземы южные Прииртышской равнины) в разные моменты времени (начало 60-х и конец 80-х годов 20 столетия), поэтому информационная дивергенция дает количественную оценку изменений ВСР изучаемых свойств произошедших в данных почвах за рассматриваемый период.

Величина информационной дивергенции позволяет ранжировать свойства, горизонты, почвы, объекты по степени различий, а также по степени уязвимости при антропогенных воздействиях и климатических изменениях (Михеева, 2009). Так, максимальная информационная дивергенция СИ в черноземах южных за 30 лет достигает 4,5–5,2 в слое 0–20 см. В более глубоких горизонтах черноземов южных изменения ВСР СИ, так же как и в поверхностном слое, заключались в существенном уменьшении вероятности пониженных значений. Наиболее сильно это проявилось в слое 30–50 см легкосуглинистых почв (информационная дивергенция равна 3,0), при этом вероятность пониженных значений СИ снизилась практически до нуля, и вследствие этого отмечен рост нижнего предела интервала варьирования. В среднесуглинистой разновидности аналогичная тенденция наблюдается в слое 20–30 см (информационная дивергенция равна 1,8).

Информационная дивергенция содержания гумуса (СГ) в поверхностном слое, при упомянутом выше драматическом уменьшении энтропии, за этот период намного меньше и равна 0,2–0,5 (Михеева, Оплеухин, 2015). Таким образом, произошедшие за исследуемый период

информационные изменения СИ в поверхностном слое значительно сильнее, чем СГ, хотя уменьшение энтропии, наоборот, более выражено для СГ, что было вызвано существенным убыванием вероятности повышенных значений СГ (см. вариант Е убывания свойства на рис. 1). Информационная дивергенция СИ и СГ внутри почвенного профиля сопоставима: для СГ в слое 30-50 в легкосуглинистых черноземах южных – 4,5, в среднесуглинистых – 2,5 (Михеева, Оплеухин, 2015). Перестройка ВСП этих почвенных характеристик внутри профиля вызвана существенным ростом нижних пределов варьирования СИ и СГ (см. варианты Д и И на рис. 1).

Такая тенденция, вероятно, вызвана внутрипрофильным перемещением илистых частиц из верхних горизонтов почвы в более глубокие слои. Данный процесс можно оценить как слабый или умеренный, поскольку он отразился только на нижней части интервала варьирования и не привел к смещению верхнего предела варьирования СИ. По всей видимости, эти изменения произошли вследствие увеличения количества влаги, поступающей в пахотную почву в течение длительного времени, на что указывает разница в проявлении трансформаций в литологических разновидностях почвы: в легкосуглинистых почвах они выявлены в более глубоком слое, что, скорее всего, вызвано большей влагопроводностью легкосуглинистых почв, в силу их более легкого гранулометрического состава (Панфилов, Сенькова, 1988).

Энтропия является аддитивной величиной, поэтому энтропия почвенного профиля равна сумме энтропий в отдельных слоях. Суммарная энтропия СИ в почвенном профиле легкосуглинистых и среднесуглинистых почв практически одинакова (9,8), а через тридцать лет уменьшилась до 8,8 в обеих разновидностях. При этом сумма различий энтропий по слоям больше, чем различие суммарных энтропий за прошедший период, что свидетельствует о том, что произошедшие изменения затрагивают в большей степени отдельные слои почвы, тогда как почвенный профиль в целом сохраняет достаточную устойчивость к изменениям.

Суммарные по почвенному профилю значения энтропии СФГ в легкосуглинистой и среднесуглинистой почве в начале периода близки по величине 11,5 и 11,9. В конце периода суммарная по профилю энтропия в легкосуглинистой почве уменьшилась до 10,4, но в среднесуглинистой почве практически не изменилась. Наиболее существенные изменения ВСП СФГ произошли в легкосуглинистой разновидности в слое 20–30 см (дивергенция 1,28), несколько менее они выражены в слое 30–50 см (дивергенция 0,95), при этом произошло увеличение нижнего предела варьирования и небольшое снижение вероятности повышенных значений.

ВЫВОДЫ

Изменения в составе твердой фазы почвы необратимы, поэтому они сохраняются и формируют длительную "память" почвы. В связи с этим достоверная количественная оценка изменений гранулометрического состава, особенно содержания мелких частиц, очень важна для выяснения значимости современных процессов трансформации почвы, суммарный результат которых будет сохраняться в почвенном профиле и, в дальнейшем, влиять на экологические и утилитарные функции почв.

Выявлено, что на изучаемой территории Прииртышской равнины за период 1963–1989 гг. в пахотных почвах произошло увеличение среднего значения содержания ила в поверхностном слое, соответственно, на 3,8–5,1% в легко- и среднесуглинистой разновидностях черноземов южных. Увеличение среднего содержания физической глины составило 1,5–2,0%, что не вывело значения этого показателя из пределов, присущих литологическим разновидностям. Увеличение средних значений содержания ила и физической глины, сопровождалось убыванием их стандартных отклонений, что наиболее существенно выражено для содержания ила в верхнем полуметре.

Доля содержания ила в физической глине в начале 60-х годов составляла 48–49% в поверхностном горизонте и 57–60% – в иллювиальном горизонте. За исследованный 30-летний период она увеличилась до 60% в поверхностном горизонте и 63% – в иллювиальном. Таким образом, относительное содержание ила в физической глине заметно возросло. Трансформации затрагивают отдельные слои почвы, тогда как почвенный профиль в целом сохраняет устойчивость.

Выявленные количественные изменения произошли вследствие существенной перестройки вероятностно-статистических распределений содержания ила, которая в поверхностном слое оценивается высокими значениями информационной дивергенции 4,4–5,2. Сущность этих трансформаций заключается в выраженной тенденции к увеличению нижнего предела

варьирования, что и привело к росту среднего содержания ила и уменьшению стандартного отклонения. В слое 30–50 см легкосуглинистых почв и в слое 20–30 см среднесуглинистых почв тенденция к увеличению нижнего предела варьирования содержания ила выражена, но в меньшей степени, а в слое 50–100 см существенных количественных изменений не выявлено.

Перестройка вероятностно-статистических распределений содержания физической глины за исследуемый период в пахотных черноземах южных выражена в меньшей степени и оценивается невысокими значениями информационной дивергенции 0,5–0,7. Сущность изменений вероятностно-статистических распределений содержания физической глины заключается в уменьшении вероятности пониженных и увеличении вероятности значений выше центральных, что привело к изменению типов вероятностных распределений, несмотря на малые изменения статистических характеристик.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для количественной оценки состояния и изменений почв в целом на территории необходимо использовать информационные характеристики. Полученные вероятностно-статистические распределения содержания ила и физической глины являются информационными эталонами этих показателей на территории Прииртышской равнины. Они могут служить для сравнения с результатами прошедших, текущих и будущих мониторинговых исследований почв на изучаемой и соседних территориях. Величины информационной энтропии и дивергенции являются скалярными показателями для характеристики вариабельности и трансформаций вероятностно-статистических распределений свойств почв.

ФИНАНСОВАЯ ПОДДЕРЖКА

Исследования были выполнены при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект № 121031700316-9).

ЛИТЕРАТУРА

1. Байбеков Р.Ф. *Влияние длительного применения удобрений на агроэкологическое состояние подзолистых и черноземных почв Европейской части России*. Автореф. дисс. ... д.с.-х.н. М., 2003. 36 с.
2. Болдырева В.Э. *Принципы интерпретации данных гранулометрического состава черноземов по материалам почвенных дата-центров Ростовской области*. Автореф. дисс. ... к.б.н. Ростов-на-Дону, 2022. 23 с.
3. Еремин Д.И. *Агрогенная трансформация чернозема выщелоченного Северного Зауралья*. Автореф. дисс. ... д.б.н. Тюмень, 2012. 35 с.
4. Караваева Н.А. *Агрогенная память почв // Память почв: почва как память биосферно-геосферно-антропосферных взаимодействий / Отв. ред.: Таргульян В.О., Горячкин С.В. М.: Издательство ЛКИ, 2008. С. 578–614.*
5. Кенжегулова С.О. *Изменение свойств различных типов почв Западной Сибири под влиянием длительного сельскохозяйственного использования*. Автореф. дисс. ... к.с.-х.н. Барнаул, 2008. 15 с.
6. *Классификация и диагностика почв СССР / Составители: В.В. Егоров, В.М. Фридланд, Е.Н. Иванова, Н.Н. Розова, В.А. Носин, Т.А. Фриев. М.: Колос. 1977. 224 с.*
7. Колмогоров А.Н. *Теория информации и теория алгоритмов*. М.: Наука, 1987. 304 с.
8. Лемешко Б.Ю. *Статистический анализ одномерных наблюдений случайных величин: Программная система*. Новосибирск: Новосиб. гос. техн. ун-т, 1995. 125 с.
9. *Михеева И.В. Дивергенция вероятностных распределений свойств почв как количественная характеристика трансформации почвенного покрова // Сибирский экологический журнал. 2009. Т. 16. № 2. С. 231–236.*
10. *Михеева И.В. Вероятностно-статистическая и информационная оценка современных процессов в природных объектах на основе данных почвенного мониторинга // Вестник Сибирского государственного университета геосистем и технологий. 2017. Т. 22. № 4. С. 220–236.*
11. *Михеева И.В., Оплеухин А.А. 30-летние изменения вероятностных и информационных характеристик содержания гумуса в черноземах южных Западной Сибири // Живые и биокосные системы. 2015. № 13. URL: <http://www.jbks.ru/archive/issue-13/article-9>*
12. *Михеева И.В., Оплеухин А.А. Идентификация вероятностно-статистических моделей свойств экологических систем и их информационная оценка // Вестник Сибирского государственного университета геосистем и технологий. 2018. Т. 23. № 4. С. 226–248.*
13. *Общесоюзная инструкция по почвенным обследованиям и составлению крупно-масштабных карт землепользования. М.: Колос, 1973.*

14. *Память почв: почва как память биосферно-геосферно-антропоферных взаимодействий* / Отв. ред.: Таргульян В.О., Горячкин С.В. М.: Издательство ЛКИ, 2008. 692 с.
15. Панфилов В.П., Сенькова Л.А. *Особенности поведения влаги в черноземах южных легкосуглинистых и ее доступность растениям* // Черноземы: свойства и особенности орошения. Новосибирск: Новосибирское отделение "Наука", 1988. С. 167–181.
16. Прангишвили И.В. *Общесистемные закономерности и проблемы управления природными и социальными системами* // Синергетика и проблемы управления. М.: Физматлит, 2004. С. 398–419.
17. Человечкова А.В. *Использование гидрофизических свойств для характеристики почв Курганской области*. Дисс. ... к.б.н. Курган, 2021. 137 с.
18. Deng J. Probabilistic characterization of soil properties based on the maximum entropy method from fractional moments: Model development, case study, and application // *Reliability Engineering & System Safety*. 2022. Vol. 219. P. 108218. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2021.108218>
19. IUSS Working Group WRB. *World Reference Base for Soil Resources. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps*. World Soil Resources Reports No. 106. FAO, Rome, 2014, update 2015. 181 p.
20. Kuzyakov Y., Zamanian K. Reviews and syntheses: Agropedogenesis – humankind as the sixth soil-forming factor and attractors of agricultural soil degradation // *Biogeosciences*. 2019. Vol. 16. P. 4783–4803. <https://doi.org/10.5194/bg-16-4783-2019>
21. Lal R. Restoring Soil Quality to Mitigate Soil Degradation // *Sustainability*. 2015. Vol. 7 (5). P. 5875–5895. DOI:10.3390/su7055875
22. Liu Y.-L., Yao S.-H., Han X.-Z., Zhang B., Banwart S.A. Soil Mineralogy Changes With Different Agricultural Practices During 8-Year Soil Development From the Parent Material of a Mollisol // *Advances in Agronomy*. 2017. Vol. 142. Ch. 6. P. 143–179.
23. Mikheeva I.V. Changes in the probability distributions of particle size fractions in chestnut soils of the Kulunda steppe under the effect of natural and anthropogenic factors // *Eurasian Soil Science*. 2010. Vol. 43. No. 12. P. 1351–1361.
24. Mikheeva I.V., Kuzmina E.D. Statistical characteristics of soil particle-size composition formula // *Eurasian Soil Science*. 2000. Vol. 33. No. 7. P. 713–722.
25. Prigogine I. *Introduction to Thermodynamics of Irreversible Processes*. New York: Willey-Interscience, 199 p.
26. Smeck N.E., Runge E.C.A. Mackintosh E.E. *Dynamics and genetic modelling of soil systems*. In book: Pedogenesis and soil Taxonomy. 1983. New York: Elsevier. P.51–81.
27. Targulian V.O., Bronnikova M.A. Soil memory: theoretical basics of the concept, its current state, and prospects for development // *Eurasian Soil Science*. 2019. Vol. 52. No. 3. P. 229–243. DOI: 10.1134/S1064229319030116

Поступила в редакцию 15.09.2022

Принята 03.11.2022

Опубликована 21.11.2022

Сведения об авторах:

Михеева Ирина Викторовна – доктор биологических наук, старший научный сотрудник лаборатории географии и генезиса почв ФГБУН Институт почвоведения и агрохимии СО РАН (г. Новосибирск, Россия); mikheeva@issa-siberia.ru

Оплеухин Алексей Александрович – кандидат биологических наук, младший научный сотрудник лаборатории географии и генезиса почв ФГБУН Институт почвоведения и агрохимии СО РАН (г. Новосибирск, Россия); opleuhin@issa-siberia.ru

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.



Статья доступна по лицензии [Creative Commons Attribution 4.0 License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

INFORMATIONAL ASSESSMENT OF CHANGES IN SILT AND PHYSICAL CLAY CONTENT IN ARABLE CHERNOZEMS OF THE IRTYSH PLAIN

© 2022 I. V. Mikheeva , A. A. Opleuhin 

Institute of Soil Science and Agrochemistry of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia. E-mail: mikheeva@issa-siberia.ru

The aim of the study was to quantify changes in particle size distributions of southern chernozems under the influence of long-term arable use and to determine information standards for silt and physical clay content in arable soils at different time points.

Location and time of the study. The south of West Siberia, the central part of the Irtysh Plain, the period 60-90 years of the 20th century.

Methods. The quantitative soil status model, used in the study, is a set of probabilistic-statistical distributions of soil properties in soil horizons. Calculations and graphic analysis of information entropy and divergence of soil properties were performed.

Results. During the study period there was an increase in central values and a decrease in variability in the silt and physical clay content in the southern chernozems on the territory of the Irtysh plain in the upper 0-20 cm soil layer. The revealed changes occurred due to the restructuring of probability-statistical distributions of these indicators, which consisted in reducing the probabilities of the lower values. Similar trends, albeit less expressed, were also identified in 20-30 and 30-50 cm layers, but deeper in profile they were minimal. Changes in the probability-statistical distributions of silt and physical clay content occurred within the ranges of variation inherent to the studied lithological varieties.

Conclusions. To assess the condition and general changes in soils on a territory, it is necessary to use information characteristics. The obtained probabilistic-statistical distributions of silt and physical clay content represent the informational standards for these indicators of the soils of the Irtysh plain. They can be used for comparison with the results of past, current and future monitoring studies of soils in the studied and neighboring territories. The values of information entropy and divergence are scalar indicators for characterizing variability and transformations of probability-statistical distributions of soil properties.

Keywords: Haplic Chernozem; particle size distribution; soil memory; probabilistic distributions; information entropy; divergence

How to cite: Mikheeva I.V., Opleuhin A.A. Informational assessment of changes in silt and physical clay content in arable chernozems of the Irtysh plain // *The Journal of Soils and Environment*. 2022. 5(4). e186. DOI: [10.31251/pos.v5i4.186](https://doi.org/10.31251/pos.v5i4.186) (in Russian with English abstract).

REFERENCES

1. Baybekov R.F. *Effect of long-term application of fertilizers on the agroecological state of podzolic and chernozem soils of the European part of Russia*, Abstract of Dissertation ... Dr. of Agric. Sci. Moscow, 2003, 36 p. (in Russian)
2. Boldyreva V.E. *Principles of interpretation of granulometric composition of chernozems based on materials of soil data centers of Rostov Oblast*, Abstract of Dissertation ... Cand. of Biol. Sci. Rostov-on-Don, 2022, 23 p. (in Russian)
3. Eremin D.I. *Agrogenic transformation of leached chernozem in the Northern Trans-Urals*, Abstract of Dissertation ... Dr. of Biol. Sci. Tyumen, 2012, 35 p. (in Russian)
4. Karavaeva N.A. *Agrogenic soil memory*. In book: *Soil memory: soil as a memory of biosphere-geosphere-anthroposphere interactions* / Ed.: Targulyan V.O., Goryachkin S.V. Moscow: LKI Publ., 2008, p. 578–614. (in Russian)
5. Kenzhegulova S.O. *Changes in the properties of different types of soils of Western Siberia under the influence of long-term agricultural use*, Abstract of Dissertation ... Cand. of Agric. Sci. Barnaul, 2008, 15 p. (in Russian)
6. *Classification and diagnostics of Soils of the USSR* / Compiled by: V.V. Egorov, V.M. Friedland, E.N. Ivanova, N.N. Rozova, V.A. Nosin, T.A. Friev. Moscow: Kolos Publ., 1977, 224 p. (in Russian)
7. Kolmogorov A. N. *Information theory and theory of algorithms*. Moscow: Nauka Publ., 1987, 304 p. (in Russian)
8. Lemeshko B.Yu. *Statistical analysis of one-dimensional observations of random variables: A program system*. Novosibirsk: Novosibirsk State Technical University, 1995, 125 p. (in Russian)
9. Mikheeva I.V. Divergence of the probabilistic distributions of soil properties as a quantitative characteristic of the transformation of soil cover, *Siberian Herald of Agricultural Science*, 2009, Vol. 16, No. 2, p. 231–236. (in Russian)
10. Mikheeva I.V. Probabilistic-statistical and information assessment of contemporary processes in natural objects on the basis of data of soil monitoring, *Vestnik of the Siberian State University of Geosystems and Technologies*, 2017, Vol. 22, No. 4, p. 220–236. (in Russian)

11. Mikheeva I.V., Opleuhin A.A. 30 years' Changes of Probabilistic and Information Characteristics of the Humus Content in Southern Chernozems in Western Siberia, *Zhivye i biokosnye sistemy*, 2015, No. 13. (in Russian) URL: <http://www.jbks.ru/archive/issue-13/article-9>
12. Mikheeva I.V., Opleuhin A.A. Identification of probabilistic and statistical models of properties of ecological systems and their information assessment, *Vestnik of the Siberian State University of Geosystems and Technologies*, 2018, Vol. 23, No. 4, p. 226–248. (in Russian)
13. *All-Union Instruction on Soil Surveys and Large-Scale Land Use Maps*. Moscow: Kolos Publ., 1973. (in Russian)
14. *Soil memory: soil as a memory of biosphere-geosphere-anthroposphere interactions* / Ed.: Targulyan V.O., Goryachkin S.V. Moscow: LKI Publ., 2008, 692 p. (in Russian)
15. Panfilov V.P., Senkova L.A. Features of moisture behavior in southern light loamy chernozems and its availability to plants. In book: *Chernozems: properties and characteristics of irrigation*. Novosibirsk: Nauka Publ., 1988, p. 167–181. (in Russian)
16. Prangishvili I.V. *General System Regularities and Control Problems of Natural and Social Systems*. In book: *Synergetics and Control Problems*. Moscow: Fizmatlit Publ., 2004, p. 398–419. (in Russian)
17. Chelovechkova A.V. *The use of hydrophysical properties to characterize the soils of Kurgan region*. Diss. Cand. of Biol. Sci. Kurgan, 2021, 137 p. (in Russian)
18. Deng J. Probabilistic characterization of soil properties based on the maximum entropy method from fractional moments: Model development, case study, and application, *Reliability Engineering & System Safety*, 2022, Vol. 219, p. 108218. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2021.108218>
19. *IUSS Working Group WRB. World Reference Base for Soil Resources. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps*. World Soil Resources Reports No. 106. FAO, Rome, 2014, update 2015. 181 p.
20. Kuzyakov Y., Zamanian K. Reviews and syntheses: Agropedogenesis – humankind as the sixth soil-forming factor and attractors of agricultural soil degradation, *Biogeosciences*, 2019, Vol. 16, p. 4783–4803. <https://doi.org/10.5194/bg-16-4783-2019>
21. Lal R. Restoring Soil Quality to Mitigate Soil Degradation, *Sustainability*, 2015, Vol. 7 (5), p. 5875–5895. DOI:10.3390/su7055875
22. Liu Y.-L., Yao S.-H., Han X.-Z., Zhang B., Banwart S.A. Soil Mineralogy Changes With Different Agricultural Practices During 8-Year Soil Development From the Parent Material of a Mollisol, *Advances in Agronomy*, 2017, Vol. 142, Ch. 6, p. 143–179.
23. Mikheeva I.V. Changes in the probability distributions of particle size fractions in chestnut soils of the Kulunda steppe under the effect of natural and anthropogenic factors, *Eurasian Soil Science*, 2010, Vol. 43, No. 12, p. 1351–1361.
24. Mikheeva I.V., Kuzmina E.D. Statistical characteristics of soil particle-size composition formula, *Eurasian Soil Science*, 2000, Vol. 33, No. 7, p. 713–722.
25. Prigogine I. *Introduction to Thermodynamics of Irreversible Processes*. New York: Willey-Interscience, 199 p.
26. Smeck N.E., Runge E.C.A., Mackintosh E.E. *Dynamics and genetic modelling of soil systems*. In book: *Pedogenesis and soil Taxonomy*. New York: Elsevier, 1983, p. 51–81.
27. Targulian V.O., Bronnikova M.A. Soil memory: theoretical basics of the concept, its current state, and prospects for development, *Eurasian Soil Science*, 2019, Vol. 52, No. 3, p. 229–243. DOI: 10.1134/S1064229319030116

Received 15 September 2022

Accepted 03 November 2022

Published 21 November 2022

About the author(s):

Mikheeva Irina Victorovna – Doctor of Biological Sciences, Senior Researcher in the Laboratory of Soil Geography and Genesis in the Institute of Soil Science and Agrochemistry of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Novosibirsk, Russia); mikheeva@issa-siberia.ru; pulya80@ngs.ru

Opleuhin Alexey Alexandrovich – Candidate of Biological Sciences, Junior Researcher in the Laboratory of Soil Geography and Genesis in the Institute of Soil Science and Agrochemistry of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Novosibirsk, Russia); plybym@rambler.ru

The authors read and approved the final manuscript



The article is available under [Creative Commons Attribution 4.0 License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

**ТЕХНОГЕННАЯ РАДИОАКТИВНОСТЬ ПОЧВ В РАЙОНЕ МАЯКА «МОРЖОВСКИЙ»
(ОСТРОВ МОРЖОВЕЦ, АРХАНГЕЛЬСКАЯ ОБЛАСТЬ)**© 2022 А. В. Баженов , С. А. Игловский , Е. Ю. Яковлев 

Федеральный исследовательский центр комплексного изучения Арктики им. академика РАН Н.П. Лавёрова
УрО РАН (ФИЦКИА УрО РАН), Набережная Северной Двины, д.23, г. Архангельск, 163000, Россия.

E-mail: abv-2009@yandex.ru

Цель исследования: провести анализ техногенной радиоактивности почв в районе маяка «Моржовский» и его окрестностях на основе определения удельной активности радиоцезия (^{137}Cs).

Место и время проведения. Экспедиционные работы проведены в районе маяка «Моржовский» и его окрестностях (остров Моржовец, Архангельская область) летом 2022 года.

Методы. Всего было опробовано 26 точек из верхнего (0-5 см) слоя почв на территории маяка «Моржовский» и его окрестностях, из них 12 точек отобраны до глубины 20 см с интервалом отбора 0-5, 5-10 и 10-20 см. Также были отобраны образцы напочвенной растительности.

В лабораторных условиях почвенные пробы высушивали до воздушно-сухого состояния и помещали в сосуд Маринелли для измерения удельной активности ^{137}Cs методом гамма-спектрометрии. Регистрацию гамма-излучений от счетного образца почв, а также обработку спектров проводили с использованием программно-аппаратурного комплекса «Прогресс-гамма» ФВКМ.412131.002-03. Калибровку гамма-спектрометра по энергии для контроля за сохранностью параметров установки выполняли после каждого измерения с использованием комбинированного контрольного источника ОИСН-137-1 в сосуде Маринелли объемом 1 литр. Минимальное время экспонирования счетного образца – 3600 секунд. Однако в зависимости от активности пробы время экспонирования в отдельных образцах со слабой активностью увеличивали.

Основные результаты. На территории острова Моржовец распространены низменные приморские террасированные равнинные ландшафты с тундровой растительностью на торфяно-подбурх иллювиально-гумусовых (Gleyic Histic Entic Podzols), чередующихся с болотами и торфяно-болотными глеевыми почвами (Fibric Histosols (Gleyic)). Удельная активность ^{137}Cs в верхнем (0-5 см) слое, представляющем собой слабо разложившийся оторфованный горизонт, изменяется от 9,4 до 144,5 Бк/кг в торфяно-подбурх иллювиально-гумусовых, от 12,2 до 139,4 Бк/кг – в торфяно-болотных глеевых почвах. С глубиной в иллювиальных и торфяных горизонтах почв активность ^{137}Cs резко снижается и достигает предельно измеряемых гамма-спектрометром величин – менее 3 Бк/кг. Сравнительный анализ показал, что активность ^{137}Cs в почвах разных районов Западного сектора Арктики снижается с востока на запад, с удалением от ядерного полигона на Новой Земле: от 80,2 Бк/кг (Архипелаг Новая Земля) и 87 Бк/кг (Большеземельская тундра) до 19,2 Бк/кг (остров Шпицберген).

Заключение. Данные по распределению активности ^{137}Cs в почвах, представленных на острове Моржовец, указывают на устойчивое закрепление элемента в верхней органической части почвенного профиля до глубины 5 см, что является первичным биогеохимическим барьером. Растительность не накапливает техногенной радиоактивности. В пространственном отношении распределение ^{137}Cs в верхнем (0-5 см) слое почв в районе маяка «Моржовский» представляет собой мозаичную картину. Максимальные значения ^{137}Cs были определены как в торфяно-подбурх иллювиально-гумусовых, так и в торфяно-болотных глеевых почвах.

Ключевые слова: техногенная радиоактивность; торфяно-подбурх иллювиально-гумусовый (Gleyic Histic Entic Podzol); торфяно-болотная глеевая почва (Fibric Histosols (Gleyic)); ^{137}Cs ; остров Моржовец; маяк «Моржовский»; Архангельская область

Цитирование: Баженов А.В., Игловский С.А., Э.Ю. Яковлев. Техногенная радиоактивность почв в районе маяка «Моржовский» (остров Моржовец, Архангельская область) // Почвы и окружающая среда. 2022. Том 5. № 4. с193. DOI: [10.31251/pos.v5i4.193](https://doi.org/10.31251/pos.v5i4.193)

ВВЕДЕНИЕ

На основании данных А.И. Чомчоева (1993), регулярные испытания ядерного оружия неизменно вызывают экологически неблагоприятные изменения в окружающей среде, превращая громадные пространства в опасные районы. В дальнейшем распределение, динамика,

интенсивность и направленность миграции радиоцезия (^{137}Cs) в природной среде уже определяется совокупностью природных условий, в которые он попадает: геоморфологическим строением местности, типом растительности, физико-химическими свойствами почв и их генетическим строением, гидрологическими и климатическими (циркуляция атмосферы и количество выпавших осадков) условиями, а также свойствами самого ^{137}Cs , формами его поступления и нахождения в почвах (Обухова, 1993; Павлоцкая и др., 1989).

Крупномасштабные мониторинговые работы после аварии на Чернобыльской АЭС показали, что авария привела к загрязнению очень больших территорий почвенно-растительного покрова, а также сельскохозяйственных и естественных угодий, лесов и водоёмов (Воздействие..., 1996). Об этом же свидетельствуют многочисленные работы, опубликованные в послечернобыльский период, охватившие широкий спектр радиоэкологических проблем. Функционирование в бывшем СССР двух ядерных полигонов – Семипалатинского и Новоземельского (Северного), также явилось причиной техногенного радиоактивного загрязнения территории нескольких регионов страны. Рядом авторов (Иванов и др., 1997; Логачев, 1998) была продемонстрирована схема направления движения радиоактивных облаков, которые могли оказать наибольшее влияние на масштабы и степень радиоактивного загрязнения различных регионов СССР. Данная схема показала, что преобладающими направлениями движения радиоактивных облаков после атмосферных ядерных испытаний были северное, восточное и южное. По мнению учёных, вся «грязь», выпавшая на территории России после испытаний ядерного оружия на Северном полигоне, сформировала две группы максимумов, т.е. «пятен» радиоактивных выпадений: первая – в акватории Карского моря, вторая – между городами Якутск и Верхоянск (Иванов и др., 1997; Логачев, 1998).

Наши исследования (Юдахин и др., 2000) выявили ещё одно такое «пятно» радиоактивного загрязнения, но уже на Европейском Севере России. Предположительно при столкновении радиоактивных облаков с континентальными воздушными массами на границе океан-континент часть из них меняло своё направление, и выпадения происходили на побережье Баренцева моря, полуострове Канин и далее на запад. С удалением от источника взрывов, ^{137}Cs поступал в почвенный покров уже с атмосферными осадками и в результате глобальных выпадений. Работы по изучению техногенной радиоактивности почв континентальной части территории Архангельской области показали, что с момента интенсивного поступления ^{137}Cs (начало ядерных испытаний) и до настоящего времени максимальная его активность удерживается в лесной подстилке, дернине и гумусовом горизонте естественных почв (Баженов, 2001).

Актуальность и новизна изучения техногенной радиоактивности почв в районе маяка «Моржовский» и его окрестностях (остров Моржовец, Архангельская область) заключались в том, что на данной территории такие работы ранее не проводили. Цель исследования – провести анализ техногенной радиоактивности почв в районе маяка «Моржовский» и его окрестностях на основе определения удельной активности ^{137}Cs .

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Моржовец – остров в Белом море у входа в Мезенскую губу. Административно он входит в состав Мезенского района Архангельской области. Форма острова овальная, несколько суживающаяся к юго-востоку. Длина острова составляет 15 км, ширина – около 7 км в средней части, площадь – 110 км² и в результате размыва морем постепенно уменьшается. Остров изрезан небольшими речками, имеется около 400 пресноводных озёр. Наиболее крупные реки – Золотуха, Литовка, Рыбная. На северо-западной оконечности острова установлен маяк «Моржовский». Остров имеет платформенную структуру с глубиной залегания докембрийского фундамента до 1500 м, сложенную рыхлыми песчано-глинистыми отложениями с прослойками ископаемых льдов. В рельефе преобладают морские равнины, сложенные суглинками, супесями и песками валунными. Берега крутые и обрывистые, местами достигают высоты 20 метров (рис. 1). Распространены низменные приморские террасированные равнинные ландшафты с тундровой растительностью. Почвенный покров в основном представлен торфяно-подбурами иллювиально-гумусовыми (Gleyic Histic Entic Podzols) на возвышенных и равнинных участках, чередующийся с торфяно-болотными глеевыми почвами (Fibric Histosols (Gleyic)) (рис. 2).



Рисунок 1. Ландшафты с термокарстовыми озерами и береговыми обнажениями торфяников с участками перекрытых снежников, подстилаемые песками на острове Моржовец.

А

Б



Рисунок 2. Типичные почвы острова Моржовец: А – торфяно-болотная глеевая (Fibric Histosol (Gleyic)), Б – торфяно-подбур иллювиально-гумусовый (Gleyic Histic Entic Podzol).

На острове Моржовец преобладают ерниково-багульниковые, ерниково-толокнянково-водяниковые и толокнянково-лишайниковые тундры с участками древовидной и кустарничковой формой берёзы и ивы. Среди болот встречаются пушицево-морошково-сфагновые и багульниково-морошково-сфагновые, на возвышенностях – небольшие открытые песчаные и щебневые участки (Атлас Архангельской..., 1976).

Отбор, хранение и транспортировку почвенных проб осуществляли в соответствии с ГОСТ 17.4.4.02-2017.

В лабораторных условиях пробы высушивали до воздушно-сухого состояния в сушильном шкафу при температуре 105°С до постоянной массы. После взвешивания пробы помещали в сосуд Маринелли для измерения удельной активности ¹³⁷Cs методом гамма-спектрометрии. Регистрация гамма-излучений от счетного образца почв, а также обработку спектров проводили с использованием программно-аппаратурного комплекса «Прогресс-гамма» ФВКМ.412131.002-03. Калибровку гамма-спектрометра по энергии для контроля за сохранностью параметров установки проводили после каждого измерения с использованием комбинированного контрольного источника ОИСН-137-1 в сосуде Маринелли. Минимальное время экспонирования счетного образца – 3600 секунд. Однако в зависимости от активности пробы время экспонирования в отдельных образцах со слабой активностью было увеличено (Методика..., 2016).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Летом 2022 года сотрудники лаборатории экологической радиологии Института геодинамики и геологии ФИЦКИА им. Н.П. Лаверова УрО РАН провели экспедиционные работы по исследованию техногенной радиоактивности почв на территории маяка «Моржовский» и его окрестностях (о. Моржовец, Мезенский район Архангельской области). Всего было опробовано 26 точек из верхнего (0–5 см) слоя почв, из них 12 точек отобраны до глубины 20 см с интервалом отбора 0–5, 5–10 и 10–20 см. Схема отбора и пространственное распределение ^{137}Cs показаны на рисунке 3. Также были отобраны образцы напочвенной растительности (ягель, водяника, карликовая берёза, багульник, хвощ).

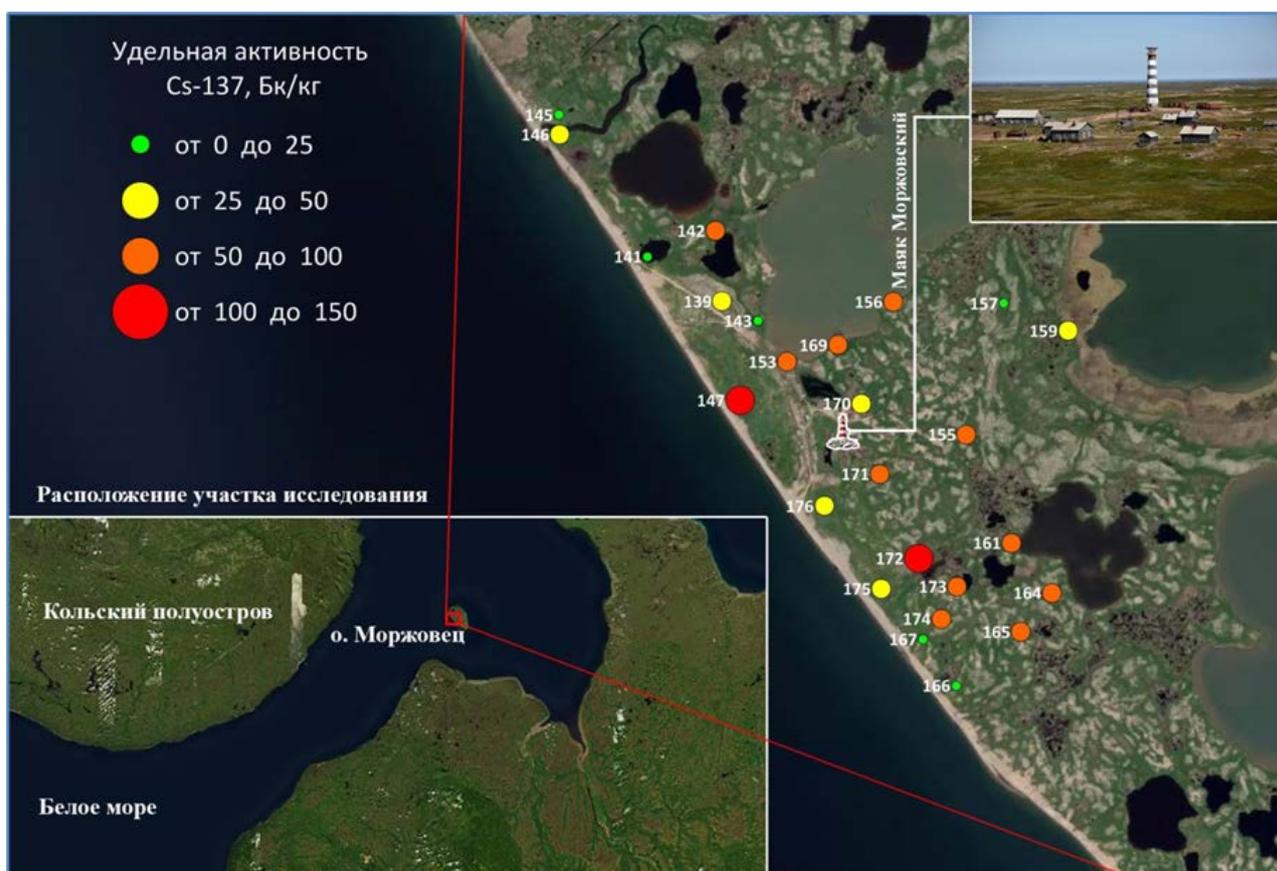


Рисунок 3. Схема мест отбора проб почв и пространственное распределение в них ^{137}Cs .

Максимальное содержание ^{137}Cs сосредоточено в верхней части почвенного профиля до глубины 5 см, независимо от типа почвы. Для торфяно-подбуров иллювиально-гумусовых эти значения варьировали от 6,1 до 144,5 Бк/кг, для торфяно-болотных глеевых почв – от 12,2 до 139,4 Бк/кг (табл. 1). Вниз по почвенному профилю активность ^{137}Cs резко снижалась и достигала предельно измеряемых гамма-спектрометром величин – менее 3 Бк/кг. При измерении активности ^{137}Cs в напочвенной растительности (ягель, водяника, карликовая берёза, багульник, хвощ) было установлено, что растения его не накапливают. В пространственном отношении распределение ^{137}Cs представляло собой мозаичную картину. Максимальные значения ^{137}Cs были определены как в торфяно-подбурях иллювиально-гумусовых (точка 172), так и в торфяно-болотных глеевых почвах (точка 147) (см. рис. 3, табл. 1).

Таблица 1

Удельная активность ^{137}Cs в верхнем (0–5 см) слое почв на территории маяка «Моржовский» и его окрестностях (результаты отбора 2022 г.)

№ точек	Координаты		Удельная активность ^{137}Cs , Бк/кг
	северная широта	восточная долгота	
139	66,43641	42,27774	43,4 ± 8,1
141	66,43726	42,27423	20,7 ± 4,1
142	66,43775	42,27743	50,4 ± 9,3
143	66,43604	42,27942	9,4 ± 2,6
145	66,43995	42,27003	14,1 ± 3,3
146	66,43958	42,27008	32,8 ± 6,3
147	66,43453	42,27859	139,4 ± 24,0
149	66,43387	42,37562	12,2 ± 4,0
153	66,43526	42,2708	63,6 ± 10,2
155	66,43388	42,28927	96,0 ± 30,4
156	66,4364	42,28581	68,8 ± 12,4
157	66,43637	42,29102	20,5 ± 6,1
159	66,43585	42,29406	26,9 ± 8,0
161	66,43182	42,2914	89,6 ± 13,7
164	66,43087	42,2933	63,3 ± 10,6
165	66,43013	42,29184	53,9 ± 9,0
166	66,42911	42,28878	24,8 ± 5,7
167	66,42999	42,28721	21,9 ± 5,2
169	66,43558	42,2832	56,1 ± 10,5
170	66,43447	42,28431	29,5 ± 5,4
171	66,43313	42,28518	51,4 ± 8,2
172	66,43153	42,28703	144,5 ± 21,1
173	66,43099	42,28884	75,6 ± 12,1
174	66,43038	42,28808	85,4 ± 13,2
175	66,43095	42,28526	25,8 ± 6,6
176	66,43252	42,28256	33,1 ± 6,2

Ранее сотрудниками лаборатории экологической радиологии Института геодинамики и геологии ФИЦКИА им. Н.П. Лаврова УрО РАН были проведены экспедиционные работы с отбором проб и измерением активности ^{137}Cs в верхнем (0–5 см) слое почв разных районов Западного сектора Арктики (табл. 2, рис. 4).

Таблица 2

Активность ^{137}Cs в верхнем (0–5 см) слое почв разных районов Западного сектора Арктики

Районы отбора (количество проб)	Удельная активность ^{137}Cs , Бк/кг		
	Минимум	Максимум	Среднее
о. Шпицберген (11)	5,3	49,5	19,5
Архипелаг Земля Франца-Иосифа (15)	12,0	171,9	49,8
П-ов Канин (16)	3,1	295,0	80,2
Большеземельская тундра (Ненецкий АО) (11)	28,5	124,2	87,0
Пос. Малые Кармакулы (залив Моллера, архипелаг Новая Земля) (45)	3,5	159,0	81,2
о. Моржовец (26)	9,4	144,5	52

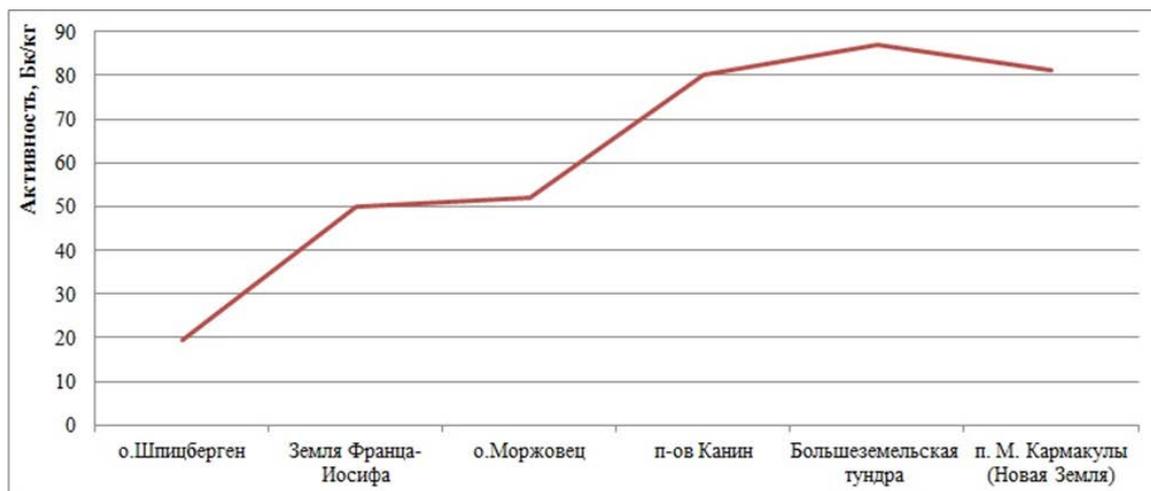


Рисунок 4. Изменение активности ^{137}Cs в верхнем (0–5 см) слое почв разных районов Западного сектора Арктики (средние значения).

Выявлено, что в районах Западного сектора Арктики активность ^{137}Cs снижается с востока на запад, с удалением от ядерного полигона на Новой Земле (см. рис. 4).

ВЫВОДЫ

1. Данные по распределению активности ^{137}Cs в торфяно-подбурях иллювиально-гумусовых и торфяно-болотных глеевых почвах на острове Моржовец указывают на его устойчивое закрепление в верхней органической части почвенного профиля до глубины 5 см. В нижележащих иллювиальных и торфяных горизонтах активность ^{137}Cs резко снижается и достигает предельно измеряемых гамма-спектрометром величин – менее 3 Бк/кг. Растительность (ягель, водяника, карликовая берёза, багульник, хвощ) не накапливает техногенной радиоактивности.

2. В пространственном отношении распределение ^{137}Cs в верхнем (0–5 см) слое почв в районе маяка «Моржовский» представляет собой мозаичную картину. Максимальные значения ^{137}Cs были определены как в торфяно-подбурях иллювиально-гумусовых, так и в торфяно-болотных глеевых почвах.

3. Активность ^{137}Cs в верхнем (0–5 см) слое почв разных районов Западного сектора Арктики снижается с востока на запад, с удалением от ядерного полигона на Новой Земле: от 80,2 Бк/кг (Архипелаг Новая Земля) и 87 Бк/кг (Большеземельская тундра) до 19,2 Бк/кг (о. Шпицберген).

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность командиру ВЧ 90283, капитану 2 ранга Пиеву Дмитрию Сергеевичу и начальнику отделения Маячной службы ВЧ 90384 Овсянникову Владимиру Валентиновичу за помощь в проведении экспедиционных работ.

ФИНАНСОВАЯ ПОДДЕРЖКА

Исследования выполнены при финансовой поддержке субсидии Министерства науки и высшего образования Российской Федерации на выполнение темы государственного задания «Особенности миграции элементов и их изотопов в абиотических компонентах окружающей среды Западного сектора Российской Арктики в условиях климатических и техногенных изменений» № 122011300333-1.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Атлас Архангельской области* / Под ред. А.Г. Исаченко, Н.А. Моргуновой, Н.М. Терехова и др. Москва: Изд-во Главное управление геодезии и картографии при совете министров СССР, 1976. 72 с.
2. Баженов А.В. *Цезий-137 в почвах Архангельской области*. Автореф. дисс. ... к. геол.-минер. н. Москва.: Ин-т геоэкологии РАН, 2001. 23 с.
3. *Воздействие радиоактивного загрязнения на наземные экосистемы в зоне аварии на Чернобыльской АЭС (1986-1996 гг.)* // Труды Коми научного центра УрО РАН, № 145. В 2 томах. Том 1. Под ред. А.И. Таскаева. Сыктывкар, 1996. С. 3.

4. ГОСТ 17.4.4.02-2017. Охрана природы. Почвы. Методы отбора и подготовки проб для химического, бактериологического, гельминтологического анализа. Москва. Стандартинформ, 2018. 9 с.
5. Иванов А.Б., Красилов Г.А., Логачев В.А., Матущенко А.М., Сафронов В.Г. *Северный полигон: Новая Земля. Радиоэкологические последствия ядерных испытаний*. Москва, 1997. 85 с.
6. Логачев В.А. *Возможные дозы облучения населения на территории Российской Федерации вследствие проведения ядерных испытаний на Северном полигоне* // Новая Земля. Природа. История. Археология. Культура. Книга 2. Ч. 1. Культурное наследие. Радиоэкология. Труды морской комплексной экспедиции. Под общей ред. П.В. Боярского. Москва, 1998. С. 240–258.
7. *Методика измерения активности радионуклидов с использованием сцинтилляционного гамма-спектрометра с программным обеспечением «Прогресс»*. Москва: ООО НТЦ «Амплитуда», 2016. 12 с.
8. Обухова З.В. *Пространственная корреляция между распределением сумм осадков и цезия-137* // Изотопы в гидросфере. Тезисы докладов 4-го Международного симпозиума (Пятигорск, 18-21 мая 1993 г.). Москва, 1993. С. 143–144.
9. Павлоцкая Ф.И., Коробова Е.М., Горяченкова Т.А., Казинская И.Е. *Ландшафтно-геохимические исследования поведения искусственных радионуклидов* // Принципы и методы ландшафтно-геохимических исследований миграции радионуклидов. Тезисы докладов Всесоюзного совещания (Суздаль, 13-17 ноября 1989 г.). Москва, 1989. С. 44.
10. Чомчоев А.И. *Обзор атмосферных, подземных ядерных взрывов в мирных, военных целях и их влияние на окружающую среду* // Радиационное загрязнение территории республики Саха (Якутия): Проблемы радиационной безопасности. Тезисы докладов I Республиканской научно-практической конференции (Якутск, 14-15 января 1993 г.). Якутск, 1993. С. 18–28.
11. Юдахин Ф.Н., Баженов А.В., Киселев Г.П. *Закономерности распределения радиоцезия в почвах Архангельской области* // Север: Экология. Сборник научных трудов. Екатеринбург, 2000. С. 7–18.

Поступила в редакцию 23.11.2022

Принята 05.12.2022

Опубликована 11.12.2022

Сведения об авторах:

Баженов Александр Викторович – кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник лаборатории экологической радиологии Института геодинамики и геологии Федерального исследовательского центра комплексного изучения Арктики РАН (г. Архангельск, Россия); abv-2009@yandex.ru

Игловский Станислав Анатольевич – кандидат географических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории экологической радиологии Института геодинамики и геологии Федерального исследовательского центра комплексного изучения Арктики РАН (г. Архангельск, Россия); iglovskys@mail.ru

Яковлев Евгений Юрьевич – кандидат геолого-минералогических наук, заведующий лабораторией экологической радиологии Института геодинамики и геологии Федерального исследовательского центра комплексного изучения Арктики Российской академии наук (Архангельск, Россия); yakov24lev99@mail.ru

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.



Статья доступна по лицензии [Creative Commons Attribution 4.0 License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

SOIL TECHNOGENIC RADIOACTIVITY IN THE VICINITY OF THE MORZHOVETS LIGHTHOUSE (THE MORZHOVSKY ISLAND, ARCHANGELSK REGION)

© 2022 A. V. Bazhenov , S. A. Iglovsky , E. Yu. Yakovlev 

N. Laverov Federal Center for Integrated Arctic Research of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (FECIAR UrB RAS), Arkhangelsk, Russia. E-mail: abv-2009@yandex.ru

The aim of the study was to assess soil technogenic radioactivity in the vicinity of the Morzhovets Lighthouse and surrounding areas by measuring radio caesium (¹³⁷Cs) specific activity.

Location and time of the study. Field work was performed in the area around the Morzhovets Lighthouse (the Morzhovets Island, Archangelsk region) in summer 2022.

Methods. Soil samples were collected at 26 sites from the 0-5 cm layer, of which at 12 sites soil samples were collected also from 5-10 u 10-20 cm layers. Aboveground phytomass was sampled as well. In the laboratory the soil samples were air-dried and placed in the Marinelli vessel for measuring ^{137}Cs specific activity by gamma-spectrometry. Registration of the gamma-radiation from the measured soil sample, as well as processing of the obtained spectra were performed using the Progress-gamma software and hardware complex FVKM.412131.002-03. The energy calibration of the gamma spectrometer to control the safety of the setup parameters was carried out after each measurement using a combined control source OISN-137-1 in a Marinelli vessel. The minimal exposure time of the study sample was 3600 sec; however, the time was increased for some samples with low activity.

Results. The territory of the Morzhovets Island is occupied by the lowland seaside terraced plane landscapes with tundra vegetation on the illuvial-humus peaty podbur, alternating with mires, and gleyic peat-bog soils. Caesium specific radioactivity in the top 0-5 cm soil layer, represented by poorly decomposed peat horizon, was found to vary from 9.4 to 144.5 Bq/kg in the illuvial-humus peaty podbur (Gleyic Histic Entic Podzol) and from 12.2 to 139.4 Bq/kg in the gleyic peat-bog soils (Fibric Histosols (Gleyic)). The radio caesium specific activity was shown to decrease sharply with soil depth, reaching the 3 Bq/kg detection limit of the gamma-spectrometer. Comparative analysis of the data showed that in the West Arctic sector ^{137}Cs specific activity decreases from the east to the west, with increasing distance from the Novaya Zemlya, from 80.2 Bq/kg (the Novaya Zemlya Archipelago) and 80.7 Bq/kg (Bolshezemelskaya Tundra) to 19.2 Bq/kg (the Svalbard Island).

Conclusions. The ^{137}Cs distribution in soil of the Morzhovets Island showed the persistent fixation of the element by the upper 5 cm-thick organic part of the soil profile, representing the primary biogeochemical barrier. The vegetation does not accumulate technogenic radioactivity. Overall, the ^{137}Cs distribution in soils around the Morzhovsky Lighthouse displays a medley pattern. The maximal ^{137}Cs specific activity values were measured both in the illuvial-humus peaty podbur and gleyic peat-bog soils.

Key words: technogenic radioactivity; illuvial-humus peaty podbur (Gleyic Histic Entic Podzol); gleyic peat-bog soil (Fibric Histosols (Gleyic)); ^{137}Cs ; Morzhovets Island; Morzhovets Lighthouse; Arkhangelsk region

How to cite: Bazhenov A.V., Iglovsky S.A., Yakovlev E.Yu. Soil technogenic radioactivity in the vicinity of the Morzhovets Lighthouse (the Morzhovets Island, Archangelsk region) // *The Journal of Soils and Environment*. 2022. 5(4). e193. DOI: [10.31251/pos.v5i4.193](https://doi.org/10.31251/pos.v5i4.193) (in Russian with English abstract).

REFERENCES

1. *Atlas of the Arkhangelsk Region* / Edited by A.G. Isachenko, N.A. Morgunova, N.M. Terekhov et al. Moscow: Chief Directorate of Geodesy and Cartography of the USSR Council of Ministers, 1976, 72 p. (in Russian)
2. Bazhenov A.V. *Cesium-137 in soils of Arkhangelsk Region*, Abstract of Dissertation ... Cand. of Geology and Mineralogy Sci. Moscow: Institute of Geoecology RAS, 2001, 23 p. (in Russian)
3. *Impact of radioactive contamination on terrestrial ecosystems in the zone of the Chernobyl accident (1986-1996)*. In book: Proceedings of the Komi Scientific Center of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, No. 145. In two volumes. Vol. 1. Under ed. of A. I. Taskaeva. Syktyvkar, 1996, p. 3. (in Russian)
4. *GOST 17.4.4.02-2017*. Nature protection. Soils. Methods for sampling and preparation of soil for chemical, bacteriological, helminthological analysis. Moscow: Standardinform, 2018, 9 p. (in Russian)
5. Ivanov A.B., Krasilov G.A., Logachev V.A., Matushchenko A.M., Safronov V.G. *Northern Test Site: Novaya Zemlya. Radioecological Consequences of Nuclear Tests*. Moscow, 1997, 85 p. (in Russian)
6. Logachev V.A. *Possible Doses of Population Exposure in the Russian Federation as a Result of Nuclear Testing at the Northern Test Site*. In book: Novaya Zemlya. Nature. History. Archaeology. Culture. P. 1. Cultural Heritage. Radioecology. Works of the Marine Complex Expedition. Under the editorship of P.V. Boyarsky Moscow, 1998, p. 240–258. (in Russian)
7. *Methodology of radionuclide activity measurement using scintillation gamma spectrometer with software "Progress"*. Moscow: OOO Scientific and Technical Center "Amplitude", 2016, 12 p. (in Russian)
8. Obukhova Z.V. *Spatial correlation between distribution of precipitation sums and cesium-137*. In book: Isotopes in hydrosphere. Theses of reports of the 4th International Symposium (Pyatigorsk, 18-21 May, 1993). Moscow, 1993, p. 143–144. (in Russian)
9. Pavlotskaya F.I., Korobova E.M., Goryachenkova T.A., Kazinskaya I.E. *Landscape-geochemical studies of artificial radionuclides behavior*. In book: Principles and methods of landscape-geochemical studies of radionuclides migration. Theses of reports of All Union meeting (Suzdal, 13-17 November, 1989). Moscow, 1989, p. 44. (in Russian)
10. Chomchoev A.I. *Review of Atmospheric, Underground Nuclear Explosions for Peaceful and Military Purposes and Their Impact on the Environment*. In book: Radiation Contamination of the Territory of the Republic of Sakha (Yakutia): Problems of Radiation Safety. Theses of the 1st Republic Scientific-Practical Conference (Yakutsk, 14-15 January, 1993). Yakutsk, 1993, p. 18–28. (in Russian)

11. Yudakhin F.N., Bazhenov A.V., Kiselev G.P. *Regularities of radiocaesium distribution in soils of Arkhangelsk Region*. In book: North: Ecology. Collection of scientific papers. Yekaterinburg, 2000, p. 7–18. (in Russian)

Received 23 November 2022

Accepted 05 December 2022

Published 11 December 2022

About the authors:

Bazhenov Aleksandr Viktorovich – Candidate of Geological and Mineralogical Sciences, Senior Researcher, Laboratory of Ecological Radiology, Institute of Geodynamics and Geology, Federal Research Center for Comprehensive Study of the Arctic, Russian Academy of Sciences (Arkhangelsk, Russia); abv-2009@yandex.ru

Iglovsky Stanislav Anatolyevich – Candidate of Geographical Sciences, Leading Researcher, Laboratory of Ecological Radiology, Institute of Geodynamics and Geology, Federal Research Center for Comprehensive Study of the Arctic, Russian Academy of Sciences (Arkhangelsk, Russia); iglovskys@mail.ru

Yakovlev Evgeniy Yurievich – Candidate of Geological and Mineralogical Sciences, Head of the Laboratory of Ecological Radiology of the Institute of Geodynamics and Geology of the Federal Research Center for Comprehensive Study of the Arctic of the Russian Academy of Sciences (Arkhangelsk, Russia); yakov24lev99@mail.ru

The authors read and approved the final manuscript



The article is available under [Creative Commons Attribution 4.0 License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)



ВЛИЯНИЕ КОЛЕБАНИЙ УРОВНЯ ГРУНТОВЫХ ВОД НА МЕЛИОРИРОВАННЫЕ СОЛОНЦЫ СЕВЕРНОЙ ЛЕСОСТЕПИ БАРАБИНСКОЙ НИЗМЕННОСТИ

© 2022 Н. В. Елизаров , В. В. Попов 

ФГБУН Институт почвоведения и агрохимии СО РАН, проспект Академика Лаврентьева, 8/2, г. Новосибирск, 630090, Россия. E-mail: elizarov@issa-siberia.ru

Цель исследования: определение уровня и химический состав почвенно-грунтовых вод и их влияния на свойства подпитываемых почв.

Место и время проведения. Северная лесостепь Барабинской низменности (Чулымский и Чановский район Новосибирской области) 2011–2021 гг.

Методы. Определение уровня залегания и отбор образцов грунтовых вод на экспериментальных участках (с химической мелиорацией гипсованием и агробиологической мелиорацией путем разрушения солонцового горизонта в сочетании с посевом солевыносливых культур) проводили во временных скважинах. В лабораторных условиях исследовали химический состав почвенно-грунтовых вод и катионно-анионный состав водной вытяжки почв.

Основные результаты. Выявлены изменения уровня стояния грунтовых вод и их минерализованности. После подъема уровня грунтовых вод в профиле почв произошло накопление легкорастворимых солей, насыщение почвенно-поглощающего комплекса обменным натрием, восстановление солонцового горизонта. В солонцах средних и мелких, мелиорированных агробиологическим методом при залегании грунтовых вод на уровне 240–250 см в 2021 г. зафиксировано засоление только нижней части профиля (35–100 см), тогда как в контрольном варианте произошло засоление по всему метровому профилю.

Заключение. На большей части Барабинской низменности капиллярная кайма грунтовых вод постоянно или периодически присутствует в профиле почв. В условиях увеличения увлажнения территории диагностируется развитие деградиционных процессов, таких как вторичное засоление и осолонцевание почв. В химически мелиорированных корковых солонцах, периодически подпитываемых грунтовыми водами до глубины 50 см, сохранялся мелиоративный эффект на протяжении более 30 лет, после чего произошло постепенное вторичное засоление профиля и накопление обменного натрия в почвенно-поглощающем комплексе. Таким образом, на обоих участках в последнее десятилетие наблюдается подъем грунтовых вод, который приводит к вторичному засолению и осолонцеванию мелиорированных почв. Химическая мелиорация не только улучшила свойства почвы, но и показала высокую устойчивость своего действия при вторичном засолении профиля грунтовыми водами. Мелиорирование солонцов агробиологическим методом также представляется перспективным для замедления ухудшения качества почв и поддержания плодородия.

Ключевые слова: грунтовые воды; почвенно-поглощающий комплекс; осолонцевание; засоление; Барабинская низменность; Западная Сибирь

Цитирование: Елизаров Н.В., Попов В.В. Влияние колебаний уровня грунтовых вод на мелиорированные солонцы северной лесостепи Барабинской низменности // Почвы и окружающая среда. 2022. Том 5. № 4. e190. DOI: [10.31251/pos.v5i4.190](https://doi.org/10.31251/pos.v5i4.190)

ВВЕДЕНИЕ

Барабинская низменность имеет ряд особенностей, которые обуславливают развитие пестрого почвенного покрова территории. Слабая дренированность, большое количество озер и болот, а также близкое залегание почвенно-грунтовых вод являются характерными особенностями Барабы. Уровень грунтовых вод изменяется в зависимости от увлажненности территории. Климат исследуемой территории резко континентальный, отличается чередованием сухих и влажных периодов продолжительностью 11, 32, 80–90 и 1800–1900 лет (Левина, Орлова, 1993; Riedel et al., 2011). Довольно ясно прослеживается 32-летний цикл, который отражается в изменении уровней озер и водности рек (Анопченко, Якутин, 2013; Krivonogov et al., 2015; Song et al., 2015). Происходит чередование многоснежных и дождливых периодов длительностью 3–5 лет с малоснежными и засушливыми (Zhilich et al., 2014, 2015). Во влажные периоды вследствие увеличения зимнего влагозапаса происходит переувлажнение и подтопление

сельскохозяйственных угодий, особенно в пониженных элементах рельефа (Днепровская, Яценко, 2018). Питание грунтовых вод атмосферными осадками происходит через колочные западины и межгрядные понижения, которые являются аккумуляторами стоковых вод. Рельеф Барабинской низменности гривно-равнинный, что усложняет мелиоративные мероприятия на местности, так как межгрядные понижения в большинстве своем не имеют стока и практически все имеют признаки заболоченности или засоления. На гривах, в условиях периодического переувлажнения, в микрозападинах формируются солоды и осолоделые почвы, на которых произрастает древесная растительность, представленная, в основном, березовыми или березово-осиновыми колками способствующими дополнительному снегозадержанию и уменьшению испаряемости. В мезопонижениях формируются заболоченные солоды, которые, в дальнейшем, могут служить дном рямов. В настоящее время, болота, сформировавшиеся таким образом встречаются в Барабинском, Убинском и Чулымском районах (Убинский рям, Кожурлинский рям и др.). Засоление почв особенно ярко выражено в приболотном поясе, где грунтовые воды имеют повышенную степень минерализации.

Близкое залегание минерализованных грунтовых вод и плохая дренированность территории обусловили возникновение болотных и лугово-болотных почв, различной степени засоления (Елизаров, 2015). В центральной части Барабинской низменности они занимают межгрядные понижения и периферию озер. Эти почвы холодные, по всему профилю содержат токсичные для растений закисные соединения. В естественном немелиорированном состоянии используются под сенокосы и пастбища (Добротворская и др., 2019).

Осушительные каналы, созданные во время сельскохозяйственного освоения Барабы, не только позволили ввести в пашню огромные массивы плодородных земель, но и открыли доступ к обширным кормовым угодьям, что вывело отрасль животноводства Сибири на новый уровень. Но после сокращения финансирования предприятий мелиоративных систем и их передачи на баланс сельхозпредприятий осушительные каналы перестали поддерживаться в надлежащем состоянии. Произошло заиливание, зарастание каналов, что привело к потере их пропускной способности (Кирейчева и др., 2009).

В настоящее время фиксируется подъем уровня минерализованных грунтовых вод в восточной части Барабинской низменности (Елизаров, Попов, 2020). Избыточное увлажнение слабо дренированной территории, некоторые области которой не имеют стока вызывает такие деграционные процессы, как осолонцевание, осолодение и засоление почв

Цель исследований – мониторинг состояния почвенно-грунтовых вод и подпитываемых ими почв северной лесостепи Барабинской низменности.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследования проведены в лесостепной зоне Барабинской равнины: Чулымский и Чановский районы Новосибирской области (НСО) (рис. 1).



Рисунок 1. Участки исследований в Чулымском (1) и Чановском (2) районах Новосибирской области (НСО).

Первый участок исследований расположен в Чулымском районе НСО (55.080833° с.ш. и 81.206667° в.д., высота 152 м над уровнем моря) на полого-увалистой равнине с ложинообразными заболоченными понижениями, вытянутыми с северо-востока на юго-запад, в

направлении общего уклона. В почвенном покрове преобладают солонцы корковые. Материнские породы представлены четвертичными средними суглинками с редкими прослоями песка и супеси.

Наблюдения за уровнем залегания и солевым составом грунтовых вод проводили на опыте по изучению химической мелиорации солонцов ежегодно с 1984 по 1994 гг. сотрудниками СибНИИЗиХ СФНЦА РАН. С 2006 по 2014 гг. исследования продолжены коллективом кафедры почвоведения и агрохимии НГАУ, с 2014 г. – сотрудниками лаборатории географии и генезиса почв ИПА СО РАН. В микроделяночном опыте исследовалось влияние внесения различных доз гипса в профиль солонца коркового.

Второй участок расположен в Чановском районе НСО (55.388739° с.ш. и 76.927461 ° в.д., высота 107 м над уровнем моря) на опытном поле СибНИИ Кормов СФНЦА РАН. Определение уровня залегания грунтовых вод производились в 1985 г. при закладке опыта по изучению действия агробиологической мелиорации солонцов. Агробиологический метод мелиорации включает в себя агротехнические приемы разрушения солонцового горизонта в сочетании с посевом солевыносливых культур. С 2006 по 2014 гг. на опыте провели залужение, с 2014 г. деланки продолжили обрабатывать. В 2011, 2014 и 2017 гг. наблюдения за уровнем залегания и влиянием почвенно-грунтовых вод на профиль почв проводили авторским коллективом ИПА СО РАН.

Химический состав почвенно-грунтовых вод и состав водной вытяжки почв определяли по ГОСТ 26423-85; 26428-85.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Погодные условия за период с 2006 по 2021 гг. характеризовались нормальным и повышенным увлажнением; отмечен тренд увеличения увлажненности территории по данным метеостанций. Резко выделяются избыточным увлажнением погодные условия 2013 года (715 мм при норме 350 мм) на участке в Чулымском районе НСО, причем половина осадков этого года выпала за три летних месяца (рис. 2).

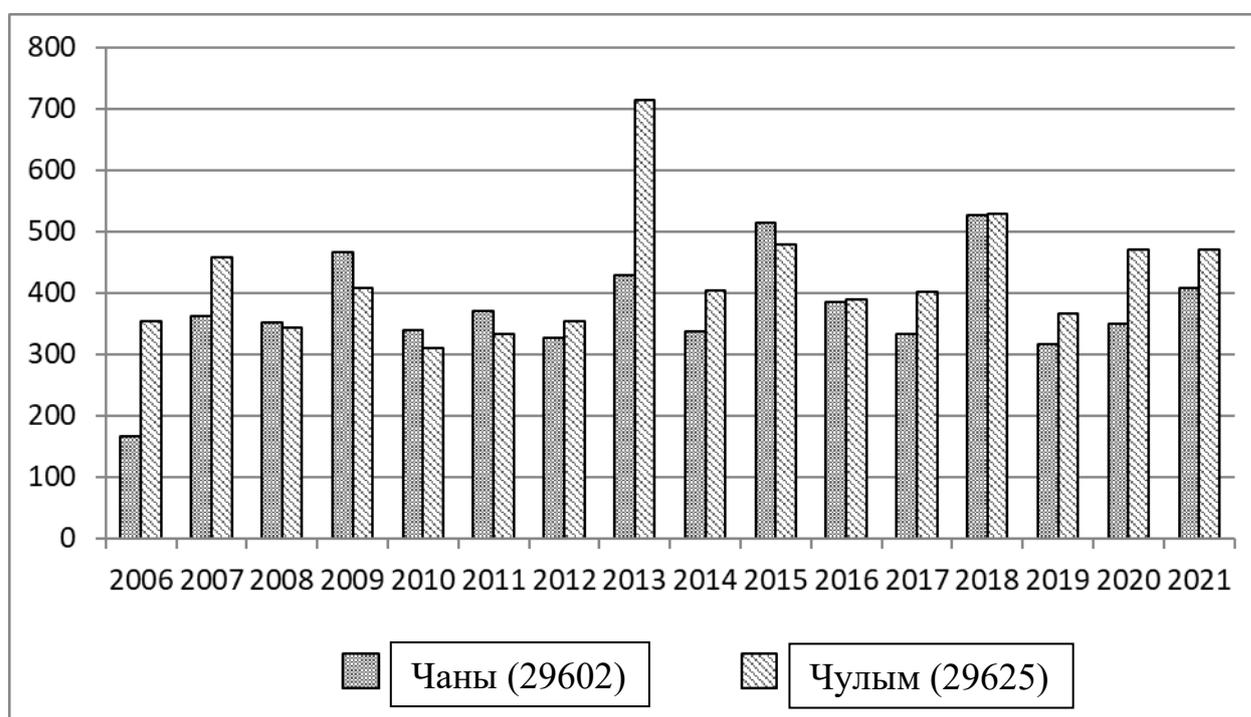


Рисунок 2. Осадки (мм) на участках исследований с 2006 по 2021 гг. по данным ГМС Чулым (29625) и ГМС Чаны (29602).

В 2015, 2018 и 2020 гг. также отмечено повышенное количество выпавших осадков (479, 528 и 471 мм соответственно).

На втором участке исследований количество осадков в исследованный период также превышало норму, выделялись 2009, 2015 и 2018 гг. (466, 514 и 526 мм соответственно, при норме 331 мм).

Повышенное количество осадков отразилось на уровне грунтовых вод (УГВ) обоих участков. Минимальный уровень залегания грунтовых вод на первом участке исследований (Чулымский район НСО) за всю историю наблюдений зафиксирован в 1985 г. (при закладке опыта) на глубине 3,5 м (рис. 3). В первое десятилетие уровень грунтовых вод поднялся и фиксировался от 50 до 150 см весной, а осенью на уровне 2 м. В 1989 и 1990 гг. подъема УГВ не наблюдалось выше отметки 180 см. После продолжительного перерыва наблюдений с 1990 по 2011 гг., УГВ обнаруживался гораздо ближе к поверхности (не ниже 150-200 см) и все чаще стал фиксироваться на глубине 40-50 см. (2013, 2015, 2018, 2019 гг.) Весенний подъем грунтовых вод носил ежегодный характер, но в разные годы уровень находился на различной глубине.

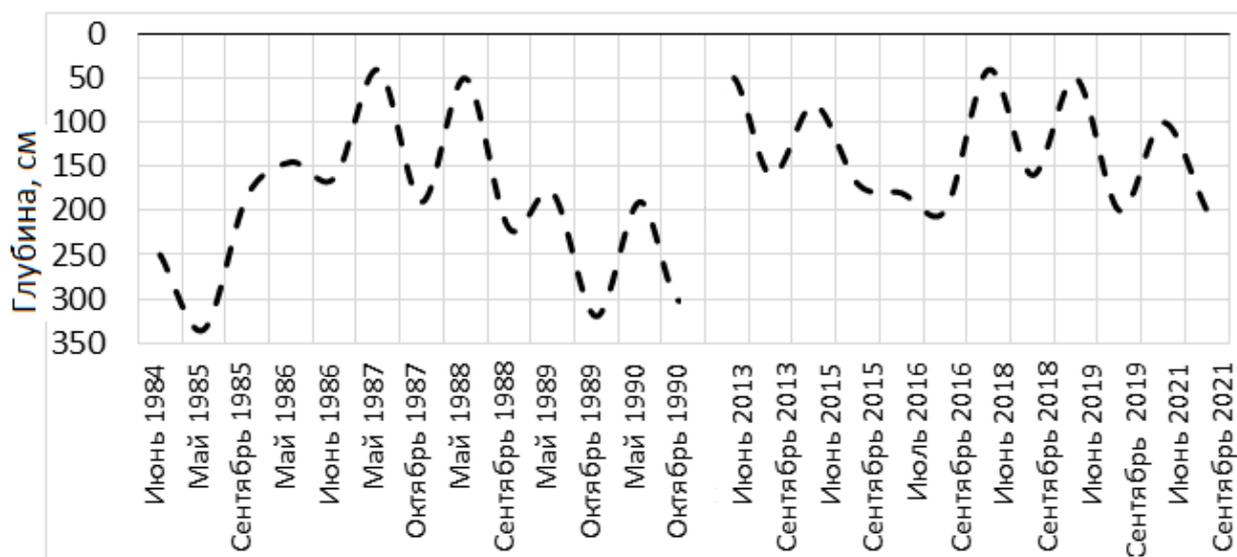


Рисунок 3. Динамика уровня грунтовых вод на исследованном участке в Чулымском районе НСО.

В результате подъема уровня грунтовых вод в 2013 г. зафиксировано насыщение почвенного поглощающего комплекса обменным натрием, продолжающееся в последующие несколько лет (рис. 4).

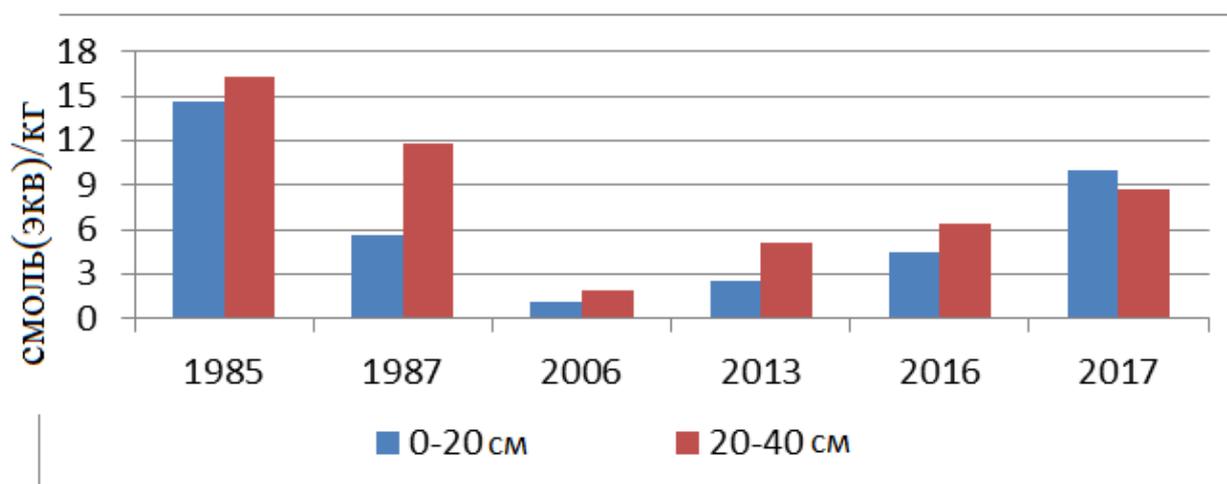


Рисунок 4. Содержание обменного натрия в мелиорированном солонце (в слоях 0-20 и 20-40 см) в Чулымском районе НСО, (n = 3).

Исследователями установлено, что насыщение почвенного поглощающего комплекса (ППК) почв гидроморфного ряда (лугово-черноземных, черноземно-луговых и луговых) обменным

натрием в количестве 3,0 смоль(экв)/кг приводит к началу формирования солонцового горизонта (Семендяева, Добротворская, 2005). Из полученных данных видно, что накопление обменного натрия в ППК в слоях почвы 0-20 и 20-40 см после 2013 г. происходило постепенно, в течение нескольких последующих лет, но уже в 2013 г. превышено пороговое значение 3,0 смоль(экв)/кг, что указывает на развитие солонцового процесса почвообразования.

При исследовании морфологического строения профиля химически мелиорированного солонца, подвергшегося вторичному засолению минерализованными грунтовыми водами (степень минерализации 2,6 г/л) не обнаружено восстановления иллювиального горизонта (рис. 5).

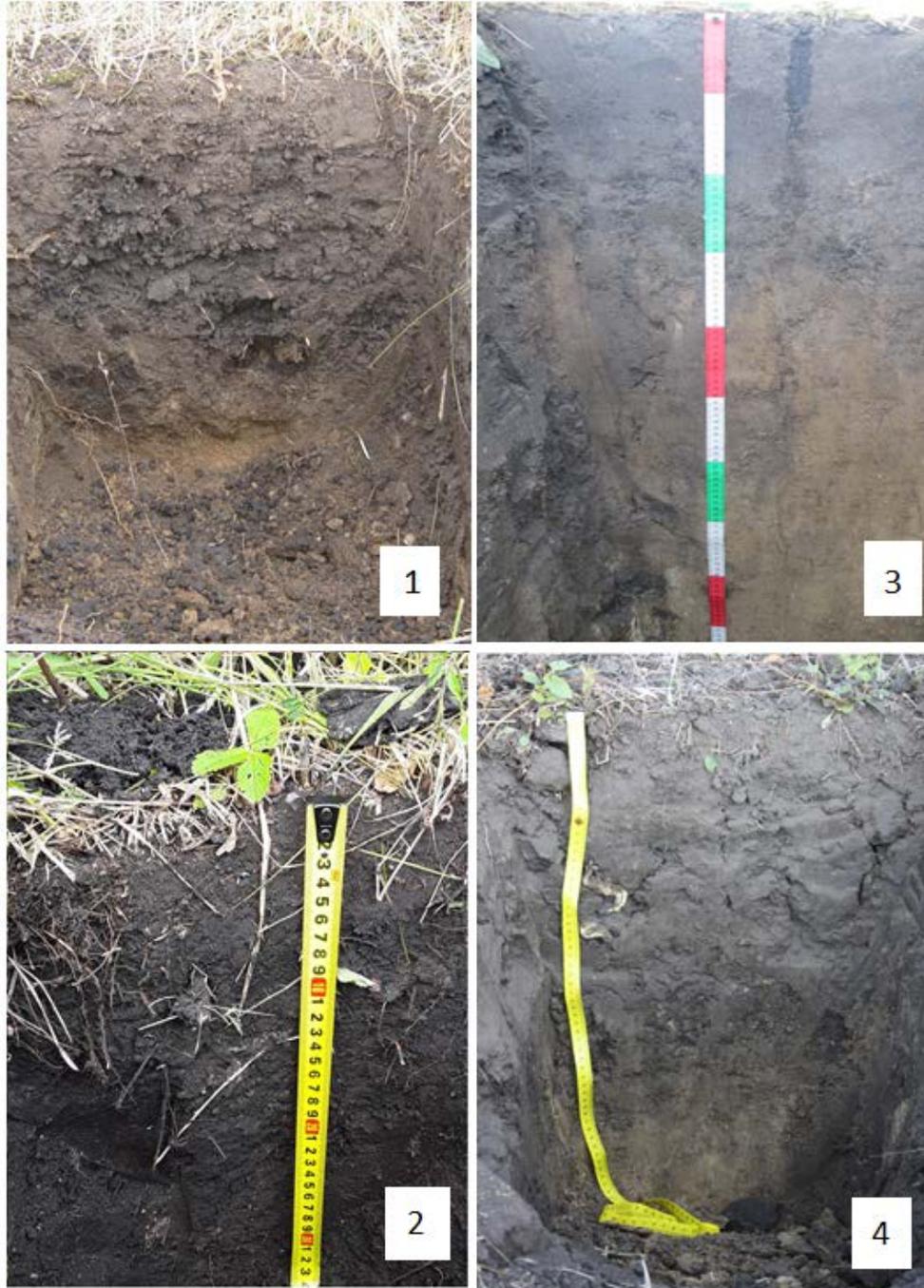


Рисунок 5. Профиль солонца коркового мелиорированного химической мелиорацией (Чулымский район НСО) 2012 г. (1) и 2019 г. (2), солонца мелкого мелиорированного агробиологическим методом (Чановский район НСО) (3) и контроль (вечный пар) 2021 г. (4).

При исследовании морфологического строения солонца обрабатываемого по типу вечного пара (контроль) в Чановском районе НСО наблюдались признаки солонцового горизонта на

глубине 10-26 см (рис. 5). Следовательно, разрушенный при проведении агротехнических операций солонцовый горизонт восстановился.

Уровень грунтовых вод второго участка при закладке опыта находился на уровне 410 см, в августе 2016 г. и сентябре 2021 г. – на уровне 260 и 240 см, соответственно. Степень минерализации грунтовых вод изменилась от слабой в 1985 г. до средней в 2016 г. Таким образом, произошел подъем грунтовых вод вместе с увеличением их минерализации.

Под действием агробиологической мелиорации снизилось содержание солей по всему метровому профилю (рис. 6), однако к 2021 г. запасы солей выросли в опыте на глубине 35 см и ниже, а в контроле по всему метровому профилю.

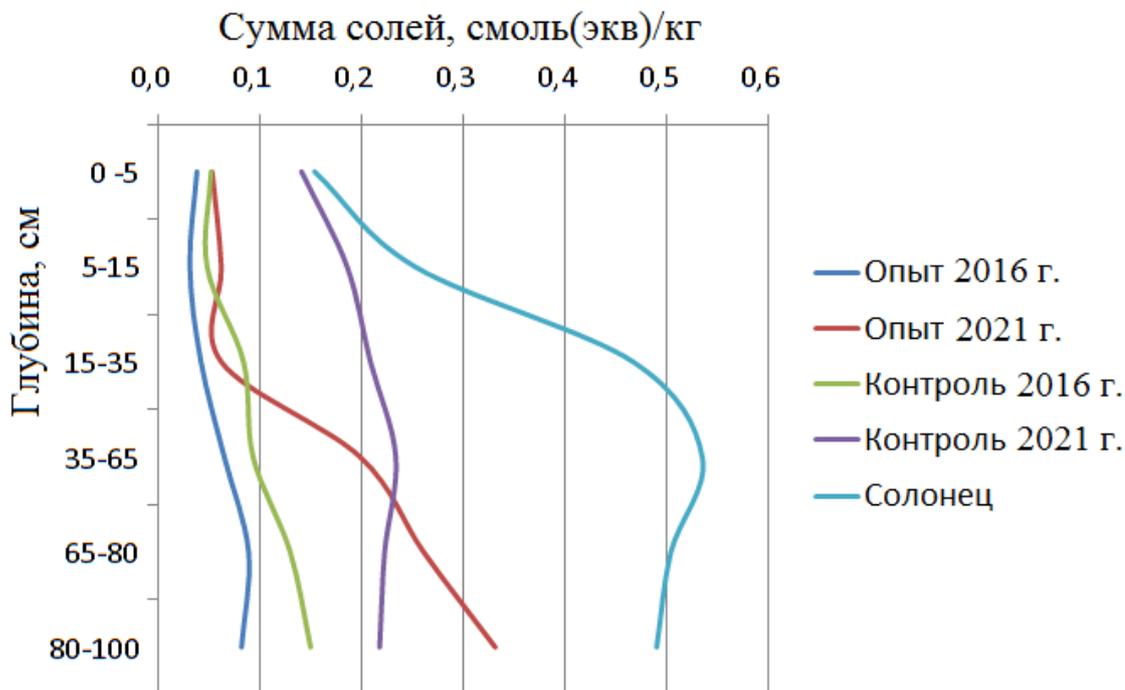


Рисунок 6. Распределение запасов солей в профиле почв, мелиорированных агробиологическим методом.

ОБСУЖДЕНИЕ

Барабинская низменность представляет собой слабо дренированную водно-аккумулятивную равнину, часть территории которой не имеет стока. Поэтому в условиях увеличения увлажненности происходит перенос солей по территории вместе с увеличением гидроморфизма и развитием осолонцевания и засоления почв.

Для вовлечения в сельскохозяйственный оборот солонцов широко применяли химическую мелиорацию – прием дорогостоящий, но эффективный (Семендяева и др., 2017). Профиль солонцов рассолялся, обменный натрий из почвенного поглощающего комплекса замещался кальцием мелиоранта, что приводило к улучшению физических и физико-химических свойств почвы. При этом сульфат натрия, образующийся в результате обменных реакций, мигрировал в грунтовые воды. Из-за слабой дренированности Барабинской низменности, бессточности части территории, боковой внутрипочвенный сток выражен очень слабо. Соли натрия постепенно аккумулировались в грунтовых водах и почвообразующей породе. В условиях периодического подъема уровня грунтовых вод в избыточно влажные периоды происходило вторичное засоление и осолонцевание профиля почв. На опытном участке, расположенном в Чулымском районе НСО, зафиксировано длительное действие одноразового внесения гипса в солонцы корковые более 30 лет, до 2013 г. После 2013 г. мелиоративный эффект гипсования стал уступать влиянию минерализованных грунтовых вод, происходило накопление обменного натрия в почвенном поглощающем комплексе, начал развиваться процесс вторичного осолонцевания мелиорированных солонцов.

При переходе к рыночной экономике и сокращению государственного финансирования агропромышленного комплекса встал вопрос о снижении затрат на мелиорацию земель, в т.ч. солонцов. Специалистами СибНИИ кормов СФНЦА РАН был разработан менее затратный

агробиологический метод мелиорации, основанный на послойной обработке почвы с посевом засухо-соле-солонцеустойчивых однолетних и многолетних кормовых трав, которые к тому же способны выносить соли натрия в процессе жизнедеятельности, рассоляя профиль почв (Ломова, Коробова, 2015). На опытном участке в Чановском районе НСО зафиксировано положительное действие агробиологической мелиорации на профиль мелких и средних солонцов. При повышении уровня грунтовых вод с 410 см до 240-250 см происходило накопление солей как в нижней части профиля мелиорированного солонца, так и в контроле (вечный пар), однако в верхней части профиля в контроле накопление солей произошло сильнее, чем в варианте с посевом культур – фитомелиорантов, кроме того при вскрытии профиля в контроле обнаружено восстановление солонцового горизонта.

Таким образом, на обоих участках в последнее десятилетие наблюдается подъем грунтовых вод, который приводит к вторичному засолению и осолонцеванию мелиорированных почв. Химическая мелиорация не только улучшила свойства почвы, но и показала высокую устойчивость своего действия при вторичном засолении профиля грунтовыми водами. В солонцах, мелиорированных агробиологическим методом, установлено постепенное засоление нижней части профиля, но меньшее, чем в контрольном варианте.

ФИНАНСОВАЯ ПОДДЕРЖКА

Работа выполнена по государственному заданию ИПА СО РАН (проект № 121031700316-9) и при поддержке РФФИ (грант № 21-55-75002).

ЛИТЕРАТУРА

1. Анопоченко Л.Ю., Якутин М.В. Изменение соотношения площадей засоленных и незасоленных почв в процессе обсыхания Барабинской равнины // *Интерэкспо Гео-Сибирь*. 2013. Т. 4. № 2. С. 160–165.
2. ГОСТ 26423-85. Почвы. Методы определения удельной электрической проводимости, рН и плотного остатка водной вытяжки. Москва: Издательство стандартов. 1985. 8 с.
3. ГОСТ 26428-85. Почвы. Методы определения кальция и магния в водной вытяжке. Москва: Издательство стандартов. 1985. 4 с.
4. Днепровская В.П., Яценко И.Г. Исследование взаимосвязи климатического состояния и пространственной структуры растительного покрова Западной Сибири // *Оптика атмосферы и океана*. 2018. Т. 31. № 1. С. 63–68. DOI: 10.15372/AOO20180110
5. Добротворская Н.И., Елизаров Н.В., Иванова М.И. Агроэкологическая оценка земель засоленных агроландшафтов Барабы // *Известия Оренбургского государственного аграрного университета*. 2019. № 6 (80). С. 11–15.
6. Елизаров Н.В. *Влияние длительного действия гипса на свойства солонцов Барабинской низменности*. Дисс. ... к.б.н. Новосибирск, 2015. 127 с.
7. Елизаров Н.В., Попов В.В., Семендяева Н.В. Современный гидроморфизм солонцов лесостепной зоны Западной Сибири // *Почвоведение*. 2020. № 12. С. 1451–1459. DOI: 10.31857/S0032180X20120059
8. Кирейчева Л.В., Белова И.В., Глистин М.В., Устинов М.Т., Хохлова О.Б., Юрченко И.Ф., Яшин В.М. *Эколого-экономическая эффективность комплексных мелиораций Барабинской низменности*. М.: ВНИИА, 2009. 312 с.
9. Левина Т.П., Орлова Л.А. Климатические ритмы голоцена юга Западной Сибири // *Геология и геофизика*. 1993. Т. 34. № 3. С. 38–55.
10. Ломова Т.Г., Коробова Л.Н. Фитомелиоративное окультуривание солонцов Барабы и его влияние на биологическую активность почвы // *Сибирский вестник сельскохозяйственной науки*. 2015. № 1. С. 12–18.
11. Семендяева Н.В., Добротворская Н.В. *Теоретические и практические аспекты химической мелиорации солонцов Западной Сибири*. Новосибирск: Сибирское отделение Российской академии сельскохозяйственных наук, 2005. 156 с.
12. Семендяева Н.В., Елизаров Н.В., Галеева Л.П., Коробова Л.Н. *Длительность действия химической мелиорации на свойства солонцов Барабинской равнины*. Новосибирск: ИЦ НГАУ «Золотой колос», 2017. 190 с.
13. Krivonogov S., Kazansky A., Khazin L., Lui Zh., Rudaya N., Zhilich S., Zhdanova A. *Environmental history of Lake Chany, southern Western Siberia*. Abstract for the XIX INQUA Congress «Quaternary Perspectives on Climate Change, Natural Hazards and Civilization» (26 July - 2 August, 2015), Nagoya, 2015.
14. Riedel F., Kossler A., Tarasov P., Wünnemann B. A study on Holocene foraminifera from the Aral Sea and West Siberian lakes and its implication for migration pathways // *Quaternary International*, 2011, Vol. 229, Iss. 1–2. p. 105–111. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2010.03.009>
15. Song M., Zhilich S., Krivonogov S., Liu Zh. *Biomarker-based reconstructions of climatic changes from the Yarkov Basin of Lake Chany, south Western Siberia, during the middle to late Holocene*. Abstract for the 13th International Paleolimnology Symposium (August 4-7, 2015), Lanzhou, Lanzhou University, 2015, p. 122–123.

16. Zhilich S., Krivonogov S., Rudaya N. *Climate and vegetation changes in the forest-steppe zone of Western Siberia during the Holocene inferred from the sediments of Lake Bolshie Toroki*. Abstract for the 11 East Eurasia International Workshop “Present Earth surface processes and long-term environmental changes in East Eurasia” (13-17 October 2014), Nanjing–Hanzhou, 2014, p. 58–60.
17. Zhilich S., Rudaya N., Krivonogov S. *The Holocene environmental changes in the arid and semiarid regions of West Siberia inferred from lake sediments*. Abstract for the 13th International Paleolimnology Symposium (August 4-7, 2015), Lanzhou, 2015, p. 62–63.

Поступила в редакцию 31.10.2022

Принята 01.12.2022

Опубликована 07.12.2022

Сведения об авторах:

Елизаров Николай Владимирович – кандидат биологических наук, старший научный сотрудник лаборатории географии и генезиса почв Института почвоведения и агрохимии СО РАН.; elizarov@issa-siberia.ru

Попов Владимир Викторович – кандидат биологических наук, младший научный сотрудник лаборатории географии и генезиса почв Института почвоведения и агрохимии СО РАН (Новосибирск, Россия); popov@issa-siberia.ru

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.



Статья доступна по лицензии [Creative Commons Attribution 4.0 License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

INFLUENCE OF GROUNDWATER LEVEL FLUCTUATION ON THE MELIORATED SOLONETZ IN THE NORTHERN FOREST-STEPPE OF THE BARABA LOWLAND

© 2022 Elizarov N.V. , Popov V.V. 

Institute of Soil Science and Agrochemistry of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia. E-mail: elizarov@issa-siberia.ru

The purpose of the study: *to determine groundwater level and chemistry and their influence on soil properties.*

Location and time of the study. *Northern forest-steppe of the Baraba lowland (Chulymsky and Chanovsky districts of the Novosibirsk region, Russia), 2011–2021.*

Methods. *Determination of the groundwater level and subsequent collecting groundwater samples from the temporary wells in the experimental areas (with chemical melioration by applying gypsum and agrobiological melioration by destroying the solonetz horizon and sowing salt-resistant crops). Under laboratory conditions, soil and groundwater chemical properties and the cation-anion composition of the water extract of soils were measured.*

Main results. *Changes in the standing level of soils and their mineralization were revealed. The rise in the groundwater level resulted in the accumulation of easily soluble salts the soil profile, the saturation of the soil-absorbing complex with exchangeable sodium, and the restoration of the solonetzic horizon. In medium-deep and shallow solonetz, reclaimed by the agrobiological method, the groundwater level was located at 240-250 cm in 2021, and salinization occurred only in the lower part of the profile (35-100 cm), while in the control variant, salinization occurred along the entire 1m profile.*

Conclusion. *In most of the Baraba Lowland, the capillary fringe of groundwater is constantly or periodically present in a soil profile. Under conditions of increased moisture in the territory, the development of degradation processes, such as soil secondary salinization and solonetzization, is diagnosed. In chemically reclaimed crusty solonetz, with periodical groundwater rise to the 50 cm depth, the ameliorative effect had been maintained for more than 30 years, after which there took place a gradual secondary salinization of the soil profile and the accumulation of exchangeable sodium in the soil absorbing complex. Over the last decade both meliorated areas saw the groundwater table rise, bringing soil secondary salinization and solonetzization. Chemical melioration proved its efficacy in not only improving soil properties, but in sustaining it under soil secondary salinization by groundwater. Agrobiological approach to solonetz melioration can also be considered perspective for slowing soil quality deterioration and sustaining soil fertility.*

Key words: groundwater; soil absorbing complex; alkalization; salinization; Baraba lowland; West Siberia

How to cite: Elizarov N.V., Popov V.V. Influence of groundwater level fluctuation on meliorated salontz in the northern forest-steppe of the Baraba lowland // *The Journal of Soils and Environment*. 2022. 5(4). e190. DOI: [10.31251/pos.v5i4.190](https://doi.org/10.31251/pos.v5i4.190) (in Russian with English abstract).

REFERENCES

1. Anopchenko L.Yu., Yakutin M.V. Change of a parity of the areas of the salted and not salted soils during the drying process Barabinsk plain, *Interexpo Geo-Siberia, 2013, Vol. 4, No. 2, p. 160–165.* (in Russian)
2. GOST 26423-85. Soils. Methods for determination of specific electric conductivity, pH and solid residue of water extract. Moscow: Standards Publishing House, 1985, 8 p. (in Russian)
3. GOST 26428-85. Soils. Methods for determination of calcium and magnesium in water extract. Moscow: Standard Publishing House, 1985, 4 p. (in Russian)
4. Dneprovskaya V.P., Yashchenk I.G. Relationships between climate conditions and spatial structure of vegetation in Western Siberia, *Optika atmosfery i okeana, 2018, Vol. 31, No. 1, p. 63–68.* DOI: 10.15372/AOO20180110. (in Russian)
5. Dobrotvorskaya N.I., Elizarov N.V., Ivanova M.I. Agroecological evaluation of saline lands of the Baraba agrolandscapes, *Izvestia Orenburg State Agrarian University, 2019, No. 6 (80), p. 11–15.* (in Russian)
6. Elizarov N.V. *Influence of long-term action of gypsum on the properties of solonetztes of the Baraba plan.* Diss. Cand. of Biol. Sci. Novosibirsk, 2015, 127 p. (in Russian)
7. Elizarov N.V., Popov V.V., Semendyaeva N.V. Modern hydromorphism of solonetztes in the forest-steppe zone of Western Siberia, *Eurasian Soil Science, 2020, Vol. 53, No. 12, p. 1701–1708.* DOI: 10.1134/S1064229320120054
8. Kireycheva L.V., Belova I.V., Glistin M.V., Ustinov M.T., Khokhlova O.B., Yurchenko I.F., Yashin V.M. *Ecological and economic efficiency of complex melioration of the Baraba lowland.* M.: VNIIA, 2009, 312 p. (in Russian)
9. Levina T.P., Orlova L.A. Climatic rhythms of the Holocene in the south of Western Siberia, *Geologiya i geofizika, 1993, Vol. 34, No. 3, p. 38–55.* (in Russian)
10. Lomova T.G., Korobova L.N. Phyto-reclamation domestication of solonetz soils of Baraba and its effect on the biological activity of soil, *Siberian Herald of Agricultural Science, 2015, No. 1, p. 12–18.* (in Russian)
11. Semendyaeva N.V., Dobrotvorskaya N.V. *Theoretical and practical aspects of chemical reclamation of solonetztes in Western Siberia.* Novosibirsk: Siberian Branch of the Russian Academy of Agricultural Sciences, 2005, 156 p. (in Russian)
12. Semendyaeva N.V., Elizarov N.V., Galeeva L.P., Korobova L.N. *The duration of the effect of chemical reclamation on the properties of solonetztes of the Baraba plain.* Novosibirsk: Information Center of NSAU "Zolotoy kolos", 2017, 190 p. (in Russian)
13. Krivonogov S., Kazansky A., Khazin L., Lui Zh., Rudaya N., Zhilich S., Zhdanova A. *Environmental history of Lake Chany, southern Western Siberia.* Abstract for the XIX INQUA Congress «Quaternary Perspectives on Climate Change, Natural Hazards and Civilization» (26 July - 2 August, 2015), Nagoya, 2015.
14. Riedel F., Kossler A., Tarasov P., Wünnemann B. A study on Holocene foraminifera from the Aral Sea and West Siberian lakes and its implication for migration pathways? *Quaternary International, 2011, Vol. 229, Iss. 1–2, p. 105–111.* DOI: <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2010.03.009>
15. Song M., Zhilich S., Krivonogov S., Liu Zh. *Biomarker-based reconstructions of climatic changes from the Yarkov Basin of Lake Chany, south Western Siberia, during the middle to late Holocene.* Abstract for the 13th International Paleolimnology Symposium (August 4-7, 2015), Lanzhou, Lanzhou University, 2015, p. 122–123.
16. Zhilich S., Krivonogov S., Rudaya N. *Climate and vegetation changes in the forest-steppe zone of Western Siberia during the Holocene inferred from the sediments of Lake Bolshie Toroki.* Abstract for the 11 East Eurasia International Workshop “Present Earth surface processes and long-term environmental changes in East Eurasia” (13-17 October 2014), Nanjing–Hanzhou, 2014, p. 58–60.
17. Zhilich S., Rudaya N., Krivonogov S. *The Holocene environmental changes in the arid and semiarid regions of West Siberia inferred from lake sediments.* Abstract for the 13th International Paleolimnology Symposium (August 4-7, 2015), Lanzhou, 2015, p. 62–63.

Received 31 October 2022
Accepted 01 December 2022
Published 07 December 2022

About the authors:

Elizarov Nikolay Vladimirovich – Candidate of Biological Sciences, Researcher in the Laboratory of Soil Geography and Genesis in the Institute of Soil Science and Agrochemistry of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Novosibirsk, Russia); elizarov@issa-siberia.ru

Popov Vladimir Viktorovich – Candidate of Biological Sciences, Junior Researcher in the Laboratory of Soil Geography and Genesis in the Institute of Soil Science and Agrochemistry of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Novosibirsk, Russia); popov@issa-siberia.ru

The authors read and approved the final manuscript



The article is available under [Creative Commons Attribution 4.0 License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)



ВЛИЯНИЕ КАЛИБРОВОЧНЫХ РАСТВОРОВ НА РЕЗУЛЬТАТЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СОДЕРЖАНИЯ ПОДВИЖНОГО ФОСФОРА В ПОЧВАХ

© 2022 Т. В. Нечаева 

ФГБУН Институт почвоведения и агрохимии СО РАН, проспект Академика Лаврентьева, 8/2, г. Новосибирск, 630090, Россия. E-mail: nechaeva@issa-siberia.ru

Цель исследования: сравнить результаты определения содержания подвижного фосфора в почвах при использовании двух способов подготовки калибровочных растворов (включая эталонный и рабочий) для шкалы на фосфор: на экстрагирующем растворе или дистиллированной воде.

Место и время проведения. Лабораторно-аналитические исследования почв проведены в 2021 году. Содержание подвижного фосфора определено в 54 образцах, отобранных в 2018-2020 гг. из полнопрофильных почвенных разрезов, в том числе: чернозёма оподзоленного (Luvic Greyzemic Chernozem) и луговато-чернозёмной оподзоленной почвы (Luvic Greyzemic Chernozem Colluvic) в Тогучинском районе Новосибирской области (НСО), чернозёма выщелоченного (Luvic Chernozem) в Искитимском районе НСО и Павловском районе Алтайского края. Почвенные образцы отобраны на целинном, пахотном и залежном участках.

Методы. Почвенные образцы проанализированы на содержание подвижного фосфора по методу Чирикова в модификации ЦИНАО, основанного на извлечении фосфатов 0,5 М раствором уксусной кислоты при соотношении почва : экстрагент 1:25, но с двумя способами подготовки калибровочных растворов (включая эталонной и рабочий) для шкалы на фосфор: на экстрагирующем растворе или дистиллированной воде.

Основные результаты. Результаты определения содержания подвижного фосфора в почвах зависели от способа подготовки калибровочных растворов для шкалы на фосфор: на экстрагирующем растворе значения были в среднем в 1,1 раза ниже, чем на дистиллированной воде. Различия средних были статистически достоверны ($p < 0,01$) во всех исследованных почвах, независимо от того, целина это, пашня или залежь.

Заключение. Все калибровочные растворы (включая эталонный и рабочий) для построения шкалы на фосфор должны быть как можно ближе по химическому составу к исследуемым вытяжкам, то есть готовить их лучше всего на том же экстрагирующем растворе, что и почвенные вытяжки. В то же время исследователь должен строго придерживаться хода анализа, прописанного в конкретной методике. Поэтому необходимо обращать внимание на тонкости проведения почвенно-агрохимических анализов, изучать свойства и режимы почв по единым методикам, особенно при выполнении многолетних опытов или мета-анализа данных нескольких исследований.

Использование аттестованных стандартных образцов (СО) почв с известным химическим составом является одним из необходимых условий для контроля качества определений. Подготовка собственной серии контрольных образцов почв достаточно большого объёма и их включение в анализы позволяет сокращать количество аналитических повторностей и экономить СО, особенно при проведении массовых почвенно-агрохимических исследований.

Ключевые слова: чернозём; подвижный фосфор; эталонный раствор; рабочий раствор; калибровочный график; фотоколориметрический метод; целина; пашня; залежь; аттестованный стандартный образец

Цитирование: Нечаева Т.В. Влияние калибровочных растворов на результаты определения содержания подвижного фосфора в почвах // Почвы и окружающая среда. 2022. Том 5. №4. e187. DOI: [10.31251/pos.v5i4.187](https://doi.org/10.31251/pos.v5i4.187)

ВВЕДЕНИЕ

Фосфор – незаменимый элемент питания растений, контролирующий практически все биохимические процессы их жизнедеятельности и имеющий важное значение в формировании высоких урожаев сельскохозяйственных культур. Фосфор входит в состав почвенных минеральных, органических и органоминеральных соединений, соотношение между которыми определяет фосфатное состояние почв и уровень их плодородия (Аринушкина, 1970; Ильин, 1985; Кидин, 2008; Копосов, 2011; Агрохимия ..., 2019; и др.).

Эффективное плодородие почв в отношении фосфора определяется запасом его подвижных форм (растворимых фосфатов). К этой группе относятся различные формы почвенных фосфатов, находящихся в динамическом равновесии «твёрдая фаза почвы \leftrightarrow раствор». Степень доступности растениям подвижных фосфатов зависит от свойств почвы, вида выращиваемых культур, сезонной динамики водного, воздушного и теплового режимов почвы, её биологической активности, применяемых удобрений и других факторов (Практикум по агрохимии, 2001).

Одним из основных методов исследования фосфора как в почвенных, так и в растительных образцах является *фотокolorиметрическое* определение содержания ортофосфорной кислоты. Ортофосфат (PO_4^{3-}) в слабокислой среде при определённой концентрации ионов водорода образует с молибденом фосфорно-молибденовую гетерополикислоту, окрашенную в жёлтый цвет. При добавлении восстановителя к раствору этого комплекса, входящий в него шестивалентный молибден частично восстанавливается с образованием фосфорно-молибденовой сини, окрашивающей раствор в голубой или синий цвет: по интенсивности окраски определяют содержание фосфора в исследуемых образцах. При этом следует подбирать такие условия анализа, при которых восстанавливался бы молибден, связанный с фосфором, и не восстанавливалась оставшаяся часть молибдена, находящаяся в растворе в избытке. Это достигается определённым соотношением реактивов: минеральной кислоты (серной, соляной, хлорной), молибденовокислого аммония и восстановителя в виде хлористого олова, аскорбиновой кислоты, сернокислого гидразина и других (Аринушкина, 1970; Теория и практика ..., 2006; Агрохимия ..., 2019; и др.).

Анализ литературы по методам определения подвижного фосфора в почвах показал, что нет единого мнения о подготовке эталонного (стандартного, образцового, исходного, основного) и рабочего растворов на фосфор, а также шкалы (серии) растворов сравнения для построения калибровочного графика (далее – шкалы на фосфор): на экстрагирующем растворе или на дистиллированной воде ($\text{H}_2\text{O}_{\text{дист}}$)? В одних источниках указано, что эталонный и рабочий растворы, шкалу на фосфор необходимо готовить путём соответствующего разведения в $\text{H}_2\text{O}_{\text{дист}}$ (Аринушкина, 1970: С. 222-224, 334; Теория и практика ..., 2006: С. 186, 314; Агрохимия ..., 2019: С. 245); в других – эталонный и рабочий растворы готовят на $\text{H}_2\text{O}_{\text{дист}}$, однако в серию растворов сравнения для построения шкалы на фосфор добавляют экстрагирующий раствор в количестве, соответствующем объёму аликвоты почвенной вытяжки (Радов и др., 1978: С. 162-163; Практикум ..., 2005: С. 68-73; Копосов, 2011: С. 252-262). В третьих источниках сказано, что эталонный раствор готовят на $\text{H}_2\text{O}_{\text{дист}}$, а шкалу на фосфор – на экстрагирующем растворе (Фомин Г.С., Фомин А.Г., 2001: С. 128); в четвертых – все растворы (включая эталонный и рабочий) для шкалы на фосфор готовят путём разведения в соответствующем методу экстрагирующем растворе (Радов и др., 1978: С. 168-169; Ганжара и др., 2002: С. 73, 76-78; ГОСТ 26204-91; Копосов, 2011: С. 266-267; Frank et al., 2011). В Практикуме по агрохимии (2001) приведены различные способы подготовки калибровочных растворов в зависимости от метода определения подвижного фосфора в почвах: по Чирикову, например, для этих целей используют $\text{H}_2\text{O}_{\text{дист}}$ (С. 171), а по Чирикову в модификации ЦИНАО – экстрагирующий раствор (С. 172). Как же поступить исследователю при таком разнообразии способов подготовки калибровочных растворов для шкалы на фосфор?

Считаем, что все калибровочные растворы (включая эталонный и рабочий) для построения шкалы на фосфор должны быть *как можно ближе по химическому составу к исследуемым вытяжкам*; следовательно, готовить их лучше всего *на том же экстрагирующем растворе, что и почвенные вытяжки*. Данное утверждение будет справедливо для любого химического элемента. В то же время исследователь должен *чётко придерживаться хода анализа, прописанного в конкретной методике*. При этом ему не обязательно использовать только методы, описанные в ГОСТах, если речь идёт про научно-исследовательские изыскания. Стоит также добавить, что в одной лаборатории могут быть одновременно использованы различные методы определения подвижного фосфора в почвах, поэтому с целью унификации готовится единый эталонный раствор на фосфор, например, только на $\text{H}_2\text{O}_{\text{дист}}$. Тогда возникает вопрос: будут ли существенны различия в результатах по содержанию подвижного фосфора в почвах с учётом двух способов подготовки калибровочных растворов для шкалы на фосфор: на экстрагирующем растворе или на $\text{H}_2\text{O}_{\text{дист}}$? В литературных источниках ответ на данный вопрос найти не удалось, поэтому решили провести собственное исследование.

Цель работы – сравнить результаты определения содержания подвижного фосфора в почвах при использовании двух способов подготовки калибровочных растворов (включая эталонный и рабочий) для шкалы на фосфор: на экстрагирующем растворе или дистиллированной воде.

МАТЕРИАЛА И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Проанализировали 54 образца в двукратной аналитической повторности, отобранных в 2018-2020 гг. из полнопрофильных почвенных разрезов, расположенных на территории Новосибирской области (НСО) и Алтайского края, в том числе:

(1) Чернозём оподзоленный (Классификация ..., 1977), что соответствует чернозёму глинисто-иллювиальному элювирированному (Полевой определитель..., 2008) либо Luvic Greyzemic Chernozem (Siltic) по классификации IUSS Working Group WRB (2014, далее – WRB, 2014). Образцы отобраны через каждые 10 см до полуметровой глубины на целине, пахотном несмытом и слабосмытом участках в Тогучинском районе НСО. Верхний 0-50 см слой почв характеризовался от слабокислой до нейтральной реакцией среды с варьирование pH водной суспензии ($pH_{\text{вод}}$) от 6,3 до 6,5. Вскипание от 10%-ной HCl бурное с глубины 120 см на целине; с глубины 87 и 103 см – на несмытом и слабосмытом участках.

(2) Луговато-чернозёмная оподзоленная намытая почва (Классификация ..., 1977), что соответствует агростратозёму тёмногумусовому на агрочернозёме глинисто иллювиальном (Полевой определитель..., 2008) либо Luvic Greyzemic Chernozem Colluvic (Siltic) (WRB, 2014). Образцы отобраны через каждые 10 см до глубины 90 см и далее из слоя 90-130 см на пахотном намытом участке в Тогучинском районе НСО. Реакция среды в слое 0-130 см варьировала от слабокислой до нейтральной ($pH_{\text{вод}} = 6,4-6,6$), карбонаты отсутствовали до глубины 300 см.

(3) Чернозём выщелоченный (Классификация ..., 1977), что соответствует чернозёму глинисто-иллювиальному тёмноязыковатому (Полевой определитель..., 2008) либо Luvic Chernozem (Siltic) (WRB, 2014). Образцы отобраны из слоя 0-5, 5-10, 10-20, 20-30 и 30-40 см на целине, пахотном и залежном участках в Искитимском районе НСО. Верхний 0-40 см слой почв характеризовался от кислой до нейтральной реакцией среды: на целине значения $pH_{\text{вод}}$ составили 5,96-6,76, на пахотном и залежном участках – 6,70-7,14 и 5,25-6,74. Вскипание от 10%-ной HCl бурное с глубины 95 см на целине; с 60 и 86 см – на пахотном и залежном участках.

(4) Чернозём выщелоченный (Классификация ..., 1977), что соответствует чернозёму глинисто-иллювиальному тёмноязыковатому (Полевой определитель..., 2008) либо Luvic Chernozem (Siltic) (WRB, 2014). Образцы отобраны из слоя 0-5, 5-10, 10-20, 20-30 и 30-40 см на целине, пахотном и залежном участках в Павловском районе Алтайского края. Реакция среды в слое 0-40 см почв варьировала от слабокислой до нейтральной: на целине значения $pH_{\text{вод}}$ составили 5,99-6,64, на пахотном и залежном участках – 6,41-6,93 и 7,19-7,56. Вскипание от 10%-ной HCl бурное с глубины 90 см на целине; с 56 и 58 см – на пахотном и залежном участках.

С более подробным морфологическим описанием полнопрофильных разрезов почв (1)-(2) и их свойствами можно познакомиться в путеводителе (Смоленцева и др., 2018).

В каждую партию был включён контрольный образец (КО), отобранный в Тогучинском районе НСО из пахотного горизонта (0-30 см) тёмно-серой лесной среднесмытой почвы (Классификация ..., 1977), что соответствует агротёмносерой элювирированной почве (Полевой определитель..., 2008) либо Luvic Greyzemic Phaeozem (Siltic) (WRB, 2014). Пахотный горизонт характеризовался кислой реакцией среды ($pH_{\text{вод}} = 5,09$). Почва в достаточно большом объёме была подготовлена в качестве КО осенью 2019 г. и используется во время проведения массовых определений в лаборатории агрохимии ИПА СО РАН. Также в анализы периодически включают аттестованные стандартные образцы (СО) почв с известным содержанием подвижного фосфора, что является одним из необходимых условий контроля качества определений. Результаты по анализу СО почв и сравнение с паспортными данными представлены в таблице 1.

Таблица 1

Содержание подвижного фосфора в аттестованных стандартных образцах почв

Стандартный образец (СО)	Подвижный фосфор, мг P_2O_5/kg^*	
	аттестованное ¹	рассчитанное ²
САЧВП-05/2	485 ± 73	481 ± 58
САЧВП-06/8	65,9 ± 7,9	66,0 ± 8,0
САЧВП-05/7	93,0 ± 11,0	93,0 ± 17,0

Примечание.

* – фосфор в почвах определен по методу Чирикова в модификации ЦИНАО в соответствии с ГОСТ 26204-91. Приведены: 1 – аттестованные значения и их абсолютные погрешности при двусторонней доверительной вероятности $P=0,95$ в соответствии с паспортными данными к СО; 2 – рассчитанные в лаборатории агрохимии ИПА СО РАН.

Методы определения подвижных (усвояемых, легкорастворимых) фосфатов в почвах отличаются между собой, прежде всего, выбором экстрагента (реактива) для получения соответствующей вытяжки. На кислых и слабокислых почвах, как правило, применяют кислотные вытяжки и различные буферные смеси с исходным рН в пределах 1-5, а на карбонатных почвах – буферные смеси с рН 3,2-5,0 и щелочные вытяжки с рН 8,5-11,0 (Практикум по агрохимии, 2001). Например, метод Чирикова в модификации ЦИНАО в соответствии с ГОСТ 26204-91 (далее – метод Чирикова), используемый в нашей работе, основан на извлечении фосфатов из почвы 0,5 н. (= 0,5 М) раствором уксусной кислоты (CH_3COOH) при соотношении почва : экстрагент 1 : 25. В вытяжку переходят фосфаты кальция и частично фосфаты алюминия и железа. Метод Чирикова принят стандартным для чернозёмов, серых лесных и других почв степной и лесостепной зон, но не распространяется на почвенные горизонты, содержащие карбонаты (ГОСТ 26204-91; Практикум..., 2005). В исследованных и вышеописанных почвах содержание подвижного фосфора определено в горизонтах, не содержащих карбонаты.

Для проведения анализа взвешивали на технических весах 4 г воздушно-сухой почвы (предварительно измельчённой и просеянной через сито с диаметром ячеек 1 мм) и помещали в конические колбы объёмом 250-300 мл. К навескам приливали по 100 мл экстрагирующего раствора (0,5 М CH_3COOH), взбалтывали на ротаторе в течение 1 ч и оставляли на 18-20 ч. Затем почвенную суспензию взбалтывали вручную и фильтровали через бумажный фильтр «синяя лента». Из почвенных вытяжек отбирали стеклянной пипеткой аликвоту 5 мл в конические колбы объёмом 100 мл, прибавляли 45 мл окрашивающего раствора и через 10 минут фотометрировали на приборе КФК-3-«ЗОМЗ» (РФ) в кювете с толщиной просвечиваемого слоя 20 мм и при длине волны 710 нм. Расчет содержания подвижного фосфора в почвенных образцах выполнили на элемент и выразили в мг на 1 кг воздушно-сухой массы (мг Р/кг).

Для построения шкалы на фосфор готовили две серии калибровочных растворов (включая эталонный и рабочий): (I) на экстрагирующем растворе в соответствии с ГОСТ 26204-91; (II) на дистиллированной воде.

Концентрация фосфора в растворах сравнения при построении шкалы должна быть в диапазоне 0,001-0,010 г P_2O_5 /л. Для этого стеклянной пипеткой отбирали от 0,5 до 5 мл эталонного раствора (с содержанием 0,1 мг P_2O_5 /мл) в мерные колбы объёмом 50 мл, доводили до метки экстрагирующим раствором (0,5 М CH_3COOH) или $\text{H}_2\text{O}_{\text{дист}}$. Из полученных растворов сравнения отбирали стеклянной пипеткой аликвоту 5 мл и помещали в конические колбы объёмом 100 мл, прибавляли 45 мл окрашивающего раствора и через 10 минут фотометрировали.

Статистическую обработку экспериментальных данных по содержанию подвижного фосфора в почвах с двумя способами подготовки калибровочных растворов для шкалы на фосфор (на экстрагирующем растворе или на $\text{H}_2\text{O}_{\text{дист}}$) провели методом дисперсионного анализа. За Контроль («Контр.» в табл. 2-6) взяты данные, полученные со шкалой на фосфор на экстрагирующем растворе. Рассчитали среднее арифметическое значение (M), стандартное отклонение (s), вероятность ошибки (p), наименьшую существенную разницу (НСР) на уровне значимости 5 и 1% ($\alpha = 0,05$ и $0,01$, что соответствует обычному и строгому эксперименту) с использованием пакета программ Microsoft Office Excel 2010 и прикладной статистики SNEDECOR V. 5.80 (Сорокин, 2012).

Относительные отклонения между результатами с двумя шкалами на фосфор (I или II, см. табл. 2-6) рассчитывали по формуле: $A = 2 \times (P_1 - P_2) / (P_1 + P_2) \times 100$, где P_1 и P_2 – больший и меньший результат соответственно.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Во всех почвенных образцах данные по содержанию подвижного фосфора зависели от способа подготовки калибровочных растворов для шкалы на фосфор: на экстрагирующем растворе (0,5 М CH_3COOH) значения были в среднем в 1,1 раза ниже, чем на дистиллированной воде (см. табл. 2-5). Относительные отклонения имели близкие значения во всех исследованных почвах и варьировали от 11,5 до 12,6%. Результаты статистической обработки экспериментальных данных показали, что различия средних достоверны ($p < 0,01$) во всех исследованных почвах НСО и Алтайского края, независимо от того, целина это, пашня или залежь. Следовательно, можно сделать вывод, что необходимо обращать внимание на тонкости проведения почвенно-агрохимических анализов, изучать свойства и режимы почв по единым методикам, особенно при выполнении долгосрочных исследований.

Таблица 2

Содержание подвижного фосфора в чернозёме оподзоленном Тогучинского района НСО (Партия 1) со шкалой на экстрагирующем растворе (I) или воде (II), мг P/кг

Слой, см	Целина				Несмытая пахотная почва				Слабосмытая пахотная почва			
	I	II	Отклонения ¹		I	II	Отклонения		I	II	Отклонения	
			абс.	отн.			абс.	отн.			абс.	отн.
0-10	36,0	40,7	+4,7	12,3	32,4	36,7	+4,3	12,4	35,5	40,2	+4,7	12,3
10-20	33,4	37,9	+4,4	12,4	30,3	34,4	+4,1	12,5	31,9	36,1	+4,2	12,5
20-30	32,9	37,3	+4,4	12,4	28,3	32,1	+3,8	12,6	28,3	32,1	+3,8	12,6
30-40	29,8	33,8	+4,0	12,6	34,5	39,0	+4,5	12,4	28,3	32,1	+3,8	12,6
40-50	36,0	40,7	+4,7	12,3	39,6	44,8	+5,2	12,2	35,0	39,6	+4,6	12,3
Результаты статистической обработки экспериментальных данных ²												
М	33,6	38,1	Вывод: различия средних достоверны ($p < 0,01$)		33,0	37,4	Вывод: различия средних достоверны ($p < 0,01$)		31,8	36,0	Вывод: различия средних достоверны ($p < 0,01$)	
Различия	Контр.	4,5*			Контр.	4,4*			Контр.	4,2*		
s	2,6	2,9			4,4	4,9			3,5	3,9		
n	5	5			5	5			5	5		
НСР	0,38 (5%) 0,62 (1%)				0,64 (5%) 1,06 (1%)				0,51 (5%) 0,85 (1%)			
p	0,0000		0,0000		0,0000							

Примечание (здесь и далее в табл. 3-6).

1 – Отклонения рассчитаны в абсолютных (абс., мг P/кг) и относительных (отн., %) величинах. 2 – Представлены результаты дисперсионного анализа по сравнению данных с двумя способами подготовки растворов для шкалы на фосфор (I или II): М – среднее арифметическое значение (мг P/кг); s – стандартное отклонение (мг P/кг); n – размер выборки; p – вероятности ошибки; НСР – наименьшая существенная разница на уровне значимости 5 и 1% (мг P/кг). Контр. – Контроль. * – Разница превышает НСР (5%).

Таблица 3

Содержание подвижного фосфора в луговато-чернозёмной пахотной намытой почве Тогучинского района НСО (Партия 1) со шкалой на экстрагирующем растворе (I) или воде (II), мг P/кг

Параметры сравнения	Слой, см									
	0-10	10-20	20-30	30-40	40-50	50-60	60-70	70-90	90-130	
Шкала I	97,6	90,9	75,4	64,0	67,6	72,8	71,7	75,4	87,8	
Шкала II	109,6	102,0	84,7	72,0	76,0	81,8	80,7	84,7	98,6	
Отклонения: абс.	+12,0	+11,2	+9,3	+8,0	+8,4	+9,0	+8,9	+9,3	+10,8	
отн.	11,5	11,6	11,7	11,8	11,7	11,7	11,7	11,7	11,6	
Результаты статистической обработки экспериментальных данных										
Шкала	М	Различия	s	n	НСР	p	Вывод			
I	78,1	Контр.	11,4	9	1,03 (1%)	0,0000	Различия средних достоверны ($p < 0,01$)			
II	87,8	9,7*	12,7	9	1,49 (5%)					

Таблица 4

Содержание подвижного фосфора в чернозёме выщелоченном Искитимского района НСО (Партия 2) со шкалой на экстрагирующем растворе (I) или воде (II), мг P/кг

Слой, см	Целина				Пашня				Залежь			
	I	II	Отклонения		I	II	Отклонения		I	II	Отклонения	
			абс.	отн.			абс.	отн.			абс.	отн.
0-5	61,2	69,4	+8,2	12,6	95,3	108,0	+12,7	12,5	74,8	84,8	+10,0	12,5
5-10	51,4	58,4	+7,0	12,7	102,3	115,9	+13,6	12,5	81,5	92,4	+10,9	12,5
10-20	55,3	62,8	+7,5	12,6	108,2	122,5	+14,4	12,5	74,8	84,8	+10,0	12,5
20-30	66,6	75,5	+8,9	12,6	98,4	111,5	+13,1	12,5	82,5	93,5	+11,0	12,5
30-40	79,4	90,0	+10,6	12,5	137,4	155,6	+18,2	12,4	94,8	107,4	+12,6	12,5
Результаты статистической обработки экспериментальных данных												
М	62,8	71,2	Вывод: различия средних достоверны ($p < 0,01$)		108,3	122,7	Вывод: различия средних достоверны ($p < 0,01$)		81,7	92,6	Вывод: различия средних достоверны ($p < 0,01$)	
Различия	Контр.	8,4*			Контр.	14,4*			Контр.	10,9*		
s	10,9	12,4			17,0	19,2			8,2	9,3		
n	5	5			5	5			5	5		
НСР	1,74 (5%) 2,89 (1%)				2,75 (5%) 4,56 (1%)				1,33 (5%) 2,21 (1%)			
p	0,0002		0,0001		0,0000							

Таблица 5

Содержание подвижного фосфора в чернозёме выщелоченном Павловского района Алтайского края (Партия 3) со шкалой на экстрагирующем растворе (I) или воде (II), мг P/кг

Слой, см	Целина				Пашня				Залежь			
	I	II	Отклонения		I	II	Отклонения		I	II	Отклонения	
			абс.	отн.			абс.	отн.			абс.	отн.
0-5	79,4	89,5	+10,1	12,0	104,3	117,7	+13,4	12,1	119,3	134,8	+15,4	12,1
5-10	106,6	120,8	+14,2	12,5	108,1	122,3	+14,2	12,4	218,1	246,7	+28,6	12,3
10-20	72,3	81,8	+9,5	12,3	49,5	55,9	+6,4	12,2	188,3	212,9	+24,6	12,3
20-30	75,8	85,8	+9,9	12,3	33,3	37,6	+4,2	12,0	109,7	124,3	+14,6	12,5
30-40	134,9	152,7	+17,9	12,4	82,0	92,8	+10,8	12,3	81,0	91,6	+10,6	12,3
Результаты статистической обработки экспериментальных данных												
М	93,8	106,1	Вывод: различия средних достоверны ($p < 0,01$)		75,5	85,3	Вывод: различия средних достоверны ($p < 0,01$)		143,3	162,1	Вывод: различия средних достоверны ($p < 0,01$)	
Различия	Контр.	12,3*			Контр.	9,8*			Контр.	18,8*		
s	26,7	30,3			33,1	37,5			57,4	65,0		
n	5	5			5	5			5	5		
НСР	4,52 (5%) 7,49 (1%)				5,41 (5%) 8,97 (1%)				9,35 (5%) 15,51 (1%)			
p	0,0016			0,0073			0,0051					

Наличие аттестованных стандартных образцов, будь то почвенные, растительные или иные (в зависимости от специфики исследований) с известным химическим составом, является одним из необходимых условий для контроля качества анализов в учреждениях науки и высшего образования, в аккредитованных лабораториях и других организациях. В то же время, приобретение СО – достаточно затратное мероприятие. Поэтому подготовка собственной серии контрольных образцов почв достаточно большого объёма и их включение в анализы позволяет сокращать количество аналитических повторностей и экономить СО.

В пахотном горизонте (0-30 см) тёмно-серой лесной среднесмытой почвы, подготовленной в качестве контрольного образца, данные по содержанию подвижного фосфора были достаточно близкими между тремя партиями, проведёнными в разное время (табл. 6). Это подтверждает хорошую воспроизводимость результатов анализа по определению подвижного фосфора в почвах методом Чирикова. Результаты статистической обработки экспериментальных данных КО показали, что различия средних достоверны ($p < 0,01$).

Таблица 6

Содержание подвижного фосфора в контрольном образце почвы** (Партии 1-3) со шкалой на экстрагирующем растворе (I) или воде (II), мг P/кг

Слой, см	Партия 1				Партия 2				Партия 3			
	I	II	Отклонения		I	II	Отклонения		I	II	Отклонения	
			абс.	отн.			абс.	отн.			абс.	отн.
0-30	145,2	162,8	+17,5	11,4	143,3	162,3	+19,0	12,4	148,5	168,1	+19,6	12,4
Результаты статистической обработки экспериментальных данных												
Шкала	М	Различия	s	n	НСР	p	Вывод					
I	145,7	Контр.	2,6	3	2,55 (5%)	0,0010	Различия средних достоверны ($p < 0,01$)					
II	164,4	18,7*	3,2	3	5,88 (1%)							

Примечание.

** – в каждую партию включён контрольный образец почвы, подготовленный в достаточно большом объёме (измельчён и просеян через сито с диаметром ячеек 1 мм) с целью дополнительного контроля качества определений во время проведения массовых анализов в лаборатории агрохимии ИПА СО РАН.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведённые исследования показали, что результаты определения содержания подвижного фосфора в почвах зависят от способа подготовки калибровочных растворов (включая эталонный и рабочий) для шкалы на фосфор: на экстрагирующем растворе значения были в среднем в 1,1 раза ниже, чем на дистиллированной воде. Различия средних статистически достоверны ($p < 0,01$) во всех изученных почвах Новосибирской области и Алтайского края, независимо от того, целина это, пашня или залежь.

Все калибровочные растворы (включая эталонный и рабочий) для построения шкалы на фосфор должны быть как можно ближе по химическому составу к исследуемым вытяжкам, то есть готовить их лучше всего на том же экстрагирующем растворе, что и почвенные вытяжки. Необходимо обращать внимание на тонкости проведения почвенно-агрохимических анализов, изучать свойства и режимы почв по единым методикам, особенно при выполнении многолетних опытов или мета-анализа данных нескольких исследований.

Использование аттестованных стандартных образцов (СО) почв с известным химическим составом является одним из необходимых условий для контроля качества анализов. Подготовка собственной серии контрольных образцов почв достаточно большого объема и их включение в анализы позволяет сокращать количество аналитических повторностей и экономить СО, особенно при проведении массовых почвенно-агрохимических исследований.

БЛАГОДАРНОСТИ

Автор выражает благодарность сотрудникам ИПА СО РАН – Бугровской Г.А. за помощь в проведении лабораторно-аналитических работ; Смоленцевой Е.Н. – за предоставленные образцы чернозёма выщелоченного, отобранные в Новосибирской области и Алтайском крае и их общую характеристику; Наумовой Н.Б. – за консультации по статистической обработке данных и помощь в переводе. Автор также признателен рецензентам и другим сотрудникам ИПА СО РАН за советы и замечания, высказанные при обсуждении материалов рукописи, учёт которых позволил улучшить качество работы.

ФИНАНСОВАЯ ПОДДЕРЖКА

Работа выполнена в рамках государственного задания ИПА СО РАН при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (проект № 121031700309-1).

ЛИТЕРАТУРА

1. *Агрохимия: теория и практика исследований*: учеб. метод. пособие / Н.А. Мартынова, С.Г. Швецов. Иркутск: Издательство ИГУ, 2019. 301 с.
2. Аринушкина Е.В. *Руководство по химическому анализу почв*. Издание 2-е, перераб. и доп. М.: Издательство Московского университета, 1970. 487 с.
3. *ГОСТ 26204-91*. Почвы. Определение подвижных соединений фосфора и калия по методу Чирикова в модификации ЦИНАО. Москва: Издательство стандартов, 1992. 6 с.
4. Ильин В.Б. *Элементный химический состав растений*. Новосибирск: Наука, 1985. 128 с.
5. Кидин В.В. *Основы питания растений и применение удобрений*: учеб. пособие. Ч. I. М.: Изд-во РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева, 2008. 415 с.
6. *Классификация и диагностика почв СССР* / Составители: В.В. Егоров, В.М. Фридланд, Е.Н. Иванова, Н.Н. Розова, В.А. Носин, Т.А. Фриев. М.: Колос, 1977. 224 с.
7. Копосов Г.Ф. *Определение в почвах содержания азота, фосфора и калия*: учеб.-метод. пособие. Казань: Казан. ун-т, 2011. 362 с.
8. *Практикум по агрохимии*: Учеб. пособие. 2-е изд., перераб. и доп. / Под ред. академика РАСХН В.Г. Минеева. М.: Изд-во МГУ, 2001. 689 с.
9. *Практикум по агрохимическому анализу почв*: учеб. пособие. 3-е изд., перераб. и доп. СПб.: Изд-во С.-Петербург. ун-та, 2005. 88 с.
10. Ганжара Н.Ф., Борисов Б.А., Байбеков Р.Ф. *Практикум по почвоведению*. Под ред. д.б.н., проф. Н.Ф. Ганжары. М.: Агроконсалт, 2002. 280 с.
11. *Полевой определитель почв*. М.: Почвенный ин-т им. В.В. Докучаева, 2008. 182 с.
12. Радов А.С., Пустовой И.В., Корольков А.В. *Практикум по агрохимии*. Под общ. ред. А.С. Радов. Изд. 3-е, перераб. и доп. М.: Колос, 1978. 351 с.
13. Смоленцева Е.Н., Чумбаев А.С., Соколов Д.А., Соколова Н.А. *Почвы Предалатайской лесостепной провинции Западной Сибири (на примере Буготакского мелкосопочника)*: Путеводитель полевой почвенной экскурсии Всероссийской научной конференции с международным участием, посвященной 50-летию Института почвоведения и агрохимии СО РАН, «Почвы в биосфере» / под ред. Б.А. Смоленцева. Томск: Издательский дом ТГУ, 2018. 50 с.
14. Сорокин О.Д. *Прикладная статистика на компьютере*. 2-е изд. Новосибирск, 2012. 282 с.
15. *Теория и практика химического анализа почв* / Под ред. Л.А. Воробьевой М.: ГЕОС, 2006. 400 с.
16. Фомин Г.С., Фомин А.Г. *Почва. Контроль качества и экологической безопасности по международным стандартам*. Справочник. М.: Издательство «Протектор», 2001. 304 с.
17. Frank K., Beegle D., Denning J. Phosphorus. In Recommended Chemical Soil Test Procedures for the North Central Region. *North Central Regional Research Publication*. 2011. No. 221 (Revised). P. 21–30.

18. *IUSS Working Group WRB*. World Reference Base for Soil Resources. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. World Soil Resources Reports No. 106. FAO, Rome, 2014, update 2015. 181 p.

Поступила в редакцию 17.10.2022

Принята 09.12.2022

Опубликована 19.12.2022

Сведения об авторе:

Нечаева Таисия Владимировна – кандидат биологических наук, старший научный сотрудник лаборатории агрохимии ФГБУН Институт почвоведения и агрохимии СО РАН (г. Новосибирск, Россия), nechaeva@issa-siberia.ru

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи



Статья доступна по лицензии [Creative Commons Attribution 4.0 License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

INFLUENCE OF CALIBRATION SOLUTIONS ON THE RESULTS OF AVAILABLE PHOSPHORUS MEASUREMENT IN SOILS

© 2022 T. V. Nechaeva 

Institute of Soil Science and Agrochemistry of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia. E-mail: nechaeva@issa-siberia.ru

The aim of the study was to compare soil available phosphorus content as determined in a range of diverse soils using calibration solutions prepared with the extractant used for soil samples or distilled water.

Location and time of the study. Soil chemical analyses were performed in 2021 with 54 soil samples collected in 2018-2020 of the podsolised chernozem (Luvic Greyzemic Chernozem) and meadow-chernozemic podsolised soil (Luvic Greyzemic Chernozem Colluvic) in the Toguchin district of the Novosibirsk region, Russia, and leached chernozem (Luvic Chernozem) in the Iskitim district of the same region and Pavlovsky district in Altaisky krai, Russia. The samples were collected at undisturbed, arable and abandoned arable sites.

Methods. The method used to estimate available soil phosphorus content included extraction of phosphates by 0.5M acetic acid (1:25 soil:extractant ratio). Phosphate solutions (including both stock and working) for constructing the calibration curve were prepared either with the extractant or with the distilled water.

Results. The values of soil available phosphorus content were shown to depend on the composition of calibration solutions: when the extractant was used, the values were on average 1,1 times lower as compared with those obtained using the distilled water to construct the calibration curve. The difference was statistically significant ($p < 0,01$) for undisturbed, arable or abandoned arable soils.

Conclusions. Solutions used to construct calibration curves for phosphates, including the stock and working ones, should be close in their chemical composition to the solutions used to extract phosphates from soil and hence should be prepared with the same solution as used for extracting phosphates from soil. At the same time a researcher should follow a specific protocol chosen for the analysis. Therefore, the peculiarities of soil chemical analyses should be carefully considered and compared, especially in the long-term surveys or meta-analysis of the spatially and temporally varying data. The use of reference soil standards, both internal and certified external, with known chemical composition, is indispensable for controlling the quality of chemical measurements. Preparation of internal laboratory standard soil samples in sufficient amounts and their routine use in analyses allows to decrease the number of analytical replicates and is a prerequisite for improving laboratory performance and making justified conclusions about soil fertility.

Key words: Chernozem; available phosphorus; standard stock solution; working solution; calibration curve; photocolometric method; undisturbed soil; arable soil; abandoned arable soils; certified reference sample

How to cite: Nechaeva T.V. Influence of calibration solutions on the results of available phosphorus measurement in soils // *The Journal of Soils and Environment*. 2022. 5(4). e187. DOI: [10.31251/pos.v5i4.187](https://doi.org/10.31251/pos.v5i4.187) (in Russian with English abstract).

REFERENCES

1. *Agrochemistry: theory and practice of research: tutorial* / N.A. Martynova, S.G. Shvetsov. Irkutsk: Izdatel'stvo Irkutsk State University Publ., 2019, 301 p. (in Russian)
2. Arinushkina E.V. *Manual on chemical analysis of soils*. 2nd edition, revised and supplementary. Moscow: Moscow University Press, 1970, 487 p. (in Russian)
3. *GOST 26204-91*. Soils. Determination of mobile compounds of phosphorus and potassium by Chirikov method modified by CINAO. Moscow: Standard Publishing House, 1988, 6 p. (in Russian)
4. Ilyin V.B. *Elemental chemical composition of plants*. Novosibirsk: Nauka Publ., 1985, 128 p. (in Russian)
5. Kidin V.V. *Fundamentals of plant nutrition and fertilizer application: Tutorial*. Part I. Moscow: Publishing house of Russian Academy of Agricultural Sciences - Moscow State Agricultural Academy of K.A. Timiryazev, 2008, 415 p. (in Russian)
6. *Classification and diagnostics of Soils of the USSR* / Compiled by: V.V. Egorov, V.M. Friedland, E.N. Ivanova, N.N. Rozova, V.A. Nosin, T.A. Frieв. Moscow: Kolos Publ., 1977, 224 p. (in Russian)
7. Kopusov G.F. *Determination of nitrogen, phosphorus and potassium in soils: tutorial*. Kazan: Kazan University Publ., 2011, 362 p. (in Russian)
8. *Practicum in agrochemistry: Textbook*. 2nd ed., revised and supplemented. Mineev V.G. (ed.). Moscow: Moscow State University Press, 2001, 689 p. (in Russian)
9. *Practicum in agrochemical analysis of soils: Textbook*. 3rd edition, revised and supplemented. St. Petersburg: Publishing house of St. Petersburg University, 2005, 88 p. (in Russian)
10. Ganzhara N.F., Borisov B.A., Baybekov R.F. *Practicum in Soil Science*. Ganzhara N.F. (ed.). Moscow: Agroconsalt, 2002, 280 p. (in Russian)
11. *Field guide for Russian soil*. Moscow: Dokuchaev Soil Science Institute, 2008, 182 p. (in Russian)
12. Radov A.S., Pustovoy I.V., Korolkov A.V. *Practicum in agrochemistry*. Radov A.S. (general ed.). Edited 3th, revised and expanded. Moscow: Kolos Publ., 1978, 351 p. (in Russian)
13. Smolentseva E.N., Chumbaev A.S., Sokolov D.A., Sokolova N.A. *Soils of the Predalatai forest-steppe province of West Siberia (on the example of Bugotac Hill): Guidebook of soil excursion* All-Russian scientific conference with international participation, dedicated to the 50th anniversary of the Institute of Soil Science and Agrochemistry SB RAS, "Soils in the biosphere" / ed. by B.A. Smolentsev. Tomsk: TSU Publishing House, 2018, 50 p. (in Russian)
14. Sorokin O.D. *Applied statistics on the computer*. 2nd ed. Novosibirsk, 2012, 282 p. (in Russian)
15. *Theory and practice of chemical analysis of soils*. Edited by Vorobyeva L.A. Moscow: GEOS, 2006, 400 p. (in Russian)
16. Fomin G.S., Fomin A.G. *Soil. Inspection of quality and ecological safety according to International Standards*. Handbook. Moscow, Publishing House "Protector", 2001, 304 p. (in Russian)
17. Frank K., Beegle D., Denning J. Phosphorus. In Recommended Chemical Soil Test Procedures for the North Central Region. *North Central Regional Research Publication, 2011, No. 221 (Revised)*, p. 21–30.
18. *IUSS Working Group WRB*. World Reference Base for Soil Resources. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps, World Soil Resources Reports No. 106, FAO, Rome, 2014, update 2015, 181 p.

Received 17 October 2022

Accepted 09 December 2022

Published 19 December 2022

About the author:

Nechaeva Taisia Vladimirovna – Candidate of Biological Sciences, Senior Researcher in the Laboratory of Agrochemistry in the Institute of Soil Science and Agrochemistry of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Novosibirsk, Russia), nechaeva@issa-siberia.ru

The author read and approved the final manuscript



The article is available under [Creative Commons Attribution 4.0 License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)



ОБЗОР РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ ПОЧВЕННЫХ РАСТВОРОВ СОЛОНЦОВЫХ ПОЧВ

© 2022 В. В. Попов 

ФГБУН Институт почвоведения и агрохимии СО РАН, проспект Академика Лаврентьева, 8/2, г. Новосибирск, 630090, Россия. E-mail: popov@issa-siberia.ru

В статье приведен обзор основных результатов исследований, посвященных изучению почвенных растворов солонцовых почв, полученных с помощью методов центрифугирования, отпрессовывания, вытеснения замещающей жидкостью и лизиметрии. Ввиду методических и технических трудностей, связанных с извлечением раствора из плотных горизонтов солонцовых почв, опубликованные работы по этой проблематике немногочисленны и посвящены, главным образом, генетическим и галохимическим вопросам. Тем не менее, в последнее время растет интерес к исследованиям, находящимся на стыке почвенного генезиса и гидрогеологии, способствующим лучшему пониманию функционирования почвенных процессов с учетом особенностей ландшафта. Учитывая то, что многие вопросы генезиса и мелиорации солонцов остаются открытыми, изучение почвенных растворов солонцовых почв является весьма актуальным и необходимым.

Ключевые слова: почвенный раствор; солонец; засоленные почвы; жидкая фаза почв; центрифугирование; лизиметрия

Цитирование: Попов В.В. Обзор результатов исследований почвенных растворов солонцовых почв // Почвы и окружающая среда. 2022. Том 5. № 4. с189. DOI: [10.31251/pos.v5i4.189](https://doi.org/10.31251/pos.v5i4.189)

В почвенных растворах или с их участием происходят процессы растворения и выщелачивания, разрушения и синтеза вторичных минералов, органических веществ, органоминеральных соединений, миграция химических элементов по профилю почвы. Эти процессы в значительной степени определяют формирование тех или иных генетических горизонтов почв. Невозможно достаточно полно описать почвообразующий процесс, не зная состава почвенных растворов, условий их существования и характер взаимодействия с другими компонентами ионно-солевого комплекса. Понимание состава и свойств почвенных растворов имеет определяющее значение при изучении засоления и осолонцевания почв (Duarte, Souza, 2016; Hossain et al., 2020), а также оценке пула питательных веществ для растений (Böckmann et al., 2021).

Изучение же почвенных растворов засоленных, в частности, солонцовых почв, где кроме влажности и состава растворов, важную роль играет их высокая концентрация, имеет большое значение для правильного понимания генезиса этих почв и выбора мелиоративных мероприятий, обеспечивающих благоприятные условия роста и развития растений.

Несмотря на то, что изучение почвенных растворов солонцов широко распространено, как в России, так и за рубежом, почти все эти работы (Miller, Brierley, 2011; Синявский, 2016; Окорков, 2020) основаны на методах имитации раствора (водные вытяжки и насыщенные водой почвенные пасты). Для приготовления водных вытяжек и почвенных паст к сухой навеске почвы добавляется количество воды, как правило, многократно превышающее таковое в реальной почве. Данные методы обладают рядом преимуществ, таких как простота приготовления, хорошая воспроизводимость, обширная база данных накопленных результатов. Метод насыщенных водой почвенных паст в зарубежной практике нередко считается эталонным (Alves et al., 2022). Однако, известно, что нарушение сложения почвы при подготовке образцов, высушивание и повторное увлажнение, короткое время взаимодействия почвы и влаги не отвечает реальным условиям формирования почвенных растворов. В результате, ионный состав получаемого почвенного раствора изменяется настолько, что становится фактически несравнимым с имеющимся в естественных условиях (Bresler et al., 1982; Сеньков; 1991, Vonito, 2005). Вместе с тем, считается, что естественному почвенному раствору наиболее полно соответствуют растворы, полученные отпрессовыванием, центрифугированием или вытеснением спиртом при естественной влажности почв (Шоба, Сеньков, 2011). Работы, посвященные изучению почвенных растворов солонцовых почв при естественной влажности, немногочисленны, так как подобные исследования сопряжены с трудностями, связанными, прежде всего, с извлечением раствора из плотного иллювиального горизонта этих почв. В данной статье приведен краткий обзор основных результатов

исследований, посвященных изучению почвенных растворов солонцовых почв, полученных с помощью центрифугирования, отпрессовывания, вытеснения замещающей жидкостью и лизиметрии, поскольку именно эти методы являются наиболее предпочтительными в генетических и галохимических исследованиях почвенных растворов.

Одной из первых фундаментальных работ, рассматривающих результаты исследований почвенных растворов засоленных почв, является работа Ковды В.А. «Происхождение и режим засоленных почв» (Ковда, 1946). Автором, совместно с Шаврыгиным П.И. и Гевельсон Т.А., были изучены почвенные растворы засоленных почв и некоторых незасоленных фоновых почв на территории Центральной Ферганы и Голодной степи. На основе многолетних стационарных исследований Ковда В.А. выявил основные закономерности миграции легкорастворимых солей, растворенных карбонатов и гипса. Он проследил изменение состава солей в почвенных растворах в зависимости от их концентрации, описал динамику солей в растворах и влияние полива на их состав. Им была предложена теория генезиса и современного развития засоленных почв, а также разработана одна из первых шкал оценки засоления почв по концентрации солей в почвенных растворах для почв хлопкосеющей зоны. Было установлено, что минерализация почвенных растворов, равная 3-5 г/л, соответствует незасоленным почвам (оптимальна для культуры хлопчатника на орошаемых почвах), концентрация солей 5-6 г/л соответствует слабому засолению, при содержании солей 10-12 г/л наступает сильное угнетение, а при 12-20 г/л и выше очень сильное угнетение хлопчатника (Ковда, 1946).

Шаврыгин П.И. (1963) исследуя почвенные растворы и грунтовые воды Центральной Барабы, в том числе и под корково-столбчатым солонцом, показал зависимость концентрации и состава солей почвенных растворов и грунтовых вод от количества осадков. Во влажный год растворы почвы менее минерализованы, а грунтовые воды более минерализованы, чем в сухой год, так как почвенные растворы сбрасывают соли в грунтовые воды. В засушливый год ситуация обратная, по причине капиллярного перемещения солей из грунтовых вод в верхние горизонты. Причем такая тенденция сохраняется и для корково-столбчатого солонца, несмотря на то, что его плотный иллювиальный горизонт препятствует промачиванию. По данным анализа водной вытяжки, которые приводит автор, проследить такую закономерность не представляется возможным.

Комарова Н.А. (1968) сравнивая химический состав почвенных растворов солонцов, полученных методом отпрессовывания и методом вытеснения этиловым спиртом, заключила, что данные методы позволяют получать находящийся в этих почвах раствор без изменения его состава. Химический анализ растворов в отношении сухого остатка, а также ионов HCO_3^- , Cl^- , SO_4^{2-} , Ca^{2+} , Mg^{2+} показал их однородность. Сравнивая эти два метода, автор указывает, что метод вытеснения этиловым спиртом дает возможность получать раствор из почв с более низким содержанием влаги, однако, необходимость предварительного смешивания почвы с песком в ряде случаев может привести к смещению равновесия в почвенном растворе. Метод отпрессовывания не требует смешивания почвенного образца с песком, но он плохо применим к почвам с низкой влажностью. Хотя позднее в процессе использования метода отпрессовывания, Сеньковым А.А. (2004) было сделано несколько технических усовершенствований, которые позволили в несколько раз увеличить скорость выделения почвенного раствора, достаточного для проведения анализа химического состава почв без ограничения диапазона их естественного увлажнения.

Семендяева Н.В. и Воропаева З.И. (1971) проводили изучение подвижного железа в почвенных растворах по профилю солонцов и фоновых почв лесостепи Омской области. Было установлено, что в почвенном растворе солонцов наибольшее количество железа приходится на элювиальный горизонт, что, в свою очередь, указывает на поверхностное оглеение за счёт атмосферных осадков, а не почвенно-грунтовых вод. Вниз по профилю содержание железа стремительно уменьшается, по-видимому, вследствие слабой фильтрации иллювиально-глинистых горизонтов солонцов. В лугово-черноземной почве тенденция распределения подвижного железа противоположна солонцам, то есть с глубиной его количество увеличивается. При сравнении содержания подвижного железа в почвенных растворах было выявлено, что в многонатриевых солонцах его меньше относительно малонатриевых.

Помимо этого, Воропаева З.И. (1982) исследовала почвенные растворы мелиорированных солонцов Омской области. Было установлено, что по причине значительной пульсации солей в грунтовых водах и в профиле почв, происходит дестабилизация состава обменных оснований мелиорированных солонцов и постепенное восстановление природных взаимосвязей между

основными показателями свойств этих почв. В кислованных солонцах это происходит за 6-7 лет, а в гипсованных – 12-15 лет. Вследствие медленной растворимости и высоких запасов Ca^{2+} , гипс дольше играет роль стабилизатора предотвращения вторичного осолонцевания, по сравнению с серной кислотой. Уместно добавить, что Н.В. Семендяева и Н.В. Елизаров (2017), изучавшие длительное действие фосфогипса на солонцовые почвы, установили положительное влияние мелиоранта на физические, физико-химические и химические свойства почвы в течение 30 лет. Вместе с тем, после резкого повышения уровня грунтовых вод (до 50 см) произошло вторичное засоление почв. Поэтому авторы делают вывод, что химическая мелиорация (фосфогипсом) имеет положительное влияние только при сравнительно стабильном уровне залегания грунтовых вод.

Воропаева З.И. (1990) выявила, что главными факторами, регулирующими содержание Na^+ в ППК, является степень засоления, отношение Na^+ к сумме Ca^{2+} и Mg^{2+} , режим общей и карбонатной щёлочности в почвенном растворе.

Проведенное на основе сопряженного изучения водных вытяжек и почвенных растворов исследование Зимовца Б.А. и Кауричевой З.Н. (1976) позволило уточнить химизм и степень засоления солонцовых и каштановых почв. В результате данного исследования была разработана классификация (таблица) засоления почв сухостепной зоны по концентрации и составу солей в почвенных растворах.

Таблица

Степень засоления тяжелосуглинистых почв Нижнего Заволжья по концентрации солей в почвенных растворах при влажности, соответствующей ПВ, г/л (Зимовец, Кауричева, 1976)

Степень засоления почв	Состав солей	
	хлоридный	сульфатный
Незасолённые	< 2,1	< 2,5
Слабозасолённые	2,1–4,5	2,5–5,4
Среднезасолённые	4,5–8,2	5,4–10,9
Сильнозасолённые	8,2–20,6	10,9–21,7
Очень сильнозасолённые	> 20,6	> 21,7

Зимовец Б.А. (1981) провел многолетние наблюдения за составом и концентрацией почвенных растворов орошаемых солонцов Заволжья, а также полевые опыты с литием в качестве метки. Это позволило ему обосновать положение, что в засолении почв солонцовых комплексов важную роль играют процессы внутрипочвенной пространственной (в том числе горизонтальной) миграции солей в зоне аэрации от лугово-каштановых почв микропонижений рельефа к микроповышениям (солонцам). Данная миграция солей приводит к формированию солонцовых комплексов. В пределах солонцового пятна легко растворимые соли мигрируют от периферии к центру (Зимовец, 1984).

Исследуя почвенные растворы солонцовых почв Ростовской области, Минкин М.Б. и Ендовицкий А.П. (1978) большое внимание уделили карбонатно-кальциевому равновесию. Их исследования показали, что значительная перенасыщенность почвенных растворов карбонатом кальция связана с образованием ионных пар CaCO_3 , CaHCO_3 , MgCO_3 , MgHCO_3 , NaCO_3 и влиянием ионной силы раствора. Принимая во внимание эти факторы, почвенные растворы степных солонцов, как правило, оказываются ненасыщенными, а луговых и лугово-степных – перенасыщенными CaCO_3 . Эти авторы также указывают, что сульфатно-кальциевый резерв для нейтрализации соды в значительной степени определяется состоянием карбонатно-кальциевой системы. Поэтому, при расчётах количества гипса, необходимого для нейтрализации соды, следует знать возможное предельное значение перенасыщения растворов CaCO_3 , при котором наступает химическое осаждение. Аналогично складывается ситуация с содоустойчивостью почв: чем выше возможная предельная величина перенасыщения, при которой начинается выделение CaCO_3 , тем ниже содоустойчивость. Вследствие этого, содоустойчивость луговых солонцов гораздо ниже, чем степных (Минкин, Ендовицкий, 1978).

Другое исследование этих авторов (Ендовицкий, Минкин, 1986) дало возможность смоделировать механизм воздействия ассоциации ионов на протонное равновесие карбонатной системы, а также вскрыть ведущую роль ассоциации в формировании условно-перенасыщенных растворов CaCO_3 . Помимо этого, результаты данной работы определили те первоочередные

проблемы, которые необходимо решить для совершенствования модели карбонатно-кальциевой системы почвенных растворов.

Ендовицким А.П. с соавторами (2009) проведены термодинамические расчёты содержания тяжёлых металлов (Pb и Cd) в почвенных растворах лугового и лугово-степного солонцов юга европейской части России. Было установлено, что активность свинца и кадмия во много раз ниже общей концентрации этих металлов в растворе, по причине ассоциации Pb^{2+} и Cd^{2+} с карбонатными и другими анионами и образования $PbOH^+$ и $CdOH^+$. Это является одной из причин низкого поступления данных катионов в растения на карбонатных почвах.

Благодаря комплексному изучению Быстрицкой Т.Л. с соавторами (1988) солонцевато-слитых черноземов, включая и почвенные растворы, была обоснована неэффективность химической мелиорации и доказано её отрицательное влияние на данные почвы. Это связано с тем, что мелиорация направлена на коррекцию структуры ППК, а главные отрицательные свойства этих почв, как утверждают авторы, заключаются в их слитоземной природе, для ликвидации которой нужны принципиально иные мелиоративные приемы. Неэффективность химической мелиорации, возможно, является региональной особенностью данных слитых почв, так как другие исследователи (Воропаева и др., 2011; Семендяева и др., 2014), изучавшие влияние химической мелиорации на свойства солонцов Западной Сибири в течение длительного времени, отмечают, напротив, эффективность мелиорации даже при её однократном применении.

Для прогнозирования реальной концентрации и химического состава почвенного раствора в различном диапазоне влажности почвы проводилось изучение почвенных растворов солонцовых почв (Csillag, Redly, 1989). Состав и концентрация почвенных растворов сравнивали с экстрактами насыщенных почвенных паст. Было показано, что при повышении содержания влаги увеличивается количество $NaHCO_3$ в растворе. С уменьшением влажности почвы концентрация ионов и степень электростатических взаимодействий в растворе увеличиваются. Авторами установлена зависимость концентраций ионных пар и активности свободных ионов от влажности почвы и доказано, что вычисленные значения активности свободных ионов Na^+ , Cl^- , Ca^{2+} , Mg^{2+} хорошо согласуется с данными, полученными при измерении ионоселективными электродами при различной влажности почвы.

В другом исследовании (Csillag et al., 1995) показано, что в результате электростатических взаимодействий ионов реальное значение SAR (sodium adsorption ratio) в засоленных почвах (солонцах) выше, чем определяется в экстрактах почвенных паст. С увеличением влажности почвы этот показатель падает, например, при приготовлении водной вытяжки. Увеличение абсолютной и относительной концентраций натрия в почвенном растворе с уменьшением влажности почвы смещает процессы ионообмена в пользу натрия, тем самым способствуя процессам солонцеобразования.

Сеньков А.А. (2004), проведя сопряженный анализ почвенных растворов и твёрдой фазы степных почв юга Ишимской равнины, выразил сомнение по поводу общеизвестной эволюционной схемы: многонатриевые солонцы → малонатриевые солонцы → зональные почвы. Он предположил, что для данной территории более вероятным является обратное направление эволюции: южный чернозем → солонцеватый чернозем → малонатриевый солонец. В своем исследовании автор высказывает предположение о ведущей роли атмосферных осадков в формировании солевых профилей и пород зоны аэрации Ишимской равнины. Согласно этому концепции, в процессе почвообразования легкорастворимые соли, содержащиеся в материнских породах, были заменены или дополнены солями атмосферных осадков.

В других работах (Сеньков, 2005; Сеньков, Попов, 2017), при сравнении почвенных растворов солонцов с рядом расположенными незасоленными почвами, делается предположение о негалломорфном происхождении солонцов. В незасоленной части профиля зональных почв на месте будущего солонцового горизонта происходит накопление и синтез гидрофильных коллоидов и высокомолекулярных соединений под действием элювиально-иллювиальных процессов. Параллельно с этими процессами в иллювиальном горизонте увеличивается плотность и слитизация в результате набухания и усадки. Вследствие уменьшения фильтрационной способности формирующегося солонцового горизонта ухудшается солевая вентиляция, что приводит к активизации соленакопления в верхних горизонтах почвы, как за счет атмосферных солей, так и солей нижних, ранее засоленных горизонтов. В этом случае обменный натрий является не причиной процесса осолонцевания, а его следствием.

Славный Ю.А. (2003), изучая почвенные растворы солонцовых почв Прикаспийской низменности и граничащих с ней возвышенностей (Приволжской, Ергенинской и Сыртов), установил два главных типа галогенеза данной территории. Химический анализ почвенных растворов показывает, что почвам автоморфных ландшафтов присущ хлоридный тип, а почвам полугидроморфных и гидроморфных ландшафтов – сульфатный тип засоления. Такие отличия в химизме автор объясняет разными доминирующими источниками поступления солей в почвы. В условиях автономного почвообразования, соли в почвы поступают только из атмосферных осадков и пыли, а стадия засоления от грунтовых вод отсутствовала. При этом автор указывает, что последующее рассоление засоленных почв и образование солонцов произошло по классической теории Гедройца К.К. По причине продолжающегося процесса рассоления, площади засоленных солонцовых почв уменьшаются (Славный, 2001).

Принципиально иной химизм почвенных растворов гидроморфных и полугидроморфных территорий. Здесь главным источником солей являются грунтовые воды, а тип засоления растворов сульфатно-натриевый ($\text{Na}^+ > \text{Cl}^-$, но $\text{Na}^+ < \text{Cl}^- + \text{SO}_4^{2-}$). В гидрогенных условиях, эоловый источник, как правило, играет подчиненную роль, но может иметь и доминирующее значение. Например, в специфических природных условиях Центральной Якутии и Западной Сибири, в которых с повышенных элементов рельефа происходит приток солей эолового генезиса в понижения поверхностным и внутрипочвенным стоком (Славный, 2005).

При изучении почвенных растворов солонцов Венгрии на территории Куманской равнины (Sinka et al., 2019), исследователи использовали 12 дренажных лизиметров, половину из которых орошали засоленной колодезной водой, другую половину – дистиллированной. При этом авторам важно было изучить возможности выращивания солечувствительной культуры (*Phaseolus vulgaris*) в районах с неблагоприятными агроэкологическими условиями. На основании полученных данных авторы делают вывод, что орошение почвы соленой водой должно быть строго дозировано потребностью выращиваемой культуры. Чрезмерное орошение увеличивает риск вторичного засоления, избежать которое возможно при правильной частоте полива, а также применяя почвенный кондиционер. При этом на солонцовых почвах меньшая частота полива и кондиционирование почвы привели к повышению урожайности и улучшению морфологических свойств выращиваемой культуры.

Изучая ассоциации ионов в почвенном растворе каштановых солонцов юга России (Batukaev et al., 2016), исследователи делают вывод, что при высокой ионной силе в почвенном растворе образуются электронейтральные пары ионов CaCO_3 , CaSO_4 , MgCO_3 , MgSO_4 , а также пары заряженных ионов CaHCO_3^+ , MgHCO_3^+ , NaCO_3^- , NaSO_4^- , CaOH^+ , MgOH^+ . Ассоциации ионов показывают, что термодинамические предпосылки осаждения CaCO_3 в зоне аэрации почвы возникают при значительно более высокой концентрации ионов Ca^{2+} и CO_3^{2-} в почвенном растворе, чем считалось ранее. Следовательно, существует значительная вероятность высокой подвижности CaCO_3 в ландшафте, что ранее недооценивалось. Миграция углерода из почвы через зону аэрации связана с высокой подвижностью углерода в форме карбонатов в почвенном растворе, так как почвенные геохимические барьеры для карбонатов, вероятно, недостаточно устойчивы.

Попов В.В. (2019) провел полнопрофильное исследование зональных особенностей состава и свойств почвенных растворов солонцовых почв Ишимской равнины. Им показано, что с севера на юг территории наблюдается увеличение общей минерализации почвенных растворов от 3 г/л в северной лесостепи до 20 г/л в степной зоне за счёт увеличения количества хлоридных и сульфатных солей. Вместе с этим, в широтном плане изменяется и химизм засоления. Выявлено, что по соотношению катионов в почвенных растворах во всех солонцовых почвах преобладает Na^+ . Его доля среди других катионов варьирует от 46 до 98%. Вместе с тем, в зональном аспекте с увеличением аридности климата наблюдается снижение доли Na^+ и увеличение доли Ca^{2+} (до 15%) и, особенно, Mg^{2+} (до 37%). Вследствие изменения химического состава почвенных растворов в пределах Ишимской равнины, содовые солонцы на севере территории сменяются солонцами нейтральными на юге. Показано, что химический состав и концентрация почвенных растворов определяют долю Ca^{2+} и долю Na^+ в ППК почвы. Установлена тесная взаимосвязь между содержанием катионов Ca^{2+} ($R^2 = 0,9$) и Na^+ ($R^2 = 0,8$) в почвенном растворе и их содержанием в ППК всех исследуемых почв.

При исследовании почв сухой степи (Kalinichenko et al., 2021), авторами был проведен модельный эксперимент по определению термодинамического состояния основных компонентов

солей в почвенном растворе солонцовых почв. Ионная сила почвенного раствора была низкой в верхних горизонтах почвы (0-10, 20-30 см), где преобладали свободные ионы, но высокой в переходных горизонтах (глубина 30-40, 40-50, 60-70 см) и в материнской породе (глубина 140-150, 170-180 см). Значительная часть ионов Ca^{2+} , Mg^{2+} и SO_4^{2-} присутствовала в виде ассоциированных ионных пар. Содержание CO_3^{2-} в ионных парах превышало содержание ионов в свободной форме в 5,5–7,0 раз. Ассоциация ионов Na^+ и HCO_3^- была незначительной во всех почвенных горизонтах; также не было выявлено и ассоциации ионов Cl^- . На основе математического моделирования проведена количественная оценка содержания и режима свинца в почвенном растворе. Доля ассоциатов Pb в почвенном растворе составляла 75-80% для Ca^{2+} и 60-70% для Mg^{2+} . Содержание ассоциированных анионов достигало для карбонатов 92-98%, а для сульфатов – 65-75%. Основная доля связанных ионов Pb^{2+} находилась в виде гидроксокомплексов PbOH^+ и $\text{Pb}(\text{OH})_2$ – до 90–95%. Количество карбонатных ассоциатов $\text{PbCO}_3 + \text{Pb}(\text{CO}_3)_2^{2-}$ и гидрокарбонатных ассоциатов PbHCO_3^+ были ниже содержания гидроксокомплексов в 20–30 раз. Расчетная активность иона Pb^{2+} в почвенном растворе составила менее 3%. Вероятность неконтролируемого переноса и накопления свинца в почве и зоне аэрации оказалась высокой.

Таким образом, работы, посвященные изучению почвенных растворов солонцовых почв естественной влажности, весьма немногочисленны. В виду трудностей, связанных с извлечением раствора из плотных горизонтов солонцовых почв, имеющиеся работы в основном посвящены генетическим и галохимическим вопросам. Развитие технологий и совершенствование методик изучения почвенных растворов, в целом, не решили эти методологические трудности. Вероятно поэтому изучение почвенных растворов солонцов не получило широкого развития. Тем не менее, в последнее время растет интерес к исследованиям, находящимся на стыке почвенного генезиса и гидрогеологии для лучшего понимания почвы, как компонента ландшафта (Narashimhan, 2005; Schoeneberger, Wysocki, 2005; Linn, 2009). Принимая во внимание то, что многие ключевые вопросы генезиса и мелиорации солонцов остаются открытыми (Miller, Brierley, 2011; Минкин и др., 2012; Яцынин, 2012), изучение почвенных растворов солонцовых почв следует активно развивать.

ФИНАНСОВАЯ ПОДДЕРЖКА

Работа выполнена по государственному заданию ИПА СО РАН при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект № 121031700316-9) и при поддержке РФФИ (грант № 21-55-75002).

ЛИТЕРАТУРА

1. Быстрицкая Т.Л., Губин С.В., Тюльпанов В.И., Скрипниченко И.И. Влияние химической мелиорации на свойства солонцевато-слитых черноземов Ставрополя // *Почвоведение*. 1988. № 11. С. 108–118.
2. Воропаева З.И. Участие грунтовых вод в перераспределении продуктов обмена при химической мелиорации солонцов // Труды Омского сельскохозяйственного института. Омск, 1982. С. 10–17.
3. Воропаева З.И. Особенности солевого режима и динамики оснований мелиорированных солонцов Западной Сибири: Автореф. дисс. ... к.б.н. Новосибирск, 1990. 22 с.
4. Воропаева З.И., Троценко И.А., Парфенов А.И. Изменение свойств коркового солонца содового засоления при проведении однократной и повторной мелиорации фосфогипсом // *Почвоведение*. 2011. № 3. С. 346–357.
5. Ендовицкий А.П., Калинин В.П., Ильин В.Б., Иваненко А.А. Коэффициенты ассоциации и активность ионов кадмия и свинца в почвенных растворах // *Почвоведение*. 2009. № 2. С. 218–225.
6. Ендовицкий А.П., Минкин М.Б. Современные проблемы термодинамики карбонатной системы почвенных растворов // *Почвоведение*. 1986. № 11. С. 76–88.
7. Зимовец Б.А. Распределение солей в почвах солонцовых комплексов // *Почвоведение*. 1981. № 1. С. 126–135.
8. Зимовец Б.А. Засоленные почвы сухостепной зоны Поволжья и их освоение: Автореф. дисс. ... д-ра с.-х. наук. М., 1984. 52 с.
9. Зимовец Б.А., Кауричева З.Н. Определение степени и типа засоления почв по почвенным растворам и водным вытяжкам в сухостепной зоне Нижнего Заволжья // *Орошаемые почвы и методы их изучения*. Ташкент, 1976. С. 72–83.
10. Ковда В.А. Происхождение и режим засоленных почв. М.-Л.: Изд-во АН СССР, 1946. Т.1. 573 с.
11. Комарова Н.А. Методы выделения почвенных растворов. Сборник: Физико-химические методы исследования почв. Наука, 1968. С. 7–31.
12. Минкин М.Б., Ендовицкий А.П. Карбонатно-кальциевое равновесие в почвенных растворах солонцов // *Почвоведение*. 1978. № 9. С. 125–132.

13. Минкин Т.М., Ендовицкий А.П., Калининченко В.П., Федоров Ю.А. *Карбонатно-кальциевое равновесие в системе вода-почва*. Ростов-на-Дону: Издательство Южного федерального университета, 2012. 376 с.
14. Окорков В.В. О факторах пептизируемости солонцовых почв // *Владимирский земледелец*. 2020. № 4 (94). С. 21–32. DOI: 10.24411/2225-2584-2020-10141.
15. Попов В.В. *Зональные изменения почвенных растворов солонцовых почв Ишимской равнины*. Дисс. ... к.б.н. Новосибирск, 2019. 177 с.
16. Семендяева Н.В., Воропаева З.И. *Соотношение между почвенными растворами и водными вытяжками из мало- и многонатриевых солонцов лесостепи Омской области* // Труды Омского сельскохозяйственного института. Омск, 1971. № 93. С. 87–92.
17. Семендяева Н. В., Елизаров Н.В. Солевой состав грунтовых вод и длительно мелиорированных солонцов Барабы // *Почвоведение*. 2017. № 10. С. 1220–1228. DOI: 10.7868/S0032180X17100100
18. Семендяева Н.В., Коробова Л.Н., Елизаров Н.В. Изменение свойств и биологической активности солонцов корковых Барабинской низменности при длительном действии гипса // *Почвоведение*. 2014. № 11. С. 1325. DOI: 10.7868/S0032180X14110112
19. Сеньков А.А. *Ионно-солевой состав почвенных растворов и водных вытяжек* // Почвообразование и антропогенез: структурно-функциональные аспекты. Новосибирск: Наука, 1991. С. 156–167.
20. Сеньков А.А. *Галогенез степных почв (на примере Ишимской равнины)*. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2004. 152 с.
21. Сеньков А.А. Генезис степных солонцов // *Вестник Томского государственного университета*. 2005. № 15. С. 123.
22. Сеньков А.А., Попов В.В. Генезис солевого профиля солонцовых почв юга Ишимской равнины // *Вестник Новосибирского государственного аграрного университета*. 2017. № 1. С. 107–115.
23. Синявский И.В. Солевой режим почв лесостепного Зауралья // *АПК России*. 2016. Т. 75. № 1. С. 186–194.
24. Славный Ю.А. К теории образования автоморфных солонцов // *Почвоведение*. 2001. № 5. С. 517–521.
25. Славный Ю.А. Галогенез Нижнего Поволжья // *Почвоведение*. 2003. № 1. С. 3–12.
26. Славный Ю.А. Эоловое соленакопление в почвах автономных ландшафтов засушливых зон // *Почвоведение*. 2005. № 4. С. 389–397.
27. Шаврыгин П.И. О токсичности концентраций почвенных растворов в Барабинской низменности // *Почвоведение*. 1963. № 1. С. 85–92.
28. Шоба В.Н., Сеньков А.А. Равновесный состав и свойства растворов почв // *Почвоведение*. 2011. № 10. С. 1168–1177.
29. Яцынин М.Н., Яцынин Н.Л. *Противоречия мицеллярной теории естеству генезиса и мелиорации солонцов*. Сб. научных трудов SWorld. Одесса: 2012. Т. 45. С. 88.
30. Alves A., Souza E., Melo H., Pinto J., Junior F., Júnior V., Marques F., Santos M., Schaffer B., Gheyi H. Comparison of solution extraction methods for estimating electrical conductivity in soils with contrasting mineralogical assemblages and textures // *Catena*. 2022. Vol. 218. No. 3. P. 106581. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2022.106581>
31. Batukaev A.-M., Endovitsky A., Andreev A., Kalinichenk, V., Minkina T., Dikaev Z., Mandzhieva S., Sushkova S. Ion association in water solution of soil and vadose zone of chestnut saline solonetz as a driver of terrestrial carbon sink // *Solid Earth*. 2016. No. 7. P. 415–423. <https://doi.org/10.5194/se-7-415-2016>, 2016.
32. Böckmann S., Titov I., Gerken M. Extraction of Soil Solution into a Microfluidic Chip // *AgriEngineering*. 2021. Vol. 3. P. 783–796. DOI: 10.3390/agriengineering3040049.
33. Bonito M.D. *Trace elements in soil pore water: a comparison of sampling methods*. Theses of PhD, University of Nottingham, England, 2005. 298 p.
34. Bresler E., McNeal B.L., Carter D.L. *Saline and Sodic Soils: Principles-Dynamics-Modeling*. Springer Berlin Heidelberg, 1982. 236 p.
35. Csillag J., Toth T., Redly M. Relationships between soil solution composition and soil water content of Hungarian salt-affected soils // *Arid Soil Research and Rehabilitation*. 1995. Vol. 9. No. 3. P. 245–260. DOI: 10.1080/15324989509385893.
36. Csillag J., Rédly M. Study of the liquid phase of the soil as a multicomponent electrolyte solution // *Agrokémia és Talajtan*. 1989. Vol. 38. P. 657–673. http://real.mtak.hu/97816/1/at_1989_38_3-4_657-673.pdf (дата обращения 10.12.2022)
37. Duarte H.H.F., Souza E.R. Soil Water Potentials and Capsicum annum L. under Salinity // *Revista Brasileira de Ciência do solo*. 2016. Vol. 40. P. e0150220. DOI: 10.1590/18069657rbc20150220.
38. Hossain M.S., Rahman G.M., Solaiman A.R.M., Alam M.S., Rahman M.M., Mia M.B. Estimating electrical conductivity for soil salinity monitoring using various soil-water ratios depending on soil texture // *Communications in Soil Science and Plant Analysis*. 2020. Vol. 51. No. 5. P. 635–644. <https://doi.org/10.1080/00103624.2020.1729378>
39. Kalinichenko V., Glinushkin A., Swidsinski A., Minkina T., Andreev A., Mandzhieva S., Sushkova S., Makarenkov D., Ilyina, L., Chernenko V., Zamulina I., Larin G., Gudkov S. Thermodynamic mathematical model of the Kastanozem complex and new principles of sustainable semiarid protective silviculture management // *Environmental Research*. 2021. No. 194. P. 110605. DOI: 10.1016/j.envres.2020.110605.

40. Linn H.S. Earth's critical zone and hydrogeology: concepts, characteristics, and advances // *Hydrology & Earth System Sciences Discussions*. 2009. Vol. 6. P. 3417–3481. <https://hess.copernicus.org/preprints/6/3417/2009/hessd-6-3417-2009.pdf> (дата обращения 10.12.2022)
41. Miller J., Brierley J. Solonchic soils of Canada: Genesis, distribution, and classification // *Canadian Journal of Soil Science*. 2011. Vol. 91. P. 889–902. DOI: 10.4141/cjss10040.
42. Narashimhan T.N. Pedology: a hydrogeological perspective // *Vadose Zone Journal*. 2005. Vol. 4. P. 891–898.
43. Sinka L., Takacs-Hajos M., Czeller K., Tuba G., Zsembeli J. Investigation of the possibility of green bean production under unfavourable agro-ecological conditions in lysimeters // *Acta Universitatis Sapientiae, Agriculture and Environment*. 2019. Vol. 11. P. 72–82. DOI: 10.2478/ausae-2019-0007.
44. Schoeneberger P.J., Wysocki D.A. Hydrology of soils and deep regolith: a nexus between soil geography, ecosystems and land management // *Geoderma*. 2005. Vol. 126. P. 117–128. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2004.11.010>

Поступила в редакцию 21.10.2022

Принята 15.11.2022

Опубликована 15.12.2022

Сведения об авторе:

Попов Владимир Викторович – кандидат биологических наук, младший научный сотрудник лаборатории географии и генезиса почв Института почвоведения и агрохимии СО РАН (Новосибирск, Россия); popov@issa-siberia.ru

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.



Статья доступна по лицензии [Creative Commons Attribution 4.0 License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

SOIL SOLUTION STUDIES IN SOLONCHIC SOILS: REVIEW OF THE RESULTS

© 2022 V. V. Popov

Institute of Soil Science and Agrochemistry of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia. E-mail: popov@issa-siberia.ru

The article provides an overview of the main results of research devoted to soil solutions of solonchic soils obtained by centrifugation, pressing, displacement by a replacement fluid and lysimetry. Due to the difficulties of extracting soil solution from the dense horizons of solonchic soils, the available publications are few. Nevertheless, recently there has been increasing interest to such research, especially at the interface of pedogenesis and hydrogeology, in order to get a better insight into soil processes as shaped by landscape specifics. Since many aspects of solonchic genesis and melioration are still poorly understood, detailed studies of soil solutions in solonchic soils are urgently needed.

Key words: soil solution; solonchic; saline soils; liquid phase of soils; centrifugation; lysimetry

How to cite: Popov V.V. Soil solution studies in solonchic soils: review of the results // *The Journal of Soils and Environment*. 2022. 5(4). e189. DOI: [10.31251/pos.v5i4.189](https://doi.org/10.31251/pos.v5i4.189) (in Russian with English abstract).

REFERENCES

1. Bystritskaya T.L., Gubin S.V., Tyulpanov V.I., Skripnichenko I.I. The properties of solonchic swell-shrink chernozems of stavropol region as affected by chemical amelioration, *Pochvovedenie*, 1988, No. 11, p. 109–118. (in Russian)
2. Voropaeva Z.I. Participation of groundwater in the redistribution of metabolic products during the chemical reclamation of solonchics. In book: Proceedings of the Omsk Agricultural Institute, Omsk, 1982, p. 10–17. (in Russian)
3. Voropaeva Z.I. Peculiarities of the salt regime and dynamics of exchangeable bases in reclaimed solonchics of Western Siberia: Abstract of Dissertation ... Cand. of Biol. Sci. Novosibirsk, 1990, 22 p. (in Russian)
4. Voropaeva Z.I., Trotsenko I.A., Parfenov A.I. Changes in the properties of a crusty solonchic with soda salinization after single and repeated amelioration with phosphogypsum, *Eurasian Soil Science*, 2011, Vol. 44, No. 3, p. 314–325.
5. Endovitsky A.P., Kalinichenko V.P., Ilyin V.B., Ivanenko A.A. Coefficients of association and activity of cadmium and lead ions in soil solutions, *Eurasian Soil Science*, 2009, Vol. 42, No. 2, p. 201–208.

6. Endovitsky A.P., Minkin M.B. Modern problems of the carbonate system in soil solutions thermodynamics, *Pochvovedenie*, 1986, No. 11, p. 76–88. (in Russian)
7. Zimovets B.A. Distribution of salts in soils of solonetzic complexes, *Pochvovedenie*, 1981, No. 1, p. 126–135. (in Russian)
8. Zimovets B.A. *Saline soils of the dry steppe zone of the Volga region and their development*: Abstract of Dissertation ... Dr. of agricultural sciences. Moscow, 1984, 52 p. (in Russian)
9. Zimovets B.A., Kauricheva Z.N. *Determination of the degree and type of soil salinization by soil solutions and water extracts in the dry steppe zone of the Lower Trans-Volga*. In book: *Irrigated soils and methods of their study*. Tashkent, 1976, p. 72–83. (in Russian)
10. Kovda V.A. *Origin and regime of saline soils*. Moscow-Leningrad: Publishing House of the Academy of Sciences of the USSR, 1946, Vol. 1, 573 p. (in Russian)
11. Komarova N.A. *Methods for isolation of soil solutions*. Collection: Physical and chemical methods of soil research. Nauka, 1968, p. 7–31. (in Russian)
12. Minkin M.B., Endovitsky A.P. Calcium carbonate balance in soil solutions of solonetz. *Pochvovedenie*, 1978, No. 9, p. 125–132. (in Russian)
13. Minkina T.M., Endovitsky A.P., Kalinichenko V.P., Fedorov YU.A. *Calcium carbonate equilibrium in the water-soil system*. Rostov-on-Don, Izd. Yuzhnogo Federalnogo Universiteta, 2012, 376 p. (in Russian)
14. Okorkov V.V. On factors of solonetz soil peptization, *Vladimirskiy zemledelets*, 2020, No. 4 (94), p. 21–32. DOI: 10.24411/2225-2584-2020-10141. (in Russian)
15. Popov V.V. *Zonal changes in soil solutions of solonetzic soils of the Ishim Plain*. Diss. Cand. of Biol. Sci. Novosibirsk, 2019, 177 p. (in Russian)
16. Semendyaeva N.V., Voropaeva Z.I. *Correlation between soil solutions and water extracts from low- and high-sodium solonetz of the forest-steppe of the Omsk region*. In book: *Proceedings of the Omsk Agricultural Institute*, Omsk, 1971, No. 93, p. 87–92. (in Russian)
17. Semendyaeva N.V., Elizarov N.V. Salt composition of groundwater and reclaimed solonetz in the Baraba lowland // *Eurasian Soil Science*, 2017, Vol. 50, No. 10, p. 1177–1185. <https://doi.org/10.1134/S1064229317100106>
18. Semendyaeva N.V., Korobova L.N., Elizarov N.V. Changes in the properties and biological activity of crusty solonetz in the Baraba lowland under the long-term impact of gypsum // *Eurasian Soil Science*, 2014, Vol. 47, No. 11, p. 1116–1122. DOI: 10.1134/S1064229314110118
19. Senkov A.A. *Ion-salt composition of soil solutions and water extracts*. In book: *Soil formation and anthropogenesis: structural and functional aspects*. Novosibirsk: Nauka Publ., 1991, p. 156–167. (in Russian)
20. Senkov A.A. *Halogenesis of steppe soils (on the example of the Ishim plain)*. Novosibirsk: Publ. House SB RAS, 2004, 152 p. (in Russian)
21. Senkov A.A. Genesis of steppe solonetz, *Bulletin of the Tomsk State University*, 2005, No. 15, p. 123. (in Russian)
22. Senkov, A.A., Popov V.V. Genesis of the salt profile of solonetzic soils in the south of the Ishim plain, *Bulletin of Novosibirsk State Agrarian University*, 2017, No. 1, p. 107–115. (in Russian)
23. Sinyavsky I.V. Salt regime of the forest-steppe soils of the Trans-Urals, *Agro-industrial complex of Russia*, 2016, Vol. 75, No. 1, p. 186–194. (in Russian)
24. Slavnyi Yu.A. On the theory of automorphic solonetz formation, *Eurasian Soil Science*, 2001, Vol. 34, No. 5, p. 455–459.
25. Slavnyi Yu.A. Halogenesis in soils of the lower Volga region. *Soil Science, Eurasian Soil Science*, 2003, Vol. 36, No. 1, p. 1–10.
26. Slavnyi Yu.A. Eolian accumulation of salts in the soils of autonomous landscapes of arid zones, *Eurasian Soil Science*, 2005, Vol. 38, No. 4, p. 341–348.
27. Shavrygin P.I. On the toxicity of soil solution concentrations in the Baraba Lowland, *Pochvovedenie*, 1963, No. 1, p. 85–92. (in Russian)
28. Shoba V.N., Senkov A.A. Equilibrium composition and properties of soil solutions, *Eurasian Soil Science*, 2011, Vol. 44, No. 10, p. 1068–1076.
29. Yatsynin M.N., Yatsynin N.L. *Micellar theory contradicts the nature of the genesis and reclamation of solonetz*. Sat. scientific works of SWorld. Odessa: 2012, Vol. 45, p. 88. (in Russian)
30. Alves A., Souza E., Melo H., Pinto J., Junior F., Júnior V., Marques F., Santos M., Schaffer B., Gheyi H. Comparison of solution extraction methods for estimating electrical conductivity in soils with contrasting mineralogical assemblages and textures, *Catena*, 2022, Vol. 218, No. 3, p. 106581. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2022.106581>
31. Batukaeva A.-M., Endovitsky A., Andreev A., Kalinichenko V., Minkina T., Dikaev Z., Mandzhieva S., Sushkova S. Ion association in water solution of soil and vadose zone of chestnut saline solonetz as a driver of terrestrial carbon sink, *Solid Earth*, 2016, No. 7, p. 415–423. <https://doi.org/10.5194/se-7-415-2016>, 2016.
32. Böckmann S., Titov I., Gerken M. Extraction of Soil Solution into a Microfluidic Chip, *AgriEngineering*, 2021, Vol. 3, p. 783–796. DOI: 10.3390/agriengineering3040049.
33. Bonito M.D. *Trace elements in soil pore water: a comparison of sampling methods*. Theses of PhD, University of Nottingham, England, 2005, 298 p.

34. Bresler E., McNeal B.L., Carter D.L. *Saline and Sodic Soils: Principles-Dynamics-Modeling*. Springer Berlin Heidelberg, 1982, 236 p.
35. Csillag J., Toth T., Redly M. Relationships between soil solution composition and soil water content of Hungarian salt-affected soils, *Arid Soil Research and Rehabilitation*, 1995, Vol. 9, No. 3, p. 245–260. DOI: 10.1080/15324989509385893.
36. Csillag J., Rédly M. Study of the liquid phase of the soil as a multicomponent electrolyte solution, *Agrokémia és Talajtan*, 1989, Vol. 38, p. 657–673. http://real.mtak.hu/97816/1/at_1989_38_3-4_657-673.pdf (assessed on 10/12/2022)
37. Duarte H.H.F., Souza E.R. Soil Water Potentials and Capsicum annum L. under Salinity, *Revista Brasileira de Ciência do solo*, 2016, Vol. 40, p. e0150220. DOI:10.1590/18069657rbc20150220.
38. Hossain M.S., Rahman G.M., Solaiman A.R.M., Alam M.S., Rahman M.M., Mia M.B. Estimating electrical conductivity for soil salinity monitoring using various soil-water ratios depending on soil texture, *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 2020, Vol. 51, No. 5, p. 635–644. <https://doi.org/10.1080/00103624.2020.1729378>
39. Kalinichenko V., Glinushkin A., Swidsinski A., Minkina T., Andreev A., Mandzhieva S., Sushkova S., Makarenkov D., Ilyina, L., Chernenko V., Zamulina I., Larin G., Gudkov S. Thermodynamic mathematical model of the Kastanozem complex and new principles of sustainable semiarid protective silviculture management, *Environmental Research*, 2021, No. 194, p. 110605. DOI: 10.1016/j.envres.2020.110605.
40. Linn H.S. Earth's critical zone and hydrogeology: concepts, characteristics, and advances, *Hydrology & Earth System Sciences Discussions*, 2009, Vol. 6, p. 3417–3481. <https://hess.copernicus.org/preprints/6/3417/2009/hessd-6-3417-2009.pdf> (assessed on 10/12/2022)
41. Miller J., Brierley J. Solonchic soils of Canada: Genesis, distribution, and classification, *Canadian Journal of Soil Science*, 2011, Vol. 91, p. 889–902. DOI: 10.4141/cjss10040.
42. Narashimhan T.N. Pedology: a hydrogeological perspective, *Vadose Zone Journal*, 2005, Vol. 4, p. 891–898.
43. Sinka L., Takacs-Hajos M., Czeller K., Tuba G., Zsembeli J. Investigation of the possibility of green bean production under unfavourable agro-ecological conditions in lysimeters, *Acta Universitatis Sapientiae, Agriculture and Environment*, 2019, Vol. 11, p. 72–82. DOI: 10.2478/ausae-2019-0007.
44. Schoeneberger P.J., Wysocki D.A. Hydrology of soils and deep regolith: a nexus between soil geography, ecosystems and land management, *Geoderma*, 2005, Vol. 126, p. 117–128. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2004.11.010>

Received 21 October 2022
 Accepted 15 November 2022
 Published 15 December 2022

About the author:

Popov Vladimir Viktorovich – Candidate of Biological Sciences, Junior Researcher in the Laboratory of Soil Geography and Genesis in the Institute of Soil Science and Agrochemistry of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Novosibirsk, Russia); popov@issa-siberia.ru

The author read and approved the final manuscript



The article is available under [Creative Commons Attribution 4.0 License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)