

# **ПОЧВЫ И ОКРУЖАЮЩАЯ СРЕДА**

**Научный журнал**

---

**2019**

**Том 2. Выпуск 3**

Свидетельство о регистрации: ЭЛ № ФС 77 - 72325 — сетевое издание от 14 февраля 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) 3639035, ИПА СО РАН, e-mail: [redactor@soils-journal.ru](mailto:redactor@soils-journal.ru), сайт: <https://www.soils-journal.ru>

#### РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

##### Главный редактор

**Титлянова Аргента Антониновна** - доктор биологических наук, главный научный сотрудник лаборатории биогеоценологии 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

**Дюкарев Анатолий Григорьевич** - кандидат биологических наук, доктор географических наук, заведующий лабораторией мониторинга лесных экосистем ФГБУН Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН

**Мордкович Вячеслав Генрихович** - доктор биологических наук, главный научный сотрудник лаборатории экологии беспозвоночных животных ФГБУН Институт систематики и экологии животных СО РАН

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

##### Члены редколлегии

**Сысо Александр Иванович** - доктор биологических наук, заведующий лабораторией биогеохимии, директор ФГБУН Институт почвоведения и агрохимии СО РАН

**Андроханов Владимир Алексеевич** - доктор биологических наук, заведующий лабораторией рекультивации почв, заместитель директора по науке ФГБУН Институт почвоведения и агрохимии СО РАН

**Доброворская Надежда Ивановна** - доктор сельскохозяйственных наук, старший научный сотрудник, заведующий лабораторией рационального землепользования Сибирского НИИ земледелия и химизации сельского хозяйства Сибирского федерального научного центра агробиотехнологий РАН.

**Кирпотин Сергей Николаевич** - доктор биологических наук, профессор кафедры ботаники Института биологии, экологии, почвоведения, сельского и лесного хозяйства Национального Исследовательского Томского государственного университета

**Гольева Александра Амуриевна** - доктор географических наук, ведущий научный сотрудник отдела географии и эволюции почв ФГБУН Институт географии РАН, председатель Российской ассоциации фитолитологов

**Кулижский Сергей Павлович** - доктор биологических наук, проректор по социальным вопросам ФГБУВПО Национального Исследовательского Томского государственного университета

**Гопп Наталья Владимировна** - кандидат биологических наук, старший научный сотрудник лаборатории генезиса и географии почв ФГБУН Институт почвоведения и агрохимии СО РАН

**Ермолов Юрий Викторович** - кандидат биологических наук, старший научный сотрудник лаборатории биогеохимии ФГБУН Институт почвоведения и агрохимии СО РАН

**Кудряшова Светлана Яковлевна** - кандидат биологических наук, старший научный сотрудник лаборатории почвенно-физических процессов ФГБУН Институт почвоведения и агрохимии СО РАН

**Танасиенко Анатолий Алексеевич** - доктор биологических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории почвенно-физических ФГБУН Институт почвоведения и агрохимии СО РАН

**Лойко Сергей Васильевич** - кандидат биологических наук, заведующий почвенным музеем, старший научный сотрудник лаборатории биогеохимических и дистанционных методов мониторинга окружающей среды Национального Исследовательского Томского государственного университета

**Миронычева-Токарева Нина Петровна** - кандидат биологических наук, заведующий лабораторией биогеоценологии ФГБУН Институт почвоведения и агрохимии СО РАН

**Смоленцев Борис Анатольевич** - кандидат биологических наук, заведующий лабораторией географии и генезиса почв ФГБУН Институт почвоведения и агрохимии СО РАН

**Фотев Юрий Валентинович** - кандидат биологических наук, старший научный сотрудник лаборатории интродукции пищевых растений ФГБУН Центральный сибирский ботанический сад СО РАН

**Якутина Ольга Петровна** - кандидат биологических наук, старший научный сотрудник лаборатории агрохимии ФГБУН Институт почвоведения и агрохимии СО РАН

**Беланов Иван Петрович** - кандидат биологических наук, старший научный сотрудник лаборатории рекультивации почв ФГБУН Институт почвоведения и агрохимии СО РАН

## Содержание

**Наумова Н.Б.** e93  
От редколлегии

### **Классификации почв и применение математических методов**

**Чичулин А.В.** e89  
Методологический анализ понятийного аппарата в экологии почв

### **Почвы естественных экосистем**

**Корнатов Н.Г.** e79  
Температурный режим торфяных олиготрофных почв Бакчарского болота (Западная Сибирь)

### **Биология и биохимия почв**

**Наумова Н.Б., Беланов И.П., Алинкина Т.Ю.** e84  
Таксономическое разнообразие бактериального ансамбля в эмбриоземе самозарастающего золоотвала

### **Юбилей и памятные даты**

**Кудряшова С.Я., Шапорина Н.А.** e81  
К 90-летию профессора Виктора Петровича Панфилова

### **Антропогенные, агрогенные и городские почвы**

**Турдалиев А.Т., Аскарров К.А., Мирзаев Ф.А.** e71  
Морфологические особенности орошаемых почв Центральной Ферганы



## ОТ РЕДКОЛЛЕГИИ

Представляем читателю очередной номер журнала. Статьи номера разнятся по тематике – от вопросов методологии почвенно-экологических исследований до представления профиля орошаемой почвы из Узбекистана. Статья А.В. Чичулина посвящена методологическому анализу понятийного аппарата в экологии почв. Подчеркнем, что в современных условиях лихорадочной публикационной активности научных статей, уделяющих внимание такого рода вопросам, т.е. методологии исследований в целом и понятийному аппарату в частности, становится все меньше. Так, поиск по электронной библиотеке [elibrary.ru](http://elibrary.ru) по ключевым словам «методология» и «почвоведение» среди статей, поступивших за десять последних лет, не дает ни одной статьи; а поиск по ключевым словам «методология» и «почва» дает 51 статью. Однако большинство этих статей не имеют никакого отношения к науке о методах или же к системе наиболее общих принципов, положений и методов, составляющей основу науки о почве, и лишь некоторые статьи относятся содержательно к совокупности приемов исследования, применяемых в данной области (см., например, определения методологии в словаре <https://dic.academic.ru>). Статья А.В. Чичулина представляет особый интерес для специалистов в области физики почв, занимающихся изучением их гидротермических особенностей и режимов.

Н.Г. Коронатова детально описывает температурный режим торфяных олиготрофных почв Бакчарского болота, и полученные данные могут быть весьма полезны при проведении метаанализа температурных режимов различных болот Западной Сибири в целом и Бакчарского болотного комплекса в частности. Такой анализ весьма важен для оценки перспектив продукции растительного вещества, накопления и трансформации торфа в болотных экосистемах, тем более, что автор статьи делает заключение, что термические режимы рямов и топей Бакчарского болотного комплекса различаются по результатам разных исследований.

Статья Н.Б. Наумовой, И.П. Беланова, Т.Ю. Аликиной посвящена результатам изучения таксономического разнообразия бактериального ансамбля в эмбриоземе самозарастающего золоотвала с помощью метагеномных методов, т.е. по разнообразию последовательностей генов 16S рРНК, амплифицированных по матрице общей ДНК, извлеченной из почвы. Хотя метагеномных исследований почв в последнее время много, однако исследований в зольных субстратах при самозаращении практически нет, и выявленный состав бактериальных ансамблей представляет интерес для микробиологов, экологов, биотехнологов и др. Особенно заслуживает внимания доминирование в бактериальном ансамбле молодого эмбриозема специфического комплекса бактерий (*Chloroflexi*, *Xanthomonadales*, *Geobacter*, *Aciditerrimonas*, *Iamiaceae* и др.), осуществляющих выветривание педогенного субстрата.

Немаловажным направлением публикаций нашего журнала являются статьи, посвященные памятным датам крупных сибирских почвоведов и агрохимиков. К юбилею В.П. Панфилова опубликована статья С.Я. Кудряшовой, Н.А. Шапориной, посвященная описанию его научной деятельности и ее основных результатов, в частности, в изучении почвенно-физических и мелиоративных свойств и режимов почв Сибири.

Морфологические особенности орошаемых почв Центральной Ферганы описаны в статье А.Т. Турдалиева, К.А. Аскарлова и Ф.А. Мирзаева; статья еще раз напоминает читателю об огромном разнообразии почвенных типов, свойств и почвообразующих процессов и представляет интерес для специалистов в области генезиса и экологии почв.

Желаем читателям получить удовольствие от чтения материалов этого номера!

Член редакционной коллегии  
к.б.н. Н.Б. Наумова



## МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ПОНЯТИЙНОГО АППАРАТА В ЭКОЛОГИИ ПОЧВ

© 2019 А.В. Чичулин

Адрес: ФГБУН Институт почвоведения и агрохимии СО РАН, проспект Академика Лаврентьева, 8/2, г. Новосибирск, 630090, Россия. E-mail: [chichulin@issa-siberia.ru](mailto:chichulin@issa-siberia.ru)

**Методология.** Проведен методологический анализ и выяснены причины ограниченной применимости при решении ряда задач в экологии почв традиционных климатических гидротермических коэффициентов – радиационного индекса сухости Будыко и коэффициента увлажнения Высоцкого-Иванова.

**Результаты.** На основе анализа размерности, примененного к задаче о зависимости характера почвенного покрова от гидротермических условий введены новые понятия – безразмерные критерии подобия, играющие роль почвенно-климатических коэффициентов и обладающие более широким диапазоном применимости по сравнению с традиционными климатическими гидротермическими коэффициентами. Показано, что связь между традиционными климатическими и новыми почвенно-климатическими гидротермическими коэффициентами носит асимптотический характер. Используя эмпирическое уравнение М. И. Будыко для испарения почвенной влаги и новые почвенно-климатические коэффициенты, получено уравнение "почвенно-климатической характеристики" (ПКХ), учитывающее совместное влияние климатических характеристик (средние многолетние значения радиационного баланса  $R$  и осадков  $P$ ) и свойств почвенного субстрата (испарение почвенной влаги  $E(R,P)$ ) на особенности почвообразовательного процесса.

**Заключение.** В отличие от традиционного подхода, упорядочивающего почвенные свойства на эмпирической климатической основе, новый физико-теоретический подход обладает возможностью теоретического предсказания ряда системных почвенных закономерностей, в частности – группировки почв на аридный, гумидный и сбалансированный педокосмы.

**Ключевые слова:** экология почв; принципы симметрии; принцип дополнительности; гидротермические коэффициенты; идеализации; математическая модель

**Цитирование:** Чичулин А. В. Методологический анализ понятийного аппарата в экологии почв // Почвы и окружающая среда. 2019. Том 2. № 3. е89. doi: 10.31251/pos.v2i3.89

## ВВЕДЕНИЕ

"С давних времен, с тех пор, как существует изучение природы, оно имело перед собой в качестве идеала конечную, высшую задачу: объединить пестрое многообразие физических явлений в единую систему, а если возможно, то в одну-единственную формулу".

Макс Планк (1966).

Наука в своем развитии неизбежно встречается с теоретико-познавательными и методологическими проблемами, решение которых требует переосмысления сложившегося понятийного аппарата и разработки новых математических методов. В естествознании эти проблемы выражаются в возникновении противоречий между старыми теоретическими представлениями (понятиями, законами, теориями) и новыми объективно установленными фактами. Основной причиной появления таких противоречий, является то, что процесс формирования понятий всегда включает в себя определенные процедуры абстрагирования и идеализаций. Например, в почвоведении, в силу объективной сложности и относительно слабой изученности объекта исследования, при количественном описании специфических почвенных закономерностей зачастую довольствуются соглашениями о выборе в качестве соответствующих эталонов (масштабов соотнесения), характеристик обособленных факторов почвообразования, которые в отрыве от остальных, лишь приблизительно отражают системный характер почвенных феноменов. Будучи в определенной мере оправданными на начальном, эмпирическом этапе

исследования, эти соглашения, тем не менее, неосознанно замыкают его в упрощенные теоретические рамки, которые рано или поздно, неизбежно становятся тесными, приводят к логическим противоречиям и, как следствие, к необходимости решения вопроса об определении границ применимости используемых понятий и методов, что принципиально возможно только в рамках нового, более широкого теоретического подхода.

В качестве примера, обратим внимание на важное различие современной физики и почвоведения как теоретических систем. Если понятия физики в большинстве случаев строго определены и имеют свое математическое выражение, так, что между ними мы имеем четко обозначенные логические связи, позволяющие из одних знаний выводить другие, то сказать все это про современное почвоведение пока еще нельзя. Неадекватное осознание связей между элементами почвенного знания приводит к тому, что до сих пор большая часть понятий, используемых в почвоведении, представляет собой, используя известное выражение А. Эйнштейна, каталог, а не систему.

Резюмируя вышесказанное, мы утверждаем, что причиной методологических и теоретических проблем в современном генетическом почвоведении, зачастую выступает использование упрощенных, не системных понятий и методов при изучении принципиально системных характеристик сложных природных объектов. Ранее, в работах (Чичулин, Елизарова, 2004; Чичулин Дитц, 2008; Чичулин, 2010; Чичулин, Шапорина, 2016) на примерах из гидрофизики и экологии почв, мы уже пытались рассмотреть некоторые аспекты этой общей проблемы.

1) в гидрофизике почв при построении влажностной характеристики почв - зависимости потенциала почвенной влаги от ее влажности  $\psi(\theta)$  за нулевой уровень потенциала принимается потенциал свободной влаги. За рамками теоретического описания в этом случае оказывается прямой учет влияния структуры твердой фазы почвы на содержащуюся в ней влагу;

2) в экологии почв, при изучении структуры почвенно-биоклиматических ареалов, используются различные климатические гидротермические коэффициенты (Добровольский, Урусевич, 2004), которые в своих прямых определениях, учитывая совместное действие только тепла и влаги, не учитывают, что это взаимодействие всегда происходит в конкретном почвенном субстрате. Степень оправданности такого рода допущений и вытекающие из них следствия, как правило, вообще не анализируются. Между тем, все факторы почвообразования, взаимодействуя между собой и, влияя на сущность и направление почвообразовательного процесса, действуют вместе как система взаимосвязанных элементов (Ковда, 1973). Совершенно естественно, что это ограничение определенным образом отражается и на результатах исследования.

В настоящей работе мы, по возможности детально, рассмотрим задачу из области экологии почв, методологический анализ и теоретическое решение которой требуют более глубокого, чем обычно принято, учета взаимосвязей между почвенно-климатическими характеристиками. Речь идет о задаче количественного описания структуры почвенно-климатических ареалов в зависимости от гидротермических условий. Актуальность работы обеспечивается тем, что в настоящее время существуют не только эмпирические, но и фундаментальные физико-теоретические принципы, на основе которых можно предложить конкретный подход к решению этой задачи. Мы опишем метод построения универсальной математической зависимости, выступающей в роли новой системы координат для любых почвенных характеристик, в частности – и для описания структуры почвенно-климатических ареалов. Эту зависимость для определенности далее будем называть почвенно-климатической характеристикой (ПКХ) и дадим ее интерпретацию. Метод основан на применении к задаче анализа размерности (Гухман, 1973; Седов, 1981; Кутателадзе, 1982), который, с целью подчеркнуть наше убеждение в его фундаментальной роли, которую он должен играть в решении задач современной экологии почв, будем называть принципом симметрии (инвариантности), имея в виду аналогию с общим подходом к решению проблем теоретической физики 20 века. В качестве экспериментальной базы данных, анализируемых в рамках нового теоретического подхода, использован материал, собранный и частично обработанный В. Р. Волобуевым (1945; 1953; 1956; 1963).

Таким образом, конкретной целью настоящей работы является разработка физико-теоретического подхода в экологии почв, в основе которого лежат новые понятия почвенно-климатических гидротермических коэффициентов, учитывающих совместное действие радиационного баланса, осадков и свойств почвенного субстрата в формировании специфики почвообразования. Для достижения этой цели необходимо решить следующие задачи:

1. Провести методологический анализ идеализаций, лежащих в основе традиционных гидротермических коэффициентов (радиационного индекса сухости Будыко и коэффициента увлажнения Высоцкого-Иванова) и, как следствие этого, выявить причины ограниченной применимости разработанных с их использованием исследовательских методов в современной экологии почв.

2. На базе фундаментального принципа симметрии (анализа размерностей), обеспечивающего общий физико-теоретический подход к проблеме, определить в форме безразмерных критериев подобия новые, более широкие, по сравнению с традиционными, понятия почвенно-климатических гидротермических коэффициентов.

3. Проанализировать связи, носящие асимптотический характер, между традиционными климатическими и новыми почвенно-климатическими гидротермическими коэффициентами.

4. Из уравнения испарения почвенной влаги М. И. Будыко, с использованием новых почвенно-климатических коэффициентов, вывести уравнение (модель), описывающее совместное действие климатических и субстратных характеристик на специфику почвообразовательных процессов.

5. Показать отличие результатов, вытекающих из моделей, полученных с помощью традиционных и новых гидротермических понятий.

Прежде чем перейти к конструктивной части настоящей работы, сделаем важное с нашей точки зрения замечание. Как ясно из вышеизложенного, работа в значительной степени носит критико-аналитический характер в отношении некоторых традиционных понятий, используемых в экологии почв. Чтобы не сложилось впечатление, что подобная позиция является исключительной, приведем мнения некоторых ведущих ученых о теоретическом и методологическом состоянии исследований в современном генетическом почвоведении в целом, необходимости и перспективах их дальнейшего развития.

И.А. Соколов (2004): "В настоящее время былая слава и былая роль генетического почвоведения в значительной степени утрачены. ..."тихий погром" в генетическом почвоведении остался почти незамеченным, ... деградация почвоведения снова до уровня только сельскохозяйственной науки началась с перевода Почвенного института им. В. В. Докучаева в ВАСХНИЛ... Фундаментальная наука была вновь возвращена на додокучаевский уровень и сведена до одной из своих прикладных ветвей".

Г.Ф. Хильми (1968): "Как бы ни было велико значение идей Докучаева, Воейкова, Вернадского и других классиков широкого мышления о природе, в наше время этих идей далеко недостаточно и требуется их серьезное развитие в принципиально новых направлениях. Свойственное географии комплексное мышление о биосфере и географической оболочке необходимо дополнить современными представлениями, и прежде всего энергетико-кибернетическим подходом".

Ограничимся этими высказываниями.

#### ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Прежде всего отметим, что естественным научным методом выбора масштаба измерений считается принятие в качестве эталона какого-либо устойчивого природного процесса. Например - еще на заре цивилизации такой подход интуитивно проявился в определении мер времени по наблюдениям за периодичностью вращения Земли вокруг своей оси и вокруг Солнца. Высокую степень универсальности таких астрономических часов подтвердила практика. Однако, принятые стандарты никогда не бывают абсолютно приемлемыми для всех реальных ситуаций. Так, в случае изучения системного, многофакторного и иерархического природного явления, к которым безусловно относится и почва, решение вопроса о выборе эталонов часто оказывается не однозначным. На начальном, эмпирическом этапе изучения представляется естественным, что для различных характеристик такого явления можно принять также различные, не связанные между собой, соглашения о соответствующих системах отсчета. Однако с каждым соглашением всегда связана определенная совокупность идеализирующих допущений, причем их осознанная и явно сформулированная часть, как правило, мала по сравнению с неявно подразумеваемой частью. Эти неявно подразумеваемые допущения, относительно безвредные в условиях изолированного применения каждого соглашения, проявляются в виде логических противоречий в случае попыток их объединения, когда необходимо одновременно использовать несколько взаимоисключающих идеализированных понятий. В этом случае и

возникает задача нахождения условий логической совместимости различных допущений. История развития научных направлений подтвердила, что достигается это в результате методологического анализа исследовательских процедур и, в случае удачного решения такой задачи, разрабатывается система новых понятий, лежащая в основе более широкой и адекватной теории сложного явления.

Приведем два хорошо известных примера:

1) Физика, как наиболее развитая в экспериментальном и теоретическом отношениях наука, еще в начале 20 в. пришла к необходимости пересмотра классических понятий пространства, времени, дискретности, непрерывности. Произошло это в процессе методологического анализа противоречий, возникших между новыми экспериментальными результатами и теоретическими положениями в классической механике, термодинамике и электродинамике. Разрешение этих противоречий, привело к появлению величайших теорий современности - теории относительности и квантовой механики, ограничивших применимость понятий классической механики.

2) Открытие нерегулярных колебаний в диссипативных системах различной природы (физических, химических, биологических, экономических) стало одной из крупнейших научных сенсаций в 60 - 70-е годы 20 в. Оно потребовало переосмысления роли понятий устойчивости и неустойчивости в макроскопических процессах, что привело к пересмотру фундаментальных представлений о природе. На этой основе оформилась дисциплина, которую в настоящее время называют по-разному – нелинейная физика, физика диссипативных структур, синергетика и др. Все они с единой точки зрения описывают процессы появления качественно новых явлений (самоорганизации) в сложных системах различной природы. При этом общую причину этих процессов видят в учете более тонких, нелинейных особенностей системных взаимосвязей.

Открытие В. В. Докучаевым нового понимания почв как особых природных тел, позволило ему заложить основы новой фундаментальной научной дисциплины - генетического почвоведения, в становлении которой важную роль сыграли общие методологические принципы изучения природы - системности, целостности, закономерных связей составляющих ее элементов. Именно методологический принцип изучения связей между почвой, с одной стороны, и комплексом всех природных экологических условий - с другой, стал основой генетического почвоведения. Однако правомерен вопрос: насколько последовательно реализуется этот принцип в современных почвенно-экологических исследованиях?

С самого начала разработки основ генетического почвоведения почвоведы уделяли большое внимание характеристике климатических условий почвообразования. В частности, с целью нахождения количественных корреляций между типами теплового и водного режимов и закономерностями распространения почв на земной поверхности, были введены различные гидротермические коэффициенты. В работе рассматриваются два из них - введенный, по предложению В. В. Докучаева, еще в 1904 г. коэффициент увлажнения Высоцкого-Иванова и радиационный индекс сухости, определенный М. И. Будыко в 1948 г. Причина выбора именно этих коэффициентов заключается в том, что их теоретический анализ подкреплен и необходимой базой эмпирических данных. Даты первого определения этих коэффициентов приведены специально, с целью подчеркнуть длительность их применения в неизменной форме. Прежде всего, дадим им строгие определения.

Безразмерный коэффициент увлажнения Высоцкого-Иванова

$$K_P = P/E_0 \quad (1)$$

показывает в какой мере выпадающие в данном регионе осадки возмещают испаряемость и получается от деления среднегодовой суммы осадков  $P$  [мм] на возможную испаряемость с водной поверхности по эвапориметру  $E_0$  [мм].

Безразмерный радиационный индекс сухости Будыко

$$K_R = R/LP \quad (2)$$

отражает возможность накопления влаги при данных условиях и определяется как отношение между радиационным балансом территории  $R$  [ккал см<sup>-2</sup> год] и годовой суммой осадков  $P$ ,

выраженной в калориях скрытой теплоты парообразования, где  $L$  [кал см<sup>-3</sup>] - скрытая теплота парообразования, для определенности принятая в работе равной 600 [кал см<sup>-3</sup>] = 0.06 [ккал мм<sup>-1</sup>] (Реймерс, 1990). Обратим внимание, что в обоих определениях используется понятие потенциально-возможной (иными словами - максимально возможной) величины: в одном случае – испарения с водной поверхности, во втором случае - испарения всех осадков.

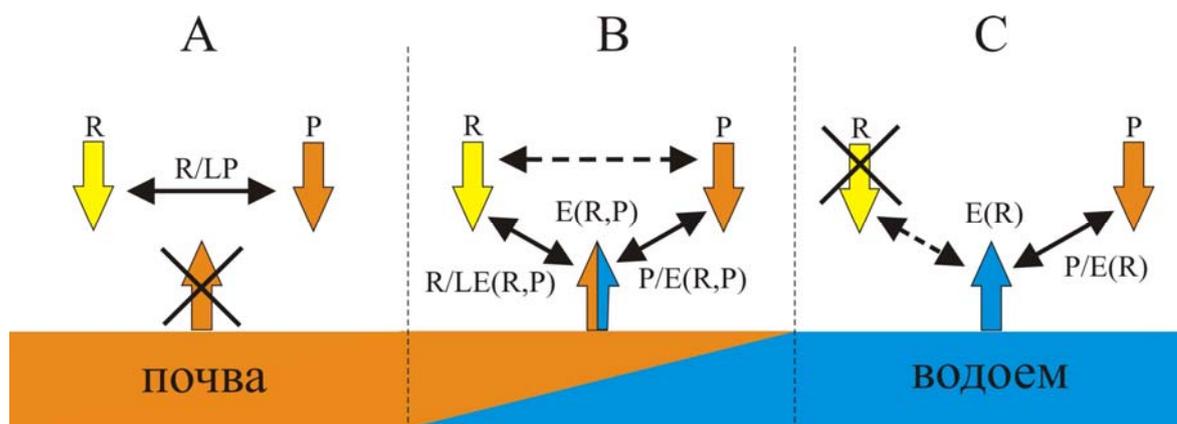
Начиная с 1945 г. В. Р. Волобуев обращал внимание на неправомерность противопоставления двух точек зрения по вопросу о том, какие данные следует принимать во внимание при изучении почвенно-климатических соотношений - данные по атмосферному или собственно почвенному климату. Он подчеркивал, что совершенно бесспорна необходимость изучения почвенного климата как свойства почвы, но столь же правомерна и другая задача - исследование закономерных соотношений между почвой и средой ее формирования, в качестве которой может выступать и атмосферный климат. Эти закономерные соотношения наиболее естественным образом разъясняются путем исследования связей между атмосферным и почвенным климатом. При общей постановке проблемы, такой подход следует признать совершенно правильным, но только при условии, если соответствующие параметры атмосферного климата выступают в роли естественных граничных условий для формирования почвенного климата. Исследования В. Р. Волобуева в этом направлении неоднократно детально описаны, поэтому мы не будем специально заострять на них внимание (Волобуев, 1963; 1973; 1974).

Однако необходимо подчеркнуть, что эти исследования В. Р. Волобуева базировались на использовании коэффициента увлажнения  $K_p$  (1) и именно в этом пункте могут быть подвергнуты критике. Дело в том, что связи между атмосферным и почвенным климатом действительно могут быть согласованы между собой, но только в том случае, если параметры атмосферного климата представлены в определенной форме - в форме граничных условий, задающих условия взаимодействия почвы с внешней средой. Коэффициент увлажнения в той его части, которая относится к выбору масштаба соотнесения - переменной, расположенной в знаменателе (1), этим условиям не удовлетворяет. Заметим, что  $K_p$  определен в форме безразмерного параметра, а чтобы такой параметр имел физический смысл меры отношения интенсивностей двух процессов, протекающих в почве (или на ее границе), необходимо сравнивать эти процессы в одно и то же время и в одном и том же месте, причем именно почвы (поверхности), а не водоема. Процессы испарения с поверхностей почвы и водоема не соизмеримы, а если их все-таки приходится сопоставлять между собой, то это означает, что мы используем более абстрактную, более грубую, не учитывающую определенной почвенной специфики, теоретическую схему. То есть, в таком случае, за универсальность (независимость от  $P$ ) и экспериментальную простоту измерения традиционного коэффициента увлажнения приходится расплачиваться определенной ценой - потерей представлений о структуре почвенного субстрата (они заменяется представлениями об однородной водной толще).

Подытожим вышесказанное: коэффициент увлажнения Высоцкого-Иванова в определенном смысле является грубым, предельно идеализированным понятием и по этой причине принципиально не может отразить всю возможную на данном уровне исследования почвенную специфику. Справедливости ради отметим, что Волобуев В. Р. (1974) отметил этот факт. Он писал: "Представляется оправданным при исследовании ландшафтов сравнивать условия, складывающиеся в самих ландшафтах, и на этой основе устанавливать известные градации их признаков, чем брать в качестве эталона не ландшафт, а "водную поверхность". К сожалению В. Р. Волобуев не довел до логического конца эту абсолютно правильную мысль и ограничился тем, что заменил "водную поверхность" - "ландшафтом в условиях высокого природного увлажнения" (при осадках  $P = 1600$  мм за год). По существу, произведя в уравнении (1) следующую замену:

$$E_0 (\equiv E(R)_{P \rightarrow \infty}) \Rightarrow E(R)_{P=1600} \quad (3)$$

то есть, заменив одну постоянную величину другой постоянной величиной, В. Р. Волобуев не внес принципиальных, качественных изменений в традиционный коэффициент  $K_p$ , а ограничился лишь небольшой количественной поправкой к нему. Тогда как последовательный подход требует замены испарения с поверхности свободной влаги  $E(R)$  (рис.1С) испарением с поверхности почвы  $E(R,P)$  (рис.1В). В принципиальном отношении все вышесказанное о коэффициенте увлажнения (1), относится и к радиационному индексу сухости (2), с поправкой на то, что его расчетная формула (2) предполагает, что осадки испаряются полностью, образно говоря - даже не долетая до поверхности почвы (рис.1А).



**Рисунок 1.** Общая схема задачи и три варианта выбора масштабов (эталонов) сравнения для традиционных и новых гидротермических коэффициентов. В качестве независимых переменных рассматриваются радиационный баланс земной поверхности  $R$  и среднегодовые осадки  $P$ . Испарение - зависимая переменная, может происходить двумя способами - с поверхности почвы  $E(R,P)$  или свободной воды  $E(R)$  (эвапорометр, естественный водоем). Эти два случая описываются разными зависимостями. Схемы образования различных коэффициентов: (А) - классического гидротермического коэффициента  $R/LP$  - радиационного индекса сухости Будыко М.И., где  $L$  - скрытая теплота парообразования; (В) - новых обобщенных переменных, безразмерных критериев подобия  $R/LE(R,P)$  и  $P/E(R,P)$ . В этом варианте влажность почвы является переменной величиной, зависящей от  $P$ , чем отличается от вариантов (А и С); (С) - классического коэффициента увлажнения Высоцкого - Иванова  $P/E(R)$ . Черные сплошные стрелки обозначают прямой учет связи между переменными, пунктирные - косвенный. Перечеркнутые стрелки означают, что в данном варианте параметры, обозначаемые ими, в явном виде не учитываются.

На (рис.1) приведены три схемы, поясняющие связь между различными климатическими и почвенными переменными при определении традиционных (А и С) и новых (В) гидротермических коэффициентов. В случае радиационного индекса сухости (А), в качестве масштаба соотнесения для радиационного баланса  $R$  берется среднегодовая сумма осадков  $P$  умноженная, для соблюдения размерности на скрытую теплоту парообразования  $L$ . Обратим внимание, что хотя сама почва не фигурирует в этом понятии, как было сказано выше - осадки испаряются, не долетая до поверхности почвы, формально это все-таки эквивалентно условию, что все осадки полностью испаряются именно из почвы при условии высокого радиационного баланса:

$$P = E_{R \rightarrow \infty} \quad (4)$$

Это замечание важно потому, что помогает на уровне физической картины изучаемого явления, обосновать необходимость выбора именно функции испарения из почвы  $E(R,P)$  в качестве единой меры (единого масштаба соотнесения, единого эталона) и для радиационного баланса  $R$  и для осадков  $P$ . Этим одновременно определяются как критерии подобия, играющие роль новых почвенно-климатических коэффициентов, так и через общий масштаб устанавливается между ними связь.

Таким образом, можно утверждать, что первый традиционный гидротермический коэффициент - радиационный индекс сухости Будыко  $K_R$ , определяется и потому полностью применим в предельной ситуации - полного испарения всей влаги из почвы, при котором почва остается абсолютно сухой.

Второй традиционный гидротермический коэффициент - коэффициент увлажнения Высоцкого-Иванова  $K_P$  определяется в противоположной предельной ситуации - полного увлажнения почвы, вплоть до образования на ее поверхности свободной влаги (водоем или эвапорометр). Следовательно, уравнения (1) и (2) мы можем заменить тождественными им уравнениями:

$$K_P = P / E_{P \rightarrow \infty} \quad (1a)$$

$$K_R = R / LE_{R \rightarrow \infty} \quad (2a)$$

В такой записи становится очевидной симметрия между традиционными коэффициентами.

Следующий логический шаг - переход в знаменателях уравнений (1a) и (2a) к единой функции испарения  $E(R,P)$ , зависящей и от осадков  $P$  и от радиационного баланса  $R$ , причем с выполнением условий:

$$E_{P \rightarrow \infty} \Rightarrow E(R,P) \Leftarrow LE_{R \rightarrow \infty} \quad (5)$$

означающих, что традиционные величины различных испарений  $E$  входят в качестве соответствующих граничных условий в новую функцию  $E(R,P)$  - функцию испарения почвенной влаги. Таким образом, можно определить новые почвенно-климатические гидротермические коэффициенты, сконструированные в форме безразмерных критериев подобия:

$$K_P = P / E(R,P) \quad (6)$$

$$K_R = R / LE(R,P) \quad (7)$$

В уравнениях (6) и (7) мы сохранили для новых коэффициентов обозначения, которые уже были использованы для традиционных коэффициентов (1) и (2), хотя в литературе для последних приняты другие обозначения:  $K_U$  и  $I_R$  соответственно. В настоящей работе использованы симметричные обозначения  $K_P$  и  $K_R$  потому, что они характеризуют различные проявления единого по своей физической сущности процесса. Поэтому, даже на уровне обозначений, считаем важным подчеркнуть элементы единства в новом подходе. Полагаем, что путаницы не должно быть.

За каждой математической формулой стоит определенная концептуальная модель – наглядная физическая картина явления. В связи с этим, интересно отметить, что при желании можно усмотреть нечто символическое в аналогии последовательности смен физических картин явлений, описываемых относительно более простыми традиционными (формулы (1), (2) и (рис.1A, C) - испарение из почвы не учитывается) и более общими новыми коэффициентами (формулы (6), (7) и (рис.1B) - почвенное испарение учитывается), с последовательностью смен библейских картин мира. Так, в первый и второй дни творения, когда еще нет разницы между водой, которая под твердью и водой, которая над твердью, процесс испарения воды, если и происходит, то только находящейся в свободном состоянии. Именно такие процессы описывают традиционные гидротермические коэффициенты (1) и (2). В третий день творения произошло разделение воды, которая под твердью, на землю и моря и, следовательно, появилось испарение воды с поверхности почвы (Бытие, 1: 2–13), описываемое уравнением (8), а гидротермические коэффициенты приняли форму (6) и (7).

Попутно отметим, что и понятие подобия, являющееся ключевым при разработке исследовательского метода, впервые упоминается в Библии в седьмой день творения, в связи с появлением человека (Бытие, 1: 26). С нашей точки зрения такая тесная аналогия между картинами мира и методами его понимания, свидетельствует о наличии неизменной, проходящей через тысячелетия, инвариантной компоненте в логике изучения и описания природных явлений человеком.

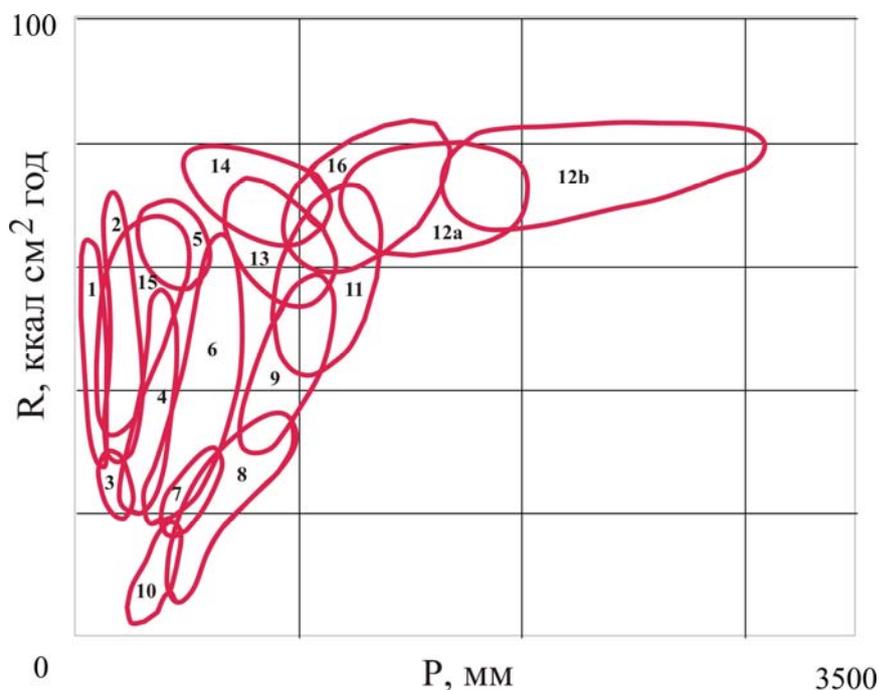
#### МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЯ

Анализ размерности начинается с построения теоретической схемы задачи, выбора значимых переменных и построения из них безразмерных комплексов (обобщенных переменных). Схема задачи приведена на рисунке 1B.

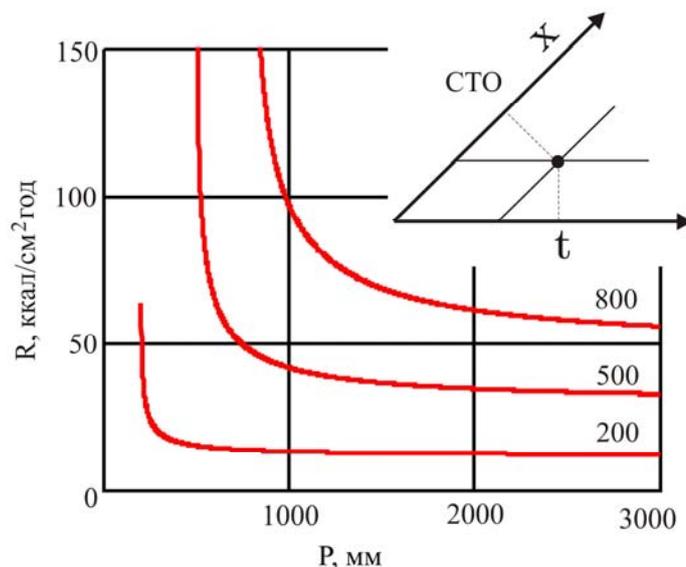
Сам анализ размерности, как и все принципы инвариантности, относится к метатеоретическим утверждениям, которым должны соответствовать законы природы. Он нашел широкое применение в различных научных направлениях, имеющих дело с изучением сложных систем. Особую плодотворность он демонстрирует в тех случаях, когда известен только перечень значимых переменных для данной задачи, а математическая постановка задачи вообще отсутствует, т.к. исследуемое явление настолько сложно, что для него еще нет удовлетворительной математической модели, либо, если модель есть, нахождение искомым закономерностей прямым путем встречает значительные технические трудности (Седов, 1981).

Как правило, именно с такими задачами до сих пор приходится иметь дело в экологии почв, изучающей закономерности взаимосвязей почв с факторами среды. В этих случаях главную роль играют экспериментальные методы исследования, которые дают возможность установить конкретные опытные факты - перечень свойств и параметров, множество частных взаимосвязей между которыми описывает изучаемую систему в данном приближении к действительности. Методами анализа размерностей этим эмпирическим взаимосвязям может быть придана обобщенная форма и уменьшено число переменных, т.е. осуществлена определенная теоретизация исходного материала. В частности, если перечень переменных полон, можно путем сопоставления размерностей быстро установить общий характер функциональной зависимости, которая связывает данные величины.

Математический аппарат анализа размерности очень прост. Однако, даже длительный опыт его формального применения не может гарантировать от ошибок (Гухман, 1973). Причины заключаются в том, что необходимыми условиями применения анализа размерности являются глубокое понимание сущности изучаемого явления и наличие полного набора данных. В противном случае возможна неоднозначная или ошибочная интерпретация результатов. В целом анализ размерностей не является всемогущим методом и подчас его возможности оказываются ограниченными. Рассматриваемая в настоящей работе задача о структуре почвенно-климатических ареалов в гидротермическом пространстве, является с этой точки зрения удачным примером. При ее анализе существует возможность перейти от эмпирического к физико-теоретическому уровню строгости, и довести решение до конкретных количественных результатов. Это обеспечивается как существующими теоретическими методами (анализ размерности), так и благодаря предварительной работе В.Р.Волобуева (рис.2), собравшего и опубликовавшего достаточно полную базу данных о зависимости характера почвенного покрова от гидротермических условий, а также работе М. И. Бudyко (рис.3), проделавшего аналогичную работу в отношении сбора, первичной обработки и вывода эмпирической формулы, связывающей испарение почвенной влаги с радиационным балансом и осадками. По-существу, можно сказать, что в настоящей работе, собраны вместе и системно организованы все вышеперечисленные компоненты.



**Рисунок 2.** Расположение почвенно-климатических общностей по В.Р.Волобуеву (1974): 1 - пески пустынь, 2 – сероземы, 3 – бурые почвы полупустынь, 4 – каштановые почвы, 5 – каштановые почвы Африки, 6 – черноземы, 7 – серые лесные почвы, 8 – подзолы и подзолистые почвы, 9 – бурые лесные почвы, 10 – почвы тундр, 11 – желтоземы, 12 - красноземы и латериты (12а – основной ареал, 12b – более редкое распространение), 13 - коричневые почвы сухих лесов и кустарников (Африка), 14 – черные почвы саванн и тропических прерий, 15 – светло-бурые почвы тропических полупустынь, 16 – красно-бурые почвы саванн.



**Рисунок 3.** Изолинии испарения  $E(R, P)$ , рассчитанные по формуле Будыко М. И (выделены красным цветом). Одновременно рисунок иллюстрирует различные системы координат: декартова система координат – для независимых переменных  $R$  и  $P$ , аналогом является ортогональные оси независимых пространственной и временной переменных в классической механике. Изолинии испарения асимптотически сливаются с осями  $R$  и  $P$ . В этих предельных состояниях переменные  $R$  и  $P$  становятся независимыми. В настоящей работе изолинии испарения приняты за общий эталон в новой системе координат, криволинейность которой означает, что действуя одновременно в почве, процессы тепло-влагообмена почвы с атмосферой и испарения почвенной влаги становятся принципиально зависимы друг от друга и их нельзя рассматривать по отдельности. Врезка в правом верхнем углу, приведенная в качестве примера для сравнения, изображает систему координат в специальной теории относительности (СТО). В этой системе координат оси пространственной  $X$  и временной  $t$  переменных не ортогональны, поскольку в отличие от классической механики, в СТО эти переменные зависят друг от друга. Смысл иллюстрации заключается в демонстрации того, что, исходя из поставленной цели, системы координат могут быть выбраны не только декартовыми, а зависеть от конкретной задачи. Выбор не декартовой системы координат означает, что между используемыми переменными существуют взаимосвязи, которыми нельзя пренебречь.

Из соображений симметрии вытекает, что законы природы и их математические модели, являясь отражением объективной реальности, в наиболее общих формулировках, не должны зависеть от выбора мер. Это означает, что взаимосвязи предпочтительнее искать между безразмерными величинами. В нашей задаче определяющими переменными являются следующие величины: радиационный баланс земной поверхности  $R$  [кал/см<sup>2</sup> год], годовое количество осадков  $P$  [мм] и суммарное физическое испарение и транспирация почвенной влаги  $E$  [мм]. Поскольку процесс связан с испарением почвенной влаги, то в число определяющих величин должен входить параметр - скрытая теплота парообразования  $L = 589$  кал/см<sup>3</sup>. Таким образом, общее число переменных  $m=4$ . При этом, существуют только две независимые (первичные) размерности: [кал] и [мм], то есть,  $n = 2$ .

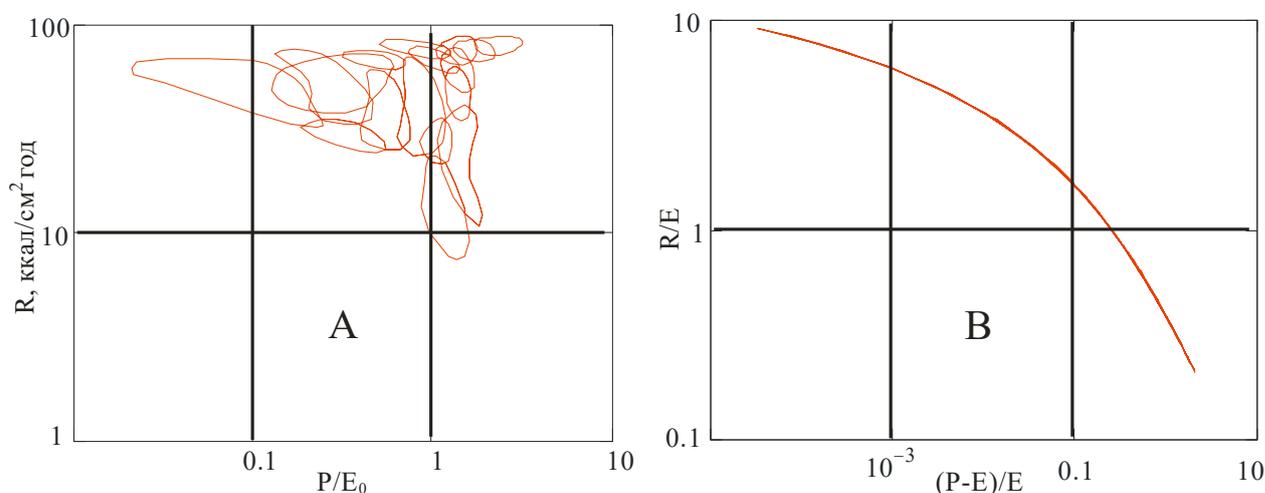
В анализе размерности доказывается так называемая  $\pi$ -теорема, утверждающая, что число безразмерных комплексов  $\pi$ , которые могут быть составлены из заданного набора размерных величин, определяется формулой Бэкингема:  $\pi = m - n$ . (Сена, 1988). Таким образом, в нашем случае  $\pi = 2$ . Другими словами, существуют только два безразмерных комплекса, связь между которыми будет в самом общем виде описывать структуру почвенно-климатических ареалов в гидротермическом пространстве. Легко показать, что их форма имеет вид  $R/LP$  и  $P/E$ .

$\pi$ -теорема позволяет понять почему в задачах, использующих традиционные коэффициенты можно составить только по одному безразмерному комплексу. Причина заключается в том, что в обоих случаях используется неполный перечень значимых переменных. В случае расчета радиационного индекса сухости (рис. 1А) в явном виде отсутствует переменная, описывающая испарение почвенной влаги. Используются только переменные  $R, P$  и параметр  $L$ . В результате, из переменных можно составить только один безразмерный комплекс -  $R/LP$ . В случае

расчета коэффициента увлажнения (рис.1С), радиационный баланс  $R$  учитывается только косвенно, в явной форме используются переменные  $P$ ,  $E_0$  и параметр  $L$ . Из них также можно составить только одну безразмерную комбинацию  $P/E_0$ .

Это объясняет причину, почему используя традиционные коэффициенты, графическое изображение результатов можно представить только в "смешанной" форме - когда на одной оси отложена безразмерная переменная, на другой – размерная (Волобуев, 1974; Реймерс, 1990). Нельзя утверждать, что это "абсолютно неправильно", существует смысл и в таком представлении результатов. Хотя этот вариант задачи в настоящей работе мы не рассматриваем, но в связи с ним, следует сделать принципиальное замечание, поскольку он свидетельствует не только о неполном теоретическом обобщении результатов. Дело в том, что почвенные закономерности нельзя выразить только в относительных (безразмерных) величинах, важную роль играют и абсолютные (размерные) значения переменных. Можно сказать, что между относительными и абсолютными переменными складываются специфические отношения дополнительности - они отражают различные, но дополняющие друг друга зависимости. С учетом сказанного, энергетический подход В. Р. Волобуева следует отнести к промежуточному или смешанному подходу.

На (рис.4) для сравнения приведены данные о структуре почвенно-климатических ареалов, рассчитанные нами с использованием промежуточного - "смешанного" подхода В. Р. Волобуева (рис.4А) и полученные с помощью полностью "безразмерного" подхода - с использованием новых почвенно-климатических коэффициентов (рис.4В). Аналогичные данные, приведенные на (рис.9) в работе И. А. Соколова (2004) в системе координат "сумма температур - коэффициент увлажнения", по существу такие же, как в случае (рис.4А). Очевидно, что степень обобщения экспериментальных результатов является максимальной в "безразмерном" случае (рис.4В) – все данные о границах почвенно-климатических ареалов располагаются на одной линии, которая описывается универсальным уравнением, тогда как с помощью одного традиционного коэффициента увлажнения всегда получается развернутая структура (А), универсальное уравнение для которой будет рассмотрено в отдельной работе.



**Рисунок 4.** Расположение почвенно-климатических ареалов в разных системах координат: (А) – "смешанный" вариант В. Р. Волобуева (1974); (В) – "безразмерный" вариант, в котором за координаты приняты новые почвенно-климатические коэффициенты, введенные в настоящей работе. В случае (В) границы всех почвенно-климатических ареалов, рассчитанные по отдельным точкам (примерно 30 - 40 точек для каждого ареала), перекрывая друг друга, сливаются в одну криволинейную зависимость. Очевидна более высокая степень обобщения одних и тех же экспериментальных результатов, представленных в "безразмерной" форме.

#### РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Конечной целью анализа размерности является определение структуры характерных для исследуемого процесса обобщенных переменных - уравнения (6) и (7). Решением этой задачи его возможности исчерпываются. Вид функции в конечном выражении для функциональной зависимости между обобщенными переменными средствами анализа размерности не определяется - это исключено принципиально. Средства, с помощью которых решение может быть доведено до

конкретной математической модели, надо искать за его пределами. В нашем случае мы воспользуемся эмпирическим уравнением Будыко М. И. для испарения почвенной влаги:

$$E(R, P) = P \left[ 1 - \exp\left(-\frac{R}{LP}\right) \right] \quad (8)$$

По поводу уравнения (8) следует сделать замечание. Оно, безусловно основано на определенных идеализациях и, с нашей точки зрения, может быть названо моделью "идеального почвенного испарения", играя роль, аналогичную модели "идеального газа" или "материальной точки" в физике. Оно является одним из простейших уравнений, но, тем не менее, отражает специфические особенности испарения почвенной влаги - испарение из капиллярно пористой структуры, а не из однородной толщи свободной влаги. В частности - оно учитывает этап падающей скорости испарения при отступлении капиллярной влаги вглубь пористого тела. Вместе с тем оно является линейным, позволяя разделить переменные и именно в связи с этим, получить искомое решение нашей задачи - уравнение ПКХ, в явном, аналитическом виде. Наконец, модель М. И. Будыко обладает свойством "глобальности" – во всем диапазоне изменения почвенно-климатических переменных масштаб отнесения для коэффициентов (6) и (7) хотя и является переменной величиной, но выражается одной и той же функцией  $E(R, P)$ .

Поскольку все необходимые определения приведены, можно сформулировать основное "физико-теоретическое" противоречие, которое мы стремимся разрешить в нашей работе: определение (1), (2) и уравнение (8) логически не совместимы. В этом можно убедиться представив ситуацию, когда в (1) и (2) зафиксирован один из параметров  $R$  или  $P$ , а второй при этом варьируется. Применение уравнения (8) в этом случае сразу требует изменения фиксированного параметра. В противном случае нарушается условие инвариантности этого уравнения. Следовательно, задача заключается в том, чтобы так переопределить понятия гидротермических коэффициентов, чтобы они составляли с уравнением испарения почвенной влаги единую непротиворечивую систему. Легко убедиться, что уравнения (6), (7) и (8) этому условию удовлетворяют.

Существуют другие, более сложные, нелинейные эмпирические модели испарения, например, у В. Р. Волобуева (1974). По их поводу заметим, что на качественном уровне они приводят к результатам, аналогичным для модели М. И. Будыко, но не обладают ее основным преимуществом – простотой. Поэтому работать с ними можно только с помощью численных методов. Принципиально новые результаты, которые отличают их от "глобальной" модели М. И. Будыко, сводятся к эффекту "локальности" – добиться инвариантности функции ПКХ возможно,

только варьируя показатель степени  $\alpha(K_P)$  переменного масштаба отнесения  $E(R, P)^{\alpha(K_P)}$ . В настоящей работе этот вариант задачи не рассматривается.

С помощью ряда тождественных и чисто математических преобразований, которые мы здесь не приводим, уравнение М. И. Будыко (8) можно преобразовать к виду, в котором новые переменные – почвенно-климатические коэффициенты (6) и (7) разделяются. При этом интересно рассмотреть два случая, физический смысл которых заключается в подборе переменных, лучше всего коррелирующих с границами почвенных общностей (почвенно-климатических ареалов).

В первом случае, с условным названием "неполного баланса", для упрощения введем следующие обозначения новых переменных:

$$y \equiv \frac{R}{LE}, x \equiv \frac{P}{E} \quad (9)$$

Тогда уравнение ПКХ будет выглядеть следующим образом:

$$y(x) = -x \ln\left(\frac{1}{x}\right) \quad (9a)$$

Этот вариант решения задачи нам представляется вполне вероятным для отдельных почвообразовательных процессов, хотя более определенный ответ требует дополнительного исследования. Также вероятным представляется вариант решения с явным учетом балансовых составляющих, связанных с испарением почвенной влаги, в тепло-влагообменных процессах взаимодействия почвы и атмосферы. В этом случае определим новые переменные следующим образом:

$$y \equiv \frac{R - LE}{LE}, x \equiv \frac{P - E}{E} \quad (10)$$

Тогда уравнение ПКХ выглядит так:

$$y(x)_{ПКХ} = - \left\{ 1 + (1+x) \left[ \ln \left( \frac{x}{1+x} \right) \right] \right\} \quad (10a)$$

Принятые обозначения (9) и (10) отчасти поясняют смысл используемых условных названий в обоих случаях. Чтобы отличать различные уравнения ПКХ - (9a) и (10a) в (10a) использована подстрочная индексация.

На рисунке (5) приведены графики уравнений ПКХ для трех рассмотренных выше вариантов задачи – с традиционными климатическими (B) и новыми почвенно-климатическими коэффициентами (A) и (C). Видно, что основное отличие между ними заключается в том, что уравнение с традиционными коэффициентами имеет одну строго линейную ветвь, а оба уравнения с новыми коэффициентами имеют по две, ярко выраженные ветви с различными и переменными наклонами. Проинтерпретируем их с точки зрения теории подобия.

В случае (C), описываемом уравнениями (9) и (9a) - асимптотики функции ПКХ выходят либо на строго горизонтальную либо строго вертикальную зависимости. Это означает, что в каждом из этих двух предельных случаев происходит полное вырождение одного из критериев подобия - его влияние на описываемое явление стремится к нулю. Так, для горизонтальной асимптотики:

$$R/LE \rightarrow const = 1, \quad \text{комплекс} \cdot (P/E) \cdot \text{вырождается} \quad (11)$$

для вертикальной асимптотики:

$$P/E \rightarrow const = 1, \quad \text{комплекс} \cdot (R/LE) \cdot \text{вырождается} \quad (11a)$$

Другими словами - на почвы, находящиеся на горизонтальной асимптотике, перестают оказывать влияние осадки  $P$ , а на почвы, находящиеся на вертикальной асимптотике - радиационный баланс  $R$ . Для почвоведов ситуация станет понятнее, если, забегая несколько вперед, скажем что на горизонтальной асимптотике располагаются почвы гумидного, а на вертикальной - аридного педокосмов. В теории подобия такие области называются автомодельными. В этих областях из всех безразмерных комплексов, характеризующих описываемые явления, действенным остается только единственный. Все явления, попадающие в одну автомодельную область, подобны друг другу, отличаясь только масштабом. В случае (C) автомодельность является абсолютной, связанной с самой сутью рассматриваемого явления. Таким образом, аридные и гумидные почвы описываются разными безразмерными комплексами - разными наборами исходных переменных. В этом смысле можно говорить, что почвы различных педокосмов описываются разными почвенно-климатическими законами.

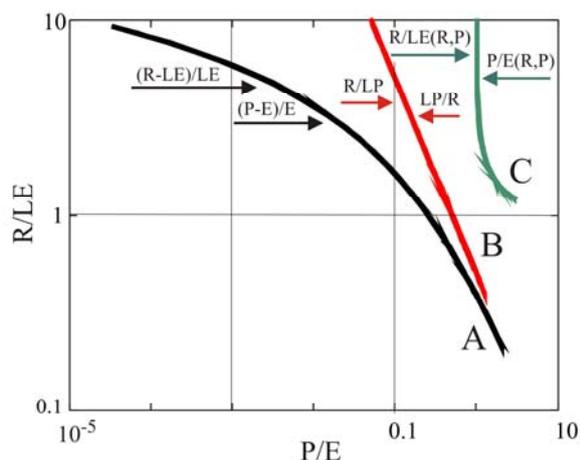
Строго говоря, распределение всех почвенно-климатических ареалов на кривой ПКХ является в значительной степени условным. Границы между ними настолько размыты, что скорее надо говорить о непрерывном переходе одного ареала в другой. Примечательно, что черноземный ареал (см. далее) всегда находится в области наиболее выраженного перегиба кривой ПКХ. И для случая (C) именно в области черноземов, наклон кривой ПКХ для случая "неполного баланса", наиболее приближен к наклону ПКХ для случая, описываемого традиционными коэффициентами.

В случае (A), описываемой формулами (10) и (10a) ситуация иная. Испарение почвенной влаги здесь учитывается как компонента теплового и водного балансов почв. И случаев вырождения, аналогичных случаю (C) нет. Однако для гумидных почв проявляется область структурной автомодельности, в которой выполняется условие для составного критерия:

$$\frac{(R - LE)}{LE} \frac{(P - E)}{E} \rightarrow const = \frac{1}{2} \quad (12)$$

Интересно отметить, что в этом случае, когда испарение почвенной влаги учитывается в качестве одной из составляющих для теплового и водного балансов, сопоставление уравнений с традиционными (В) и новыми коэффициентами (А) приводит к физически осмысленному результату: в условиях высокого увлажнения эти уравнения асимптотически сходятся. Предполагая, что традиционные гидротермические коэффициенты, хотя и обладают ограниченной применимостью, все-таки отчасти отражают реальность, следует сделать вывод, что для различных почв границы почвенно-климатических ареалов лучше коррелируют с различными переменными, либо учитывающими балансы тепла и влаги, либо с "чистыми" радиационным балансом и осадками. Повторим, что случай (С) – коррелирует с (В) только в области почв со сбалансированного уровнем увлажнения (~ черноземы), что также должно иметь физический смысл. Отметим, что для аридных почв в случае (А) кривая ПКХ асимптотически не выходит на строгую горизонталь, свидетельствуя о том, что осадки продолжают оказывать влияние на процессы почвообразования вплоть до полного их исчезновения.

Поскольку основные задачи настоящей работы заключаются в методологическом разборе с позиций анализа размерности понятийного аппарата, используемого в экологии почв и построении новой математической модели ПКХ, то и анализ полученных результатов в ней в значительно степени выглядит как проводимый с формальных позиций. Это неизбежное зло. Детальная интерпретация результатов выходит далеко за рамки анализа размерности. Но поскольку они безусловно представляют почвенно-экологический интерес, предполагается рассмотреть эти вопросы более подробно в отдельной работе.



**Рисунок 5.** Сравнение уравнений для почвенно-климатических характеристик (ПКХ) для трех вариантов: (В) - уравнение связывает традиционные гидротермические коэффициенты; (А) – уравнение связывает переменные (10) в случае "полного баланса", (С) – уравнение связывает переменные (9) в случае "неполного баланса". Обозначения осей приведены только в общем виде. Конкретные переменные, в которых построены все уравнения ПКХ, приведены на рисунке возле каждой линии с привязками в виде стрелок соответствующего цвета.

По поводу уравнения ПКХ с традиционными коэффициентами (рис.5В) следует сделать следующее замечание. Как видно на рисунке (5), на графике с двойным логарифмическим масштабом оно представляет собой прямую линию – уравнение с постоянной симметрией во всем диапазоне изменения гидротермических условий. Неизменность симметрии в свою очередь означает, что все почвы, во всем диапазоне изменения параметров, подчиняются одному закону. Физический смысл этого результата заключается в том, что традиционные коэффициенты хотя и фиксируют простейшую связь между параметрами R и P, относящиеся к различным почвам, делают они это в предельно идеализированном случае. Эти коэффициенты являются слишком грубыми, чтобы чувствовать более тонкое системное различие между почвами. К тому же,

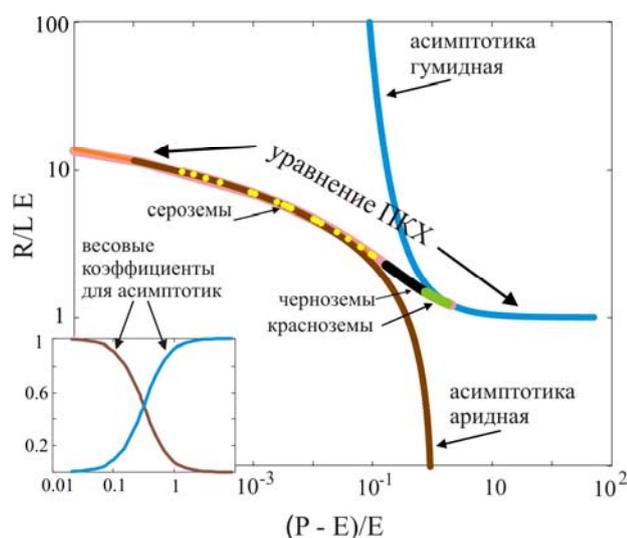
поскольку эта прямолинейная зависимость получена с использованием уравнения Будыко (8), и переменные, которые описывают эту зависимость, строго обратно пропорциональны друг другу -  $R/LP$  и  $LP/R$ ,

$$E(R, P)_{P \rightarrow \infty} \rightarrow \frac{LP}{R} \quad ; \quad E(R, P)_{R \rightarrow \infty} \rightarrow \frac{R}{LP} \quad (13)$$

то ко всему вышесказанному об идеализациях, лежащих в основе уравнения Будыко, следует добавить, что оно не чувствует разницу между испарением "воды, которая над твердью" и "воды, которая под твердью" (Бытие, 1:7). Для этого уравнения - это одно и то же состояние влаги. Условно говоря, уравнение Будыко применимо к ситуации, описываемой в Библии в первый и второй дни творения. К тому же заметим, что любые два набора переменных  $x$  и  $y$  с помощью формальных преобразований  $y/x$  и  $x/y$  всегда сводятся к универсальной гиперболе  $y(x) = 1/x$ , которая сама по себе не отражает никакой качественной специфики исходных данных. Такая чрезмерная универсальность ставит слишком узкие теоретические рамки конкретным исследованиям. Именно поэтому, использование традиционных климатических гидротермических коэффициентов - радиационного индекса сухости Будыко и коэффициента увлажнения Высоцкого-Иванова, является во многих ситуациях слишком грубым приближением.

Таким образом, подчеркнем еще раз, главный недостаток традиционных коэффициентов в принципиальном плане заключается в том, что их применение не открывает никаких перспектив развитию специальных, более детальных почвенных теорий. Неоднократно подчеркивалось (Соколов, 2004), что почвенные закономерности не сводятся только к климатическим. И нашу модель (10а), построенную с помощью метода, расширяющего границы применимости гидротермических климатических коэффициентов можно рассматривать как конкретный аргумент в доказательстве неправомочности использования утрированной характеристики докучаевского почвоведения только как "климатического".

Повторим, что в отличие от линейного уравнения, изображенного на (рис.5В), уравнения ПКХ с новыми почвенно-климатическими гидротермическими коэффициентами (9а) и (10а) отличаются тем, что имеют криволинейный вид, с двумя ярко выраженными ветвями, описываемыми различными асимптотиками в противоположных диапазонах увлажнения - аридной и гумидной (рисунки 5, 6, 7). Эти асимптотики описываются однородными функциями с различной симметрией. Следовательно, почвы, находящиеся в различных (противоположных) гидротермических диапазонах, хотя и описываются одним уравнением, подчиняются различным законам подобия, связывающим переменные  $R$ ,  $P$  и  $E$ .



**Рисунок 6.** Расположение почвенно-климатических ареалов в обобщенных координатах (новых почвенно-климатических коэффициентах). На рисунке, чтобы избежать громоздкости, для примера разным цветом выделены экспериментальные данные только для ареалов сероземов (желтые точки), черноземов (черные точки - сливаются) и красноземов (зеленые точки), остальные

почвы лежат на одной универсальной зависимости (светлокоричневая линия). В крайних положениях к ней асимптотически подходят две функции – гумидная асимптотика (синяя линия) и аридная асимптотика (темно-коричневая линия). Каждая точка на универсальной зависимости (ПКХ) в линейном приближении представима в виде суперпозиции (суммы) аридной и гумидной асимптотик с соответствующими весовыми коэффициентами, изображенными на врезке в левом нижнем углу (выделены тем же цветом, что и линии). Обратите внимание на отличие функций ПКХ на рисунке (6) от соответствующих функций на (рис. 5, 7), вызванных различием использованных переменных.

Легко показать из (10а), что эти асимптотики описываются следующими уравнениями:

Аридная асимптотика:

$$y_A(x) = y_{ПКХ}(x)_{x \rightarrow \infty} \Rightarrow -1 - \ln(x) \quad (14)$$

Гумидная асимптотика:

$$y_H(x) = y_{ПКХ}(x)_{x \rightarrow \infty} \Rightarrow -1 + \frac{2x+2}{2x+1} \approx \frac{1}{2x} \quad (15)$$

С их помощью любую точку на кривой ПКХ, а следовательно и любую почву, можно представить в виде суперпозиции:

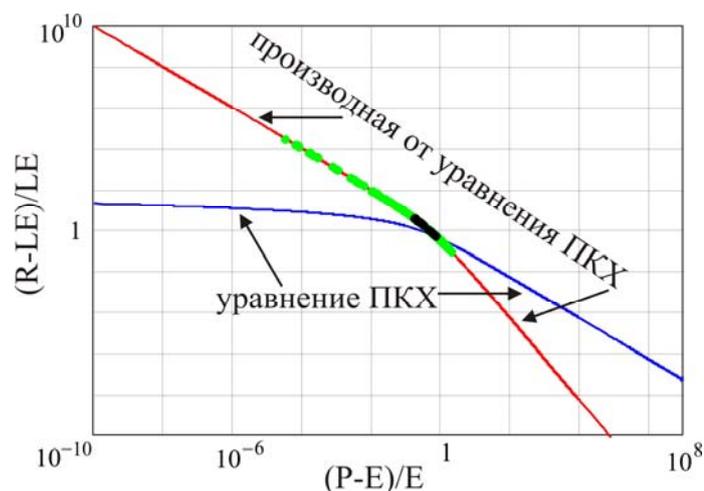
$$y_{soil}(x) = C_A(x)y_A(x) + C_H(x)y_H(x) \quad (16)$$

где функции  $C_A(x)$  и  $C_H(x)$  играют роль весовых коэффициентов для соответствующих асимптотик, вид которых приведен на врезке (рис. 6). Они отражают долю участия в процессе почвообразования аридной и гумидной составляющих.

Физический смысл представления точного уравнения ПКХ (10а) в приближенной форме (16) заключается не только в наглядности последнего. Это приближение носит принципиальный характер, поскольку именно в этом приближении строго определяются новые понятия аридных и гумидных почвенно-климатических ареалов. В "точных" уравнениях (9а) и (10а) таких понятий не существует. Естественная интерпретация приближенного уравнения (16) сводится к следующему. В общем процессе почвообразования действуют два глобальных закона симметрии (подобия), дополняющих друг друга - аридный и гумидный. Любая почва - обязательно представляется в виде комбинация того и другого, и только в асимптотическом пределе стремится к одному из них. В этом можно увидеть конкретное проявление методологического принципа дополнительности Н. Бора.

Отметим, что черноземные почвы, как и следовало ожидать, всегда находятся в месте перегиба функций ПКХ. Это лучше видно на графике первой производной от функции ПКХ (10а) по  $x$  (рис.7). Таким образом наша модель подтверждает точку зрения почвоведов, высказанную И. А. Соколовым (2004), о том, что в дополнении к аридному и гумидному педокосмам, есть все основания говорить о самостоятельности еще одного - мира почв сбалансированного увлажнения, который характеризуется неустойчивым сочетанием по большинству параметров. Это является естественным, поскольку мир почв сбалансированного увлажнения расположен в диапазоне переходного почвообразования, между аридным и гумидным педокосмами. Обратим внимание на то, что именно в этом диапазоне аридная и гумидная асимптотики резко расходятся, демонстрируя возрастающую неустойчивость.

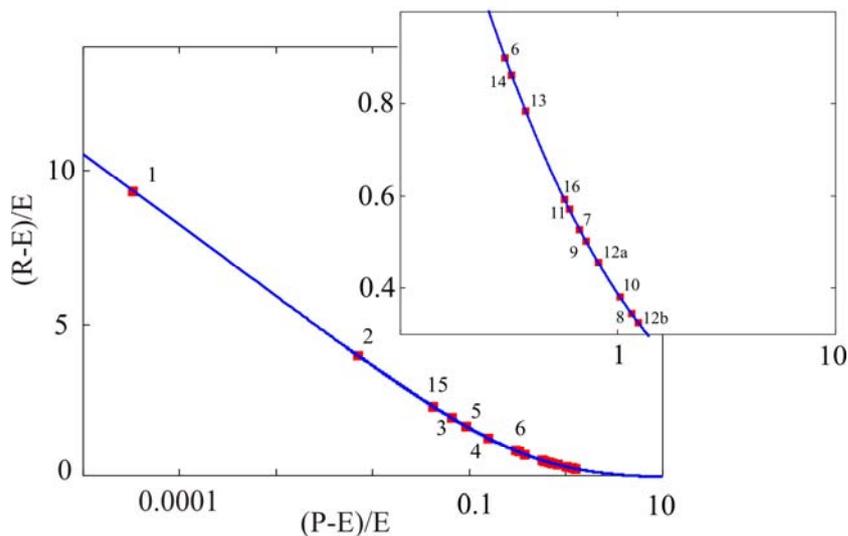
На (рис.7) видно, что в принятой системе новых почвенно-климатических коэффициентов, на графике производной от функции ПКХ почвы аридного и гумидного педокосмов располагаются на прямых с различным углом наклона.



**Рисунок 7.** График уравнения ПКХ (10а) (выделен синим цветом) и график производной от уравнения ПКХ (выделен красным цветом). Из-за своей громоздкости, уравнение производной в явном виде не приводится. Масштаб графика уменьшен для лучшего общего обзора. Расположение на функции ПКХ всех почвенно-климатических ареалов за исключением песков пустынь (выходят далеко за пределы графика) обозначено зеленым цветом и отдельно ареалов черноземов - черным цветом. Видно, что область черноземов располагается в переходной зоне на перегибе функции. Обе ветви производной от функции ПКХ асимптотически стремятся к строго прямолинейным зависимостям.

Диапазоны почвенно-климатических ареалов сильно перекрывают друг друга. Это является следствием того, что относительные переменные - почвенно-климатические гидротермические коэффициенты, рассмотренные в настоящей работе, отражают только самые общие, универсальные почвенно-климатические закономерности. За их рамками остается большое количество не учтенных факторов. Однако возможно воспользоваться процедурой усреднения параметров каждого почвенно-климатического ареала и проанализировать расположения их проекций друг относительно друга на кривой ПКХ - в линейном представлении. Эти результаты представлены на (рис.8).

Основная закономерность, ярко проявившаяся на этом "одномерном" рисунке, заключается в том, что черноземный почвенно-климатический ареал (номер 6) естественным образом разделяет почвы аридного педокосма (к ним относятся ареалы с номерами 1, 2, 3, 4, 5, 15) от почв гумидного царства (ареалы с номерами 7, 8, 9, 10, 11, 12а, 12в, 13, 14, 16). Новизна здесь заключается не в самом разделении ареалов, а в методе, с помощью которого эта группировка произведена. То, что модель подтверждает совершенно естественные представления почвоведов, свидетельствует о правильности исходной схематизации описываемого явления.



**Рисунок 8.** Расположение средних значений почвенно-гидротермических коэффициентов для почвенно-климатических ареалов на графике уравнения ПКХ. Номера почвенно-климатических

ареалов соответствуют нумерации рисунка 2. Врезка в верхнем правом углу показывает нижнюю правую часть графика в увеличенном масштабе. Область черноземов (номер 6) отделяет аридные почвы (1, 2, 3, 4, 5, 15) от гумидных (7 - 16). Видно, что некоторые почвы стягиваются в группы, примерно соответствующие гидрорядам В. Р. Волобуева. Отметим, что относительное расположение почвенных групп примерно соответствует пропорции золотого сечения.

Обратим внимание на стягивание некоторых почв в близкие группы. Сопоставление этих групп, с гидротермической системой В. Р. Волобуева, позволяет отнести их к соответствующим гидрорядам. Однако раскрытие их тонкой структуры, в рамках принятого в настоящей работе приближения невозможно. Для этого необходимо перейти от относительных величин к абсолютным, и выбрать в качестве новых переменных - гидро- и терморяды. Забегая вперед, отметим, что в этом случае, между рядами можно установить взаимосвязи, дополняющие ПКХ. В силу ограниченности объема статьи, мы предполагаем сделать это в отдельной работе.

Новый теоретический подход, рассмотренный в настоящей работе и новые результаты, получены в результате применения фундаментального принципа симметрии, в форме анализа размерности, к задаче установления зависимости характера почвенного покрова от гидротермических условий. В результате оказалось возможным более полно учесть специфику взаимосвязей между различными факторами почвообразования. Отметим, что посредством учета зависимости испарения почвенной влаги от гранулометрического состава почв, от их расположения на катене и других факторов, существует возможность дальнейшего обобщения рассмотренного подхода.

В заключении подчеркнем, что нахождение моделей и границ их применимости, адекватных каждому уровню познания, является основным содержанием науки. Хотя пределов уточнения моделей практически не существует, всегда есть разумный предел в стремлении более глубоко познать природу. С этих позиций следует относиться и к модели ПКХ, описанной в настоящей работе. В определенном отношении она является обобщением традиционных методов, но существует и более общий взгляд на почвенные закономерности, с позиций которого модель все равно является сильно идеализированной.

## ВЫВОДЫ

1. Ограниченная применимость традиционных гидротермических коэффициентов - радиационного индекса сухости Будыко и коэффициента увлажнения Высоцкого - Иванова, при характеристике особенностей распределения почв в зависимости от гидротермических условий, является следствием использования в их определениях не полного набора переменных, существенных для процессов тепло-влагообмена почв с атмосферой. При количественном описании почвенных закономерностей, использование в качестве эталонов различных состояний свободной влаги, чрезмерно огрубляет (идеализирует) физическую картину этих явлений.

2. Условием логической совместимости традиционных коэффициентов, при их одновременном использовании с уравнением испарения почвенной влаги, для более полной характеристики гидротермических условий почвообразования, является использование в определениях обоих коэффициентах, в качестве общего масштаба - функции испарения почвенной (а не свободной) влаги. Такие определения более адекватно отражают специфику неразрывного взаимодействия процессов тепло-влагообмена почвы и климата, с одновременным учетом свойств почвенного субстрата.

3. Определены два новых понятия - критерия подобия, играющих роль новых, более общих почвенно-климатических коэффициентов. Показано, что связь новых коэффициентов и традиционных носит асимптотический характер. Тем самым установлен факт не универсальности традиционных гидротермических коэффициентов и обозначены границы их применимости.

4. Из уравнения испарения почвенной влаги М. И. Будыко, с использованием новых почвенно-климатических коэффициентов, выведено уравнение, остающееся инвариантным при любых изменениях переменных. Это универсальное уравнение предложено называть "почвенно-климатической характеристикой" (ПКХ), поскольку оно в более общем виде, по сравнению с традиционными коэффициентами, отражает специфику взаимодействия тепла, влаги и почвенного субстрата в почвообразовательном процессе.

5. Универсальность уравнения ПКХ позволяет рассматривать его как предпосылку простейшей феноменологической теории, из которой логически следует:

а) вывод традиционных климатических гидротермических коэффициентов как асимптотических пределов новых почвенно-климатических коэффициентов;

б) теоретическое предсказание существования двух областей автомодельности общего уравнения ПКХ, характеризующихся различными симметриями подобия. С этими областями естественно связываются группы почв аридного и гумидного педокосмов;

в) доказательство невозможности теоретической группировки почв в случае использования традиционных климатических гидротермических коэффициентов;

г) возможность приближенного рассмотрения уравнения ПКХ как суперпозиции двух составляющих (аридной и гумидной) с нелинейными весовыми коэффициентами. В таком приближении каждая почва характеризуется различным вкладом аридной и гумидной составляющих. Диапазон увлажнения, с приблизительно равным вкладом составляющих, естественно интерпретируется как педокосм почв сбалансированного (или переходного) увлажнения. Такой подход дает возможность провести группировку почв, основанную на принципах подобия и показывает принципиальную роль в исследовании как точных методов, так и приближенных.

6. Показано, что причина ограниченной применимости количественного подхода В. Р. Волобуева в экологии почв, основанного на энергетических представлениях, связана не только с тем, что в коэффициенте увлажнения используются усредненные значения отдельных факторов почвообразования, но и с тем, что в качестве системы отсчета для них принимаются состояния почв только с высоким уровнем увлажнения.

#### ФИНАНСОВАЯ ПОДДЕРЖКА

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства высшего образования и науки Российской Федерации по государственному заданию Института почвоведения и агрохимии СО РАН, г. Новосибирск.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Волобуев В.Р. О почвенно-климатических ареалах // *Почвоведение*. 1945. № 1. С. 3–16.
2. Волобуев В. Р. *Почвы и климат*. Баку: Изд. Акад. наук Азерб. ССР., 1953. 320 с.
3. Волобуев В. Р. Климатические условия и почвы // *Почвоведение*. 1956. № 4. С. 24–37.
4. Волобуев В. Р. *Экология почв*. Баку: Изд-во АН Азерб. ССР, 1963.
5. Волобуев В. Р. *Система почв мира*. Баку: ЭЛМ, 1973. 308 с.
6. Волобуев В. Р. *Введение в энергетику почвообразования*. М.: Наука, 1974. 128 с.
7. Глазовская М. А. *Общее почвоведение и география почв*. М. Высшая школа. 1981. 400 с.
8. Гухман А. А. *Введение в теорию подобия*. М.: Высшая школа, 1973. 296 с.
9. Добровольский Г. В., Урусевич И. С. *География почв*. М. Изд-во МГУ. 2004. 460 С.
10. Ковда В.А. *Основы учения о почвах*. М.: Наука, 1973. Т. 1. 448 с.
11. Кутателадзе С. С. *Анализ подобия в теплофизике*. Новосибирск, Наука Сиб. отд., 1982. 280 с.
12. Левич А.П. Метаболическое время естественных систем // *Системные исследования*. М.: Наука, 1989. С. 304–325.
13. Планк М. *Единство физической картины мира*. М.: Наука, 1966. 288 с.
14. Реймерс Н. Ф. *Природопользование. Словарь-справочник*. М.: Мысль, 1990. 637 с.
15. Седов Л. И. *Методы подобия и размерности в механике*. М. Наука. 1981. 448 с.
16. Сена Л.А. *Единицы физических величин и их размерности*. М.: Наука, 1988, 309 с.
17. Соколов И. А. *Теоретические проблемы генетического почвоведения*. Новосибирск: "Гуманитарные технологии", 2004. 288 с.
18. Хильми Г. Ф. Методологические вопросы наук о биосфере // *Материалистическая диалектика и методы естественных наук*. М.: Наука, 1968. 489–497 с.
19. Чичулин А. В., Елизарова Т. Н. Эвристический характер принципа подобия в физике почв // *Сибирский экологический журнал*. 2004. Т.11. № 3. С. 433–443.
20. Чичулин А.В., Дитц Л.Ю. Инвариантная форма влажностной характеристики почв // *Материалы V Всероссийского съезда общества почвоведов им. В. В. Докучаева*. 2008. Тезисы докладов. Ростов-на-Дону: Ростиздат. С. 506.
21. Чичулин А.В. Пространственно-временные симметрии физических явлений в почвах // *Сибирский экологический журнал*. 2010. Т.17. № 3. С.389–398.
22. Чичулин А.В., Шапорина Н.А. Методологическое значение анализа размерности в экологии почв // *Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований*. 2016. № 12. Вып.8. С.1474–1478.

Поступила в редакцию 01.12.2019

Принята 19.12.2019

Опубликована 19.12.2019

**Сведения об авторах:**

**Чичулин Александр Валентинович** – кандидат биологических наук, старший научный сотрудник лаборатории почвенно-физических процессов Института почвоведения и агрохимии СО РАН (Новосибирск, Россия); [chichulin@issa-siberia.ru](mailto:chichulin@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/)

**METHODOLOGICAL ANALYSIS OF THE CONCEPTUAL FRAMEWORK  
IN SOIL ECOLOGY**

© 2019 A. V. Chichulin

*Address: Institute of Soil Science and Agrochemistry of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia. E-mail: [chichulin@issa-siberia.ru](mailto:chichulin@issa-siberia.ru)*

*A methodological analysis is carried out and the reasons for the limited applicability in solving a number of problems in soil ecology of traditional climatic hydrothermal coefficients — the radiation index of Budyko dryness and the Vysotsky-Ivanov wetting coefficient — are clarified. Based on the analysis of the dimension applied to the problem of the dependence of the nature of the soil cover on hydrothermal conditions, new concepts are introduced - dimensionless similarity criteria, which play the role of soil-climate coefficients, which have a wider range of epistemological accuracy compared to traditional ones. It is shown that the relationship between traditional climatic and new soil-climatic hydrothermal coefficients is asymptotic. Using the empirical equation of M. I. Budyko for evaporation of soil moisture and soil-climatic coefficients, a new physico-theoretical approach is developed and the equation of "soil-climatic characteristics" (PCC) is taken into account, taking into account the combined influence of climatic properties (through long-term average the values of the radiation balance  $R$  and precipitation  $P$ ) and the properties of the soil substrate (through the evaporation of soil moisture  $E$  ( $R, P$ )) on the features of the soil formation process. It is shown that, in contrast to the traditional approach, which organizes soil properties on an empirical climatic basis, the new approach has the ability to theoretically predict a number of soil patterns, in particular, grouping soils into arid, humid, and balanced pedocosms.*

**Key words:** soil ecology; principles of symmetry; principle of complementarity; hydrothermal coefficients; idealization; mathematical model

**How to cite:** Chichulin A.V. Methodological analysis of the conceptual framework in soil ecology // *The Journal of Soils and Environment*. 2019. 2(3). e89. doi: [10.31251/pos.v2i3.89](https://doi.org/10.31251/pos.v2i3.89) (in Russian with English abstract)

REFERENCES

1. Volobuev V.R. On Soil-Climatic Areas, *Pochvovedenie*, 1945, No.1, p.3-16. (in Russian)
2. Volobuev V.R. *Soils and climate*. Baku: Acad. Sciences Azerb. SSR., 1953. 320 p. (in Russian)
3. Volobuev V.R. Climatic conditions and soils, *Pochvovedenie*, 1956, No. 4, p.24-37. (in Russian)
4. Volobuev V.R. *Soil system of the world*. Baku: ELM Publ., 1973. 308 p. (in Russian)
5. Volobuev V.R. *Ecology of soils*. Baku: Publishing House of the Academy of Sciences of Azerbaijan. SSR, 1963. (in Russian)
6. Volobuev V.R. *Introduction to the energy of soil formation*. Moscow: Nauka Publ., 1974. 128 p. (in Russian)
7. Glazovskaya M. A. *General soil science and soil geography*. Moscow: High School Publ., 1981. 400 p. (in Russian)
8. Gukhman A.A. *Introduction to the theory of similarity*. Moscow: Higher School Publ., 1973. 296 p. (in Russian)
9. Dobrovolsky G.V., Urusevich I.S. *Geography of soils*. Moscow: Publishing House of Moscow State University. 2004. 460 p. (in Russian)
10. Kovda V.A. *Fundamentals of the doctrine of soils*. Moscow: Nauka Publ., 1973.V. 1. 448 p. (in Russian)
11. Kutateladze S. S. *Similarity analysis in thermal physics*. Novosibirsk: Nauka Publ., 1982. 280 p. (in Russian)

12. Levich A.P. Metabolic time of natural systems. In book: *System studies*. Moscow: Nauka Publ., 1989, p. 304-325. (in Russian)
13. Planck M. *Unity of the physical picture of the world*. Moscow: Nauka Publ., 1966. 288 p. (in Russian)
14. Reimers N.F. *Nature Management. Dictionary*. Moscow: Mysl' Publ., 1990. 637 p. (in Russian)
15. Sedov L.I. *Methods of similarity and dimension in mechanics*. Moscow: Nauka Publ., 1981. 448 p. (in Russian)
16. Sena L.A. *Units of physical quantities and their dimensions*. Moscow: Nauka Publ., 1988. 309 p. (in Russian)
17. Sokolov I. A. *Theoretical Problems of Genetic Soil Science*. Novosibirsk: Humanitarian Technologies Publ., 2004. 288 p. (in Russian)
18. Hilmi G.F. Methodological issues of the biosphere sciences. In book: *Materialistic dialectics and methods of natural sciences*. Moscow: Nauka Publ., 1968. 489-497 p. (in Russian)
19. Chichulin A. V., Elizarova T. N. Heuristic Character of the Similarity Principle in the Physics of Soil, *Sibirskii ekologicheskii zhurnal*, 2004. 11(3), p. 433–443. (in Russian)
20. Chichulin A. V. Ditz L. Yu. Invariant form of soil moisture characteristicsю In book: *Abstracts of the V<sup>th</sup> Russian Congress of the Society of Soil Scientists named after V.V. Dokuchaev. 2008*. Rostov-na-Donu: Rosizdat Publ., p. 506. (in Russian)
21. Chichulin A. V. Spatial-temporal symmetries of physical phenomena in soils, *Contemporary problems of ecology*, 2010, 3(3), p.272–278. doi: [10.1134/S1995425510030033](https://doi.org/10.1134/S1995425510030033)
22. Chichulin AV, Shaporina N. A. Methodological significance of dimensional analysis in soil ecology, *International Journal of Applied and Basic Research*, 2016, 12(8), p.1474-1478. (in Russian).

Received 01 December 2019

Accepted 19 December 2019

Published 19 December 2019

#### About the author:

**Chichulin Alexander V.** – Candidate of Biological Sciences, Senior Researcher in the Laboratory of Soil Physical Processes in the Institute of Soil Science and Agrochemistry of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Novosibirsk, Russia); [chichulin@issa-siberia.ru](mailto:chichulin@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/)

**ТЕМПЕРАТУРНЫЙ РЕЖИМ ТОРФЯНЫХ ОЛИГОТРОФНЫХ ПОЧВ БАКЧАРСКОГО БОЛОТА (ЗАПАДНАЯ СИБИРЬ)**

© 2019 Н.Г. Коронатова

Адрес: ФГБУН Институт почвоведения и агрохимии СО РАН, проспект Академика Лаврентьева, 8/2, г. Новосибирск, 630090, Россия. E-mail: [koronatova@issa-siberia.ru](mailto:koronatova@issa-siberia.ru)

**Цель исследования:** Изучение температурного режима торфяных олиготрофных почв разных экосистем Бакчарского болотного комплекса (южная тайга Западной Сибири).

**Место и время проведения.** Исследование проведено в 2012–2013 гг. в болотных экосистемах Бакчарского комплекса (56°50' с.ш., 82°50' в.д.): в сосново-кустарничково-сфагновом ряме, пушицево-сфагновой топи с кустарничково-сфагновыми кочками, а также осоково-сфагновой топи.

**Методология.** Автоматические измерители почвенной температуры АИПТ (ИМКЭС СО РАН, г. Томск) один раз в час фиксировали почвенную температуру на глубине 2, 5, 10, 15, 20, 30, 40, 60, 80, 120, 160 и 240 см. На основе полученных данных рассчитаны средняя годовая, месячная и суточная температура, годовая амплитуда, суммы положительных и отрицательных температур, индексы нагреваемости и охлаждения, градиенты температур, динамика сезонно-мёрзлого слоя. В работе привлекали данные о температуре воздуха и высоте снежного покрова метеостанции Бакчар ([gr5.ru](http://gr5.ru)).

**Основные результаты.** Средняя годовая температура всего почвенного профиля составила в осоковой топи 5,4 °С, в пушицевой топи 4,7 °С, в ряме 3,3 °С. Годовая амплитуда на глубине 20 см была 15,1 °С в ряме, 15,4 °С в пушицевой топи и 21,6 °С в осоковой топи. Средние месячные максимумы пришлись на июль в верхней торфяной толще, а с глубиной наблюдался сдвиг тепловой волны, наиболее существенный в ряме. Средние месячные минимумы пришлись на декабрь, в то время как средние суточные минимумы достигли самых низких значений в ноябре в связи с отсутствием или малой мощностью снежного покрова. Сумма положительных средних суточных температур за 2012/13 гидрологический год была выше в обводнённой осоковой топи (2156 и 2280 °С на глубине 2 и 20 см) по сравнению с рямом (1906 и 1474 °С на глубине 2 и 20 см). Сумма отрицательных температур на глубине 2 и 20 см была соответственно –485 °С и –188 °С в ряме, –872 °С и –378 °С в осоковой топи, –225 °С и –67 °С в пушицевой топи. Наибольшие летние градиенты характерны для пушицевой топи в мае и июле, в два раза меньше – для осоковой топи в июле. Наибольшие зимние градиенты, напротив, получены для осоковой топи и в два раза меньше – для пушицевой топи. Самые низкие значения градиентов получены в ряме, где они близки к 0 °С/см ниже 60 см в течение всего года. Сезонная мерзлота проникла до глубины 59 см в осоковой топи, 44 см – в пушицевой топи и 53 см – в ряме, а длительность сохранения устойчивой мерзлоты в поверхностном слое – 171, 157 и 181 день, соответственно.

**Заключение.** В почве пушицевой топи разница между холодным и тёплым временем года более сглажена, в то время как почва осоковой топи характеризуется более изменчивым и тёплым климатом, а почва ряма – более изменчивым и холодным. Найденная разница в температурных режимах почв связана с микрорельефом, от которого зависит уровень стояния болотных вод и перераспределение снежного покрова. Температурные режимы рямов и топей Бакчарского болотного комплекса различаются по результатам разных исследований, что обусловлено не только различными годами изучения, но и проведением исследования на разных элементах микрорельефа в сходных болотных экосистемах и, возможно, мезоклиматическими различиями.

**Ключевые слова:** Бакчарское болото; температурный режим; торфяная олиготрофная почва; южная тайга Западной Сибири

**Цитирование:** Коронатова Н.Г. Температурный режим торфяных олиготрофных почв Бакчарского болота (Западная Сибирь) // Почвы и окружающая среда. 2019. Том 2. № 3. е79. doi: 10.31251/pos.v2i3.79

**ВВЕДЕНИЕ**

Изучение температурного режима торфяных олиготрофных почв особенно актуально для Западной Сибири, где болота занимают огромные площади, достигающие в таёжной зоне четверти территории (Романова, 1985). В настоящее время активное изучение проводится в экосистемах Бакчарского болотного комплекса в пределах Томской области (Дюкарев и др., 2009; Дюкарев, Головацкая, 2013; Киселев и др., 2015; 2017; и др.), что позволяет выявить многие особенности

температурного режима торфяных почв разных болотных экосистем. Однако эти исследования остаются точечными, что затрудняет возможности экстраполяции результатов на весь болотный массив в связи с тем, что расчленённый болотный микрорельеф обуславливает изменчивость некоторых параметров температурного режима почв, приуроченных к разным его элементам, и не позволяет получить надёжные усреднённые оценки (Болота..., 1976). Поэтому существует потребность в увеличении числа наблюдений за температурными показателями торфяных почв в пределах одного болотного массива.

Цель работы – изучение температурного режима торфяных олиготрофных почв разных экосистем Бакчарского болотного комплекса (южная тайга Западной Сибири).

#### МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Наблюдения за температурным режимом торфяных почв проводили в трёх экосистемах комплексного Бакчарского болота (56°50' с.ш., 82°50' в.д.): в повышенной более дренированной экосистеме с сосново-кустарничково-сфагновым фитоценозом (ряме) и двух пониженных обводнённых экосистемах – осоково-сфагновой проточной топи (осоковой топи) и кустарничково-пушицево-сфагновой краевой части топи, прилегающей к ряму (пушицевой топи). Расстояние между наиболее удалёнными точками составило 500 м. Микрорельеф был хорошо выражен в ряме и пушицевой топи, где присутствовали кочки различной высоты и межкочечные понижения. В ряме кочки занимали большую часть площади, а видовой состав растений кочек и межкочечных понижений мало различался и включал такие доминирующие виды, как сосна *Pinus sylvestris*, багульник *Ledum palustre* и мох *Sphagnum fuscum*. В отличие от ряма, в пушицевой топи значительную часть площади занимали обводнённые плоские межкочечные понижения, где доминировали пушица *Eriophorum vaginatum* и мох *S. fallax*, в то время как на кочках преобладали кустарничек *Chamaedaphne calyculata* и мох *S. angustifolium*. В осоковой топи поверхность выровнена, в фитоценозе доминировали крупная осока *Carex rostrata* и тот же вид мха, что в пушицевой топи – *S. fallax*. Редко встречались крупные плоские кочки с таким же видовым составом растений. Травы почти отсутствовали в ряме, увеличивали своё проективное покрытие до 25–30% в пушицевой топи и до 80–85% – в осоковой топи. Уровень болотных вод (УБВ) находился на глубине 0–20 см от выровненных поверхностей и плоских понижений в топах и на глубине 15–40 см от уровня межкочечных понижений в ряме. Почвы – торфяные олиготрофные (Классификация..., 2004), или *Fibrist Hystosols* (IUSS, 2015). Мощность торфа около 2,5 м.

Исследование проведено с использованием температурных логгеров – автономных измерителей почвенной температуры АИПТ (ИМКЭС СО РАН, г. Томск) (Кураков и др., 2008). Логгеры установили 26 июня 2012 г. в кочках высотой 30–40 см в ряме и осоковой топи, которые за время наблюдений не заливались болотными водами, и в обводнённой выровненной западине пушицевой топи. Фиксация температуры продолжалась до 18 сентября 2013 г., а в пушицевой топи – лишь до 21 мая 2013 г., когда оборудование вышло из строя из-за высокой обводнённости. Запись температурных показателей проводилась на глубине 2, 5, 10, 15, 20, 30, 40, 60, 80, 120, 160, 240 см с периодичностью один раз в час. В пушицевой топи датчик, размещённый на глубине 40 см не работал, и данные для этой глубины не были получены.

Для оценки погодных условий в течение изучаемого периода (табл. 1) использованы данные о температуре воздуха, количестве осадков и высоте снежного покрова метеостанции Бакчар (Расписание..., 2017).

**Таблица 1**

Климатическая характеристика района исследования по данным метеостанции Бакчар за гидрологический год с 01 сентября 2012 г. по 31 августа 2013 г.

Параметры	Показатели
Средняя годовая температура, °С	0,69
Средняя температура самого тёплого месяца, °С	18,7
Средняя температура самого холодного месяца, °С	–25,5
Сумма положительных температур воздуха, °С	2371
Сумма отрицательных температур воздуха, °С	–2364
Годовая сумма осадков, мм	520

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

*Средние значения и годовая амплитуда температуры.* Средняя годовая температура в торфяной почве болотных экосистем слабо менялась с глубиной: в ряме снизилась от 3,9 °С в поверхностном слое до 2,7 °С на глубине 160 см и возросла до 3,0 °С на глубине 240 см; в осоковой топи увеличилась от 3,4 °С в поверхностном слое до 6,7 °С на глубине 160 см и уменьшилась до 6,2 °С на глубине 240 см. В пушицевой топи средняя температура за неполный год незначительно увеличилась от поверхности к наиболее глубоким слоям на 0,15 °С, составив в среднем 4,7 °С.

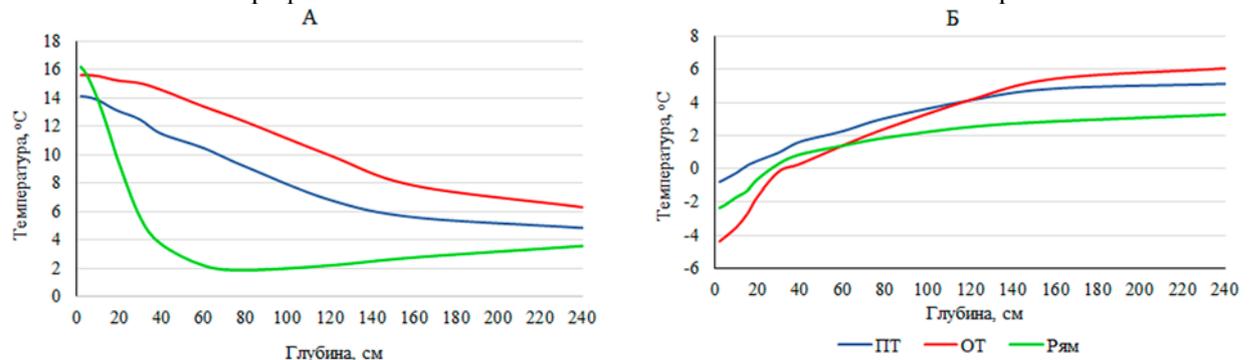
Годовая амплитуда температуры на глубине 20 см характеризует степень континентальности почвенного климата (Димо, 1972). На этой глубине амплитуда составила 15,1 °С в ряме и 15,4 °С в пушицевой топи, что соответствует мягкому почвенному климату, и 21,6 °С – в осоковой топи, что соответствует умеренному континентальному почвенному климату (рис. 1). В осоковой топи амплитуда была выше по всему профилю, а наименьшая амплитуда характерна для ряма, хотя в поверхностном слое 0–20 см она оказалась выше, чем в пушицевой топи.



**Рисунок 1.** Годовая амплитуда температуры торфяных олиготрофных почв (2012/13 гг.). ПТ – пушицевая топь, ОТ – осоковая топь.

Средняя температура в течение тёплого периода (июнь–сентябрь) в обеих топях имела одинаковый ход изменения с глубиной, но осоковая топь на 1,5–3,1 °С теплее, чем пушицевая (рис. 2А). В ряме средняя температура тёплого периода в верхних 2–5 см была такой же, как в осоковой топи, но, в отличие от обеих топей, с глубиной резко снизилась.

В течение холодного периода (октябрь–март) средняя температура увеличилась с глубиной от отрицательных к положительным значениям (рис. 2Б), причём среднее значение стало положительным на глубине 25–30 см в осоковой топи и ряме, и на глубине 13 см в пушицевой топи, что отражает разный УБВ в месте установки логгеров в связи с неоднородностью микрорельефа. В осоковой топи торфяная толща до 60 см оставалась самой холодной по сравнению с остальными, но стала наиболее прогретой ниже 120 см, а в пушицевой топи верхняя часть почвенного профиля была самой тёплой в связи с самым близким к поверхности УБВ.



**Рисунок 2.** Средняя температура торфяных почв на разных глубинах: А – в течение тёплого периода (июнь–сентябрь 2012 г.), Б – в течение холодного периода (октябрь 2012 г. – март 2013 г.). ПТ – пушицевая топь, ОТ – осоковая топь.

Средняя месячная температура самого тёплого месяца имела наибольшую величину в осоковой топи, а в ряме и пушицевой топи отмечены сходные значения в верхних горизонтах (табл. 2). В осоковой топи средние месячные максимумы пришлись на июль до глубины 60 см; на глубине 80 см были в июле или смещались на август в зависимости от года (2012 и 2013 гг.); на глубине 120 см пришлись на август; 160 см – на август–сентябрь и 240 см – на сентябрь–октябрь. В ряме средние месячные максимумы отмечены в июле только до глубины 20 см, а в пушицевой топи – до глубины 30 см. В нижележащей толще произошло смещение тепловой волны во времени: в ряме в слое 30–80 см – на август, на глубине 120 см – на сентябрь, 160 см – на октябрь, 240 см – на ноябрь; в пушицевой топи в слое 60–80 см – на август, в слое 120–160 см – на сентябрь, 240 см – на октябрь.

Самая низкая средняя месячная температура установлена в верхнем торфяном слое в осоковой топи, а пушицевая топь промёрзла зимой менее всего. На глубине 60 см и ниже средние месячные значения оставались положительными во всех болотных экосистемах. Минимальные месячные температуры пришлись на декабрь 2012 г. во всех экосистемах, они проникли до глубины 30 см в ряме, 15 см – в осоковой топи и 5 см – в пушицевой топи, в соответствии с глубиной стояния УБВ. Ниже этих глубин произошло смещение минимальных месячных температур во времени (запаздывание), так что на глубине 160–240 см они были в июне в ряме и в мае – в обеих топях.

Таблица 2

Средняя месячная температура (°С) самого тёплого и холодного месяцев в течение 2012/13 гидрологического года на разных глубинах торфяных почв

Экосистема	Максимальная средняя месячная температура на глубине, см			Минимальная средняя месячная температура на глубине, см		
	2	20	240	2	20	240
Ряма	17,8	13,0	2,8	-5,2	-2,1	2,4
Пушицевая топь	17,5	14,8	4,2	-1,9	-0,6	3,6
Осоковая топь	19,9	18,6	5,7	-7,3	-3,0	3,9

Суточные колебания температуры можно было проследить в тёплое время года, они достигли глубины 20 см в пушицевой топи, 30 см – в ряме и 40 см – в осоковой топи. Самые высокие значения температуры отмечены 20 июля 2012 г., причём разброс значений между экосистемами составил почти 10 °С. Так, максимум на глубине 2 см в ряме составил 34,5 °С, в осоковой топи – 30,0 °С и в пушицевой топи – 26,8 °С, что отражает увеличение обводнённости от рямы к пушицевой топи. По данным метеостанции Бакчар максимальная температура воздуха в этот день достигла 35,0 °С. Минимальная суточная температура зафиксирована в ноябре во всех экосистемах на глубине 2 см, её значение составило -18,0 °С в осоковой топи 26 ноября, -4,9 °С в пушицевой топи 8 ноября и -10,0 °С в ряме 9 ноября. Разница в датах наступления суточных минимумов и их значениях связана, очевидно, с накоплением и перераспределением снега в начале зимы: снег задерживался в ряме деревьями и кустарничками, сносился в понижения пушицевой топи и выдувался ветрами с повышений в осоковой топи. По мере установления снежного покрова и его нарастания в течение зимы произошло повышение суточной температуры. Во второй половине зимы, с января по март, она менялась от -12,8 до -7,3 °С в осоковой топи, от -5,2 до -2,2 °С в ряме и от -2,9 до -2,1 °С в пушицевой топи.

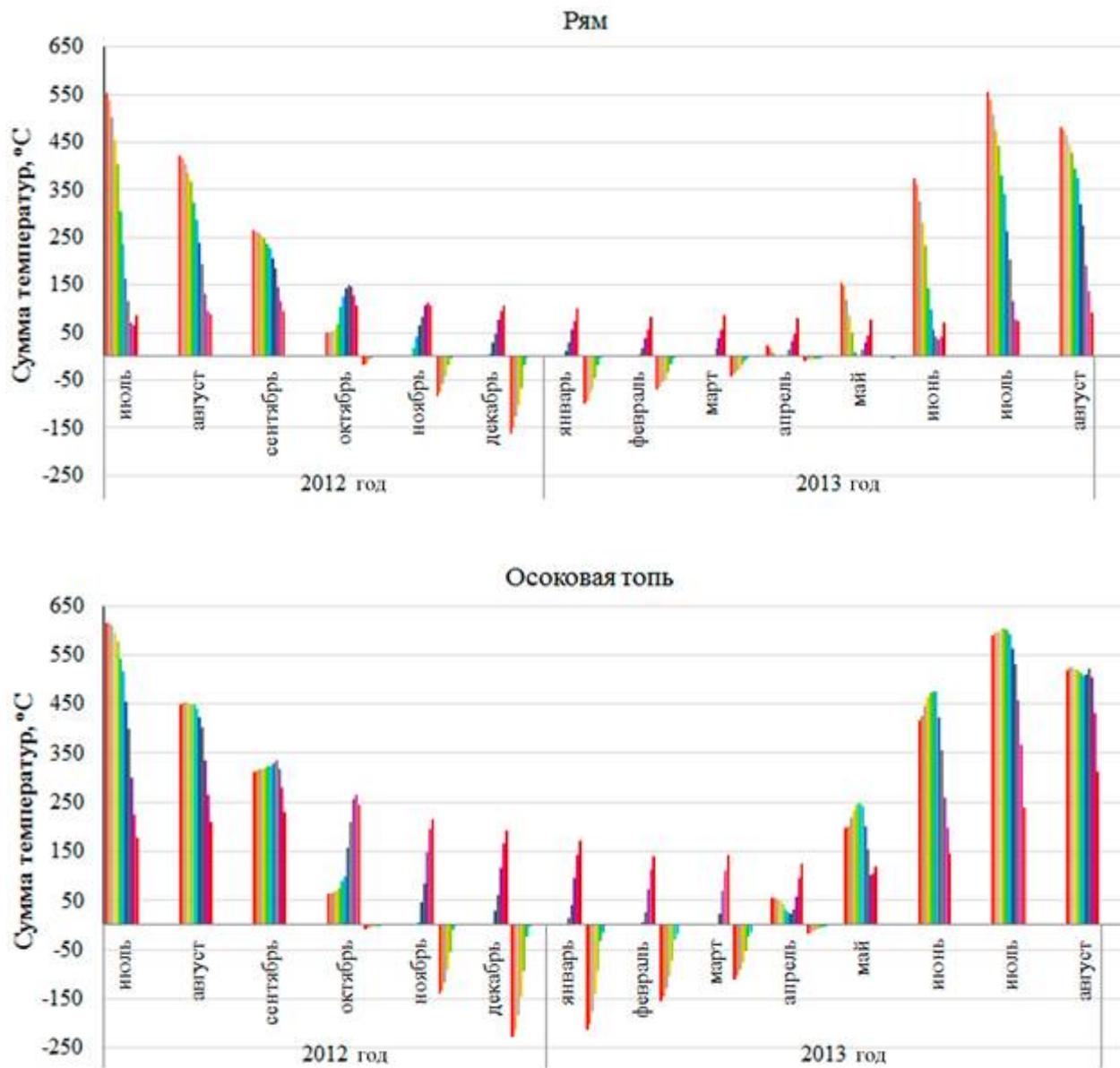
Таблица 3

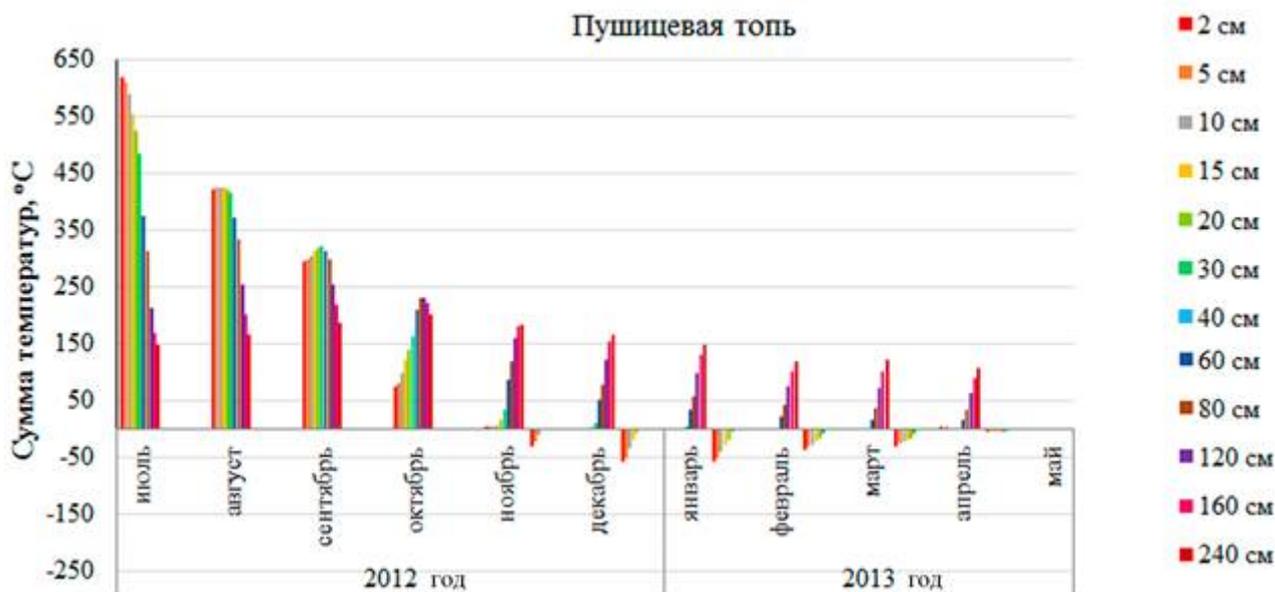
Суммы положительных и отрицательных температур (°С) на глубине 2 см и 20 см за 2012/13 гидрологический год

Экосистема	Суммы положительных температур на глубине, см		Суммы отрицательных температур на глубине, см	
	2	20	2	20
Ряма	1906	1474	-485	-188
Осоковая топь	2156	2280	-872	-378
Пушицевая топь	нет данных	нет данных	-225	-67

Сумма положительных и отрицательных температур. Сумма положительных средних суточных температур за 2012/13 гидрологический год была выше в обводнённой осоковой топи по

сравнению с рямом, причём с глубиной эта разница увеличилась и составила 800 °С (табл. 3). Интересно, что в топи на глубине 20 см сумма положительных температур оказалась выше, чем на глубине 2 см за счёт более высоких температур в сентябре и октябре 2012 г. и с мая по июль 2013 г. Вероятно, это связано с тем, что стоящие у поверхности болотные воды хорошо прогреваются и сохраняют тепло в прохладные дни лета и осени, когда свободные от болотных вод кочки остывают. Полученные суммы отрицательных температур оказались больше (по модулю) в кочке осоковой топи по сравнению с кочкой ряма на обеих глубинах. Однако в пушицевой топи абсолютные значения сумм отрицательных температур на двух глубинах были в 2,2–2,8 раза меньше, чем в ряме и в 3,9–5,6 раз ниже, чем в осоковой топи.





**Рисунок 3.** Динамика изменений суммы положительных и отрицательных температур (°C) в почвах болотных экосистем на разных глубинах.

В годовой динамике сумм положительных температур для всех экосистем характерны максимальные значения в июле, более высокие значения в нижележащих слоях в течение холодного периода, начиная с октября, а также появление положительных температур в верхнем слое в апреле (рис. 3). Отметим, что в апреле в осоковой топи положительные температуры охватили всю толщу и имели более высокие значения в верхнем слое по сравнению с другими экосистемами, несмотря на то, что зимой этот слой наиболее сильно промерзал. Суммы отрицательных температур были наибольшими в декабре и январе в топях и в декабре – в ряме.

Соотношения сумм положительных и отрицательных температур на глубине 20 см к положительным и отрицательным суммам температуры воздуха характеризуют степень нагреваемости почв (Димо, 1972; Трофимова, Балыбина, 2015). Для гидрологического года 2012/13 этот показатель был равен 0,62 для ряма и 0,96 для осоковой топи, что говорит о значительно лучшем прогревании топи.

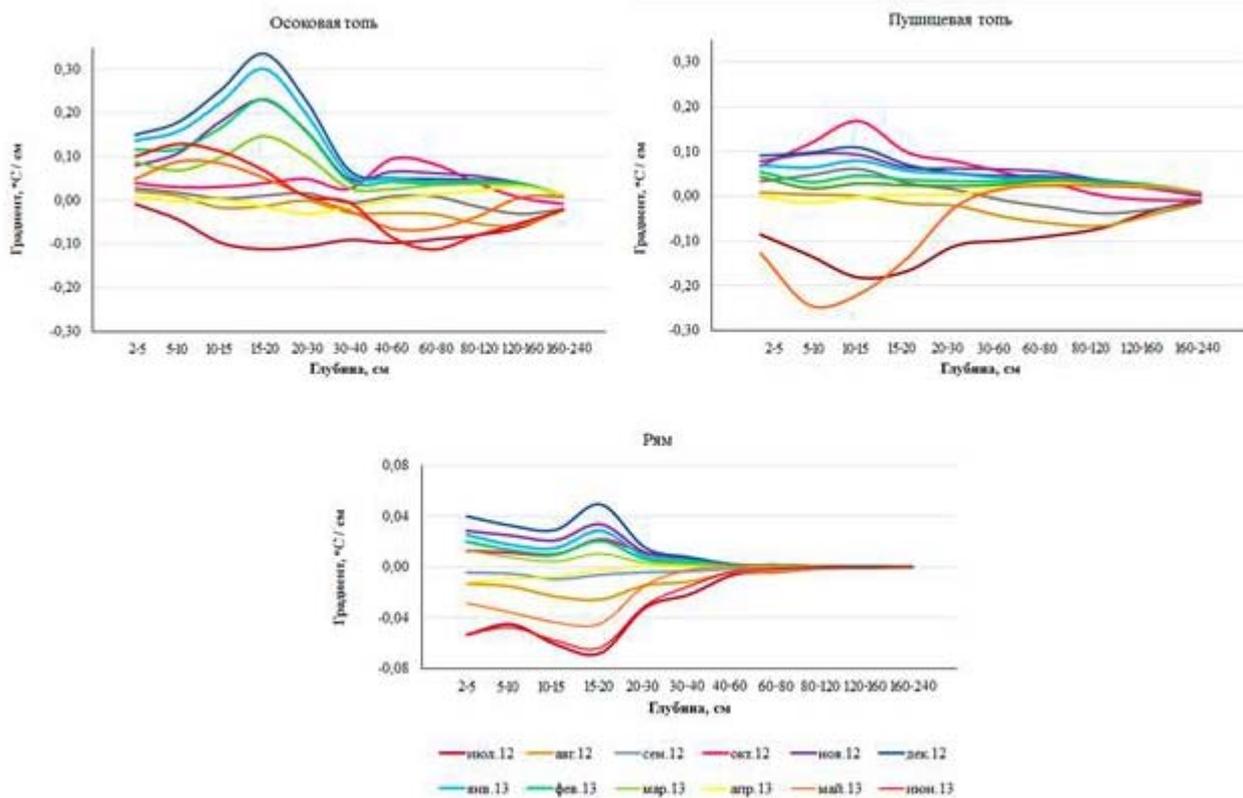
Для годовой динамики этого показателя характерны максимальные и близкие к максимальным значения в осенний период, когда воздух остывает, а насыщенный водой торф сохраняет тепло (табл. 4). Значения, близкие к нулю, получены для зимы и весны в ряме и пушицевой топи, в связи с теплоизолирующим влиянием снежного покрова и минимальным теплообменом в это время. В осоковой топи зимний и весенний показатели существенно выше, что свидетельствует, с одной стороны, о поступлении холода зимой, вероятно, в связи с выдуванием снежного покрова, и, с другой – о стремительном прогревании весной, вероятно, в связи с более быстрым освобождением снега.

**Таблица 4**

Соотношения сумм положительных и отрицательных температур на глубине 20 см к положительным и отрицательным суммам температуры воздуха в болотных экосистемах по сезонам 2012/13 гидрологического года

Сезон	Рям	Пушицевая топь	Осоковая топь
Лето (июль–август 2012 г.)	0,63	0,78	0,84
Осень (сентябрь–октябрь 2012 г.)	0,71	1,03	0,89
Зима (ноябрь–март 2012/13 гг.)	0,08	0,02	0,16
Весна (апрель 2013 г.)	0,04	0,04	0,32
Лето (май–август 2013 г.)	0,64	н.д.	1,02

**Градиенты температуры.** Наибольшие летние градиенты характерны для пушицевой топи в мае и июле, в два раза меньше – для осоковой топи в июле. Наибольшие зимние градиенты, напротив, получены для осоковой топи и в два раза меньше – для пушицевой топи.

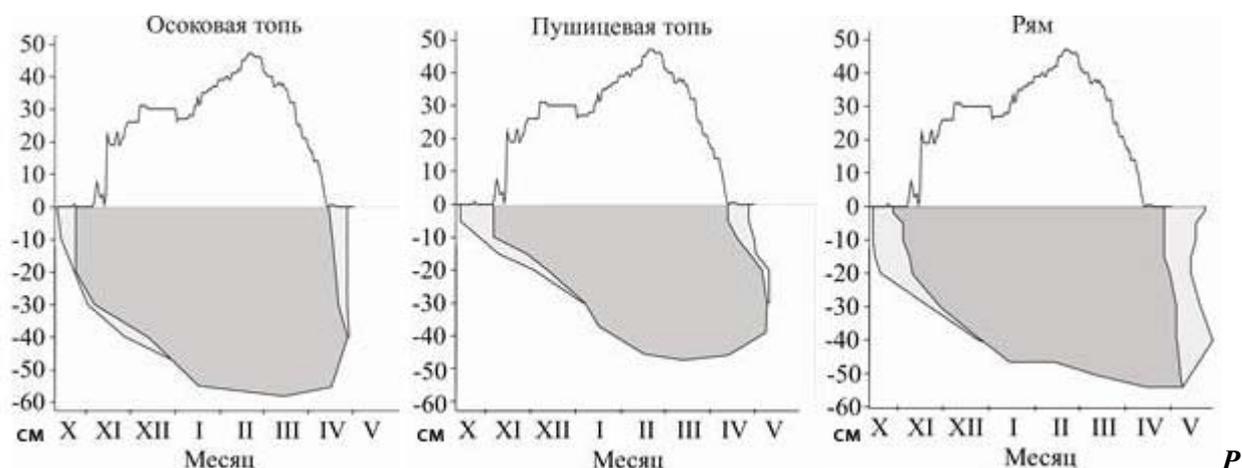


**Рисунок 4.** Градиенты температуры ( $^{\circ}\text{C}/\text{см}$ ) в профиле торфяных олиготрофных почв трёх болотных экосистем, распределённые по месяцам.

По сравнению с топями торфяная почва рьяма характеризовалась наименьшими летними и зимними градиентами. При продвижении вглубь почвенного профиля градиенты увеличились в слое 15–20 см, стали минимальны, начиная со слоя 40–60 см, и равными нулю – начиная со слоя 80–120 см. Во временном распределении максимальные абсолютные значения градиентов пришлись на декабрь, июнь и июль, а минимальные – на переходные периоды (сентябрь и апрель).

*Динамика промерзания и оттаивания.* Осенью 2012 г. заморозки начались 10 октября, в это же время стал промерзать поверхностный моховой слой болота. Постоянная сезонная мерзлота в слое 2–20 см установилась в осоковой топи 23 октября, в рьяме – проникала вглубь до 20 см в период с 25 октября по 6 ноября, а в пушицевой топи – установилась только 5 ноября в верхнем слое 0–10 см и достигла глубины 20 см к 10 декабря. Дальнейшее промерзание толщи до 30 см ещё больше различалось по срокам между экосистемами: оно установилось 5 ноября в осоковой топи, 27 ноября – в рьяме и 5 января – в пушицевой топи. Ниже этой глубины сезонная мерзлота продвигалась в осоковой топи и рьяме, достигнув глубины 40 см 11 и 22 декабря, соответственно. Максимальная глубина промерзания, рассчитанная стандартным методом (Методы..., 1957) составила 59 см в осоковой топи, 44 см – в пушицевой топи и 53 см – в рьяме, а длительность сохранения устойчивой мерзлоты в поверхностном слое – 171, 157 и 181 день, соответственно.

Первые положительные температуры воздуха в дневное время зафиксированы, начиная с 19 марта 2013 г., а положительные среднесуточные значения – с 7 апреля. Первые случаи оттаивания поверхностного слоя 0–5 см мохового покрова болот отмечены 11–12 апреля в топиях и 24 апреля в рьяме. Полное освобождение от сезонной мерзлоты произошло в осоковой топи стремительно – в течение 23–24 апреля. В пушицевой топи этот период растянулся с 28 апреля по 14 мая, а в рьяме – с 14 по 27 мая. В топиях оттаивание началось одновременно со сходом снега, зафиксированного метеостанцией Бакчар, а в рьяме на полмесяца позже, поскольку здесь снег, вероятно, задержался под сосновым пологом, особенно в понижениях и на северных склонах кочек.



**Рисунок 5.** Динамика высоты снежного покрова по данным метеостанции Бакчар (Расписание..., 2017) и глубины сезонно-мёрзлого слоя в разных болотных экосистемах.

Тёмной заливкой показан слой с постоянными отрицательными температурами, светлой – период чередующегося промерзания-оттаивания. Расчёт глубины промерзания слоя почвы между 40 и 60 см проведён стандартным методом (Методы..., 1957).

**Таблица 5**

Сравнение некоторых температурных показателей торфяных почв низких рямов Бакчарского болота по результатам данного исследования и других работ

Показатель	Низкий рям*	Низкий рям стационара «Васюганье»**
Средняя годовая температура, °С		
на глубине 2 см	3,7	4,2
на глубине 80 см	3,1	3,4
Годовая амплитуда, °С		
на глубине 2 см	23,2	18,8
на глубине 80 см	8,5	6,6
Глубина проникновения суточных колебаний, см	30	25
Глубина промерзания, см	53	26–40
Период минимальных месячных температур, месяц	Декабрь	Январь–февраль
Дата промерзания в 2012 г.		
на глубине 2 см	25.X	2.XI
на глубине 5 см	1.XI	5.XI
на глубине 20 см	6.XI	27.XI
на глубине 30 см	27.XI	22.XII
на глубине 40 см	22.XII	6.II
Дата оттаивания в 2013 г.		
на глубине 2–10 см	24.IV	18.IV
на глубине 20 см	28.IV	26.IV
на глубине 30 см	3.V	29.IV
на глубине 40 см	3.V	30.IV
Продолжительность существования сезонной мерзлоты, дней		
на глубине 2–10 см	181	168
на глубине 20 см	174	151
на глубине 30 см	158	130

Примечание. \* – результаты этого исследования; \*\* – данные опубликованных работ (Дюкарев и др., 2009; Дюкарев, 2012; Дюкарев, Головацкая, 2013; Киселев и др., 2015; Киселев и др., 2017 и Kiselev et al., 2018).

Сравнение результатов данной работы с результатами других исследований температурного режима почв Бакчарского болота. Характеристика температурного режима торфяных почв для схожих болотных экосистем Бакчарского болота, расположенных на расстоянии около 10 км от изученных в данном исследовании, опубликована в ряде работ (Дюкарев и др., 2009; Дюкарев, 2012; Дюкарев, Головацкая, 2013; Киселев и др., 2015; Киселев и др., 2017; Kiselev et al., 2018). Сравнение результатов показывает, что в нашем исследовании почва

ряма была холоднее, характеризовалась большей годовой амплитудой, глубиной промерзания и длительностью существования сезонной мерзлоты (табл. 5). При сравнении данных одних и тех же лет изучения (Киселев и др., 2017; Kiselev et al., 2018), обнаруживается, что в изученных нами болотах максимальная месячная температура в поверхностном слое была на 0,5 °С выше в ряме и на 1,6–2,5 °С – в осоковой топи, и только в пушицевой топи получено близкое значение (17,5 °С).

Сравнение температурных показателей почв топей с опубликованными результатами (Дюкарев и др., 2009; Дюкарев, 2012; Дюкарев, Головацкая, 2013; Киселев и др., 2015; Киселев и др., 2017; Kiselev et al., 2018) показывает, что топь стационара «Васюганье» по ряду показателей являлась более тёплой или характеризовалась средними значениями по сравнению с изученными нами экосистемами (табл. 6). Наибольшая разница обнаружена в продолжительности существования сезонной мерзлоты.

Таблица 6

Сравнение некоторых температурных показателей торфяных почв топей Бакчарского болота по результатам данного исследования и других работ

Показатели	Осоковая топь*	Пушицевая топь*	Топь стационара «Васюганье»**
Средняя годовая температура, °С			
на глубине 2 см	3,3	4,6	5,3
на глубине 240 см	5,8	4,7	5,6
Наибольшая средняя месячная температура, °С			
на глубине 2 см	19,9	17,5	18,1
на глубине 240 см	7,9	6,4	6,8
Наименьшая средняя месячная температура, °С			
на глубине 2 см	-7,3	-1,9	-2,6
на глубине 240 см	3,3	3,6	4,4
Максимальная средняя суточная температура в слое до 10 см в июле 2012 г., °С	23,2–22,6	20,5–19,1	25,9–23,3
Годовая амплитуда на глубине 240 см, °С	3,7	2,9	2,5–2,9
Глубина проникновения суточных колебаний температуры, см	40	20	30
Глубина промерзания в 2012 г., см	59	44	44
Переход к температурам ниже 0 °С на глубине 2 см в 2012 г.	10.X	12.X	12.X
Дата начала устойчивого промерзания в 2012 г.			
на глубине 2 см	23.X	5.XI	31.X
на глубине 20 см	23.X	10.XII	27.XI
на глубине 30 см	5.XI	5.I	31.XII
Дата начала оттаивания в 2013 г.			
на глубине 2 см	12.IV	11.IV	18.IV
на глубине 20 см	16.IV	7.V	15.IV
на глубине 30 см	17.IV	10.V	13.IV
Продолжительность существования сезонной мерзлоты, дней			
в слое 2–5 см	171	157	159
на глубине 20 см	175	142	126
на глубине 30 см,	162	125	62
Средняя суточная зимняя температура в слое 0–5 см, °С	-5,5	-1,3	-4,0

Примечание. \* – результаты этого исследования; \*\* – данные опубликованных работ (Дюкарев и др., 2009; Дюкарев, 2012; Дюкарев, Головацкая, 2013; Киселев и др., 2015; Киселев и др., 2017 и Kiselev et al., 2018).

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Температурные режимы почв двух топей и ряма различались и характеризовались индивидуальными особенностями. Вопреки ожиданиям, для почв обеих топяных экосистем получены существенные различия, которые проявлялись по всему профилю.

Наиболее контрастные параметры температурных режимов получены для ряма и осоковой топи. Для пушицевой топи, которая располагалась между рямом и осоковой топью, получены промежуточные значения для таких параметров, как средняя по профилю годовая температура,

температура в течение холодного периода в толще ниже 140 см, максимальная средняя месячная температура ниже 20 см, максимальная суточная температура, степень сдвига тепловой волны во времени с глубиной и время оттаивания весной.

По другим характеристикам температурного режима почвы пушицевая топь была сходна либо с рямом, либо с осоковой топью. Например, для пушицевой топи и рьяма получена одна и та же годовая амплитуда на глубине 20 см, сходные максимальные средние месячные значения в поверхностном слое, степень нагреваемости в весенний период. В обеих топях прослеживался одинаковый ход температуры по почвенному профилю в течение тёплого периода и запаздывание волны холода.

В отличие от двух других экосистем, для почвы пушицевой топи были характерны наименьшие отрицательные температуры в течение холодного периода, самые небольшие месячные и суточные минимумы в пределах деятельного слоя, самые низкие суточные максимумы в летний период, проникновение мерзлоты в наиболее поздние сроки и на меньшую глубину.

Таким образом, в почве пушицевой топи разница между холодным и тёплым временем года была более сглажена, в то время как почва осоковой топи характеризовалась более изменчивым и тёплым климатом, а почва рьяма – более изменчивым и холодным. Найденная разница в температурных режимах почв связана с микрорельефом, от которого зависит уровень стояния болотных вод и перераспределение снежного покрова. Кочки и более низкое стояние болотных вод в рьяме и осоковой топи по сравнению с пушицевой топью способствовали лучшему прогреванию летом и большему промерзанию зимой.

Температурные режимы рьямов и топей Бакчарского болотного комплекса различались по результатам разных исследований, что обусловлено не только различными годами изучения, но и проведением исследования на разных элементах микрорельефа в сходных болотных экосистемах и, возможно, мезоклиматическими различиями.

#### ФИНАНСОВАЯ ПОДДЕРЖКА

Работа выполнена по государственному заданию ИПА СО РАН при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. *Болота Западной Сибири, их строение и гидрологический режим*. Под ред. К.Е. Иванова, С.М. Новикова. Л.: Гидрометеиздат, 1976. 448 с.
2. Димо В.Н. *Тепловой режим почв СССР*. М.: Колос, 1972. 360 с.
3. Дюкарев Е.А. Амплитуда суточного хода температуры торфяной почвы // *Вестник Томского государственного университета*. 2012. № 365. С. 201–205.
4. Дюкарев Е.А., Головацкая Е.А. Особенности температурного режима торфяной залежи олиготрофного болота в южной тайге Западной Сибири // *География и природные ресурсы*. 2013. № 1. С. 65–71.
5. Дюкарев Е.А., Головацкая Е.А., Дучков А.Д., Казанцев С.А. Экспериментальное исследование температурного режима торфяной залежи Бакчарского болота (Западная Сибирь) // *Геология и геофизика*. 2009. Т. 50, № 6. С. 745–754.
6. Киселев М.В., Воропай Н.Н., Дюкарев Е.А. Температурный режим почв осоково-сфагновой топи верхового болота в южной тайге Западной Сибири // *География и природные ресурсы*. 2017. № 3. С. 110–117.
7. Киселев М.В., Дюкарев Е.А., Воропай Н.Н. Динамика промерзания торфяной почвы в болотных экосистемах // XI Сибирское совещание по климатологическому мониторингу (Томск, 21–23 сентября 2015 г.). Томск: ИМКЭС СО РАН, 2015. С. 32–34.
8. Киселев М.В., Дюкарев Е.А., Воропай Н.Н. Сравнение температурных режимов торфяных почв болотных экосистем в тёплый период // Проблемы изучения и использования торфяных ресурсов Сибири: Материалы III Международной научно-практической конференции (Томск, 27 сентября – 3 октября 2015 г.). Ставрополь: ООО «Альфа Принт», 2015. С. 93–96.
9. *Классификация и диагностика почв России* / Авторы и составители: Л.Л. Шишов, В.Д. Тонконогов, И.И. Лебедева, М.И. Герасимова. Смоленск: Ойкумена, 2004. 342 с.
10. Коронатова Н.Г., Миронычева-Токарева Н.П. Температурный режим торфяных олиготрофных почв лесостепи Западной Сибири (на примере Николаевского рьяма) // *Вестник Томского государственного университета. Биология*. 2019. № 45. С. 190–209. doi: 10.17223/19988591/45/10
11. Коронатова Н.Г., Миронычева-Токарева Н.П., Соломин Я.Р. Температурный режим торфяной залежи бугров и топей плоскобугристых болотных комплексов Западной Сибири // *Криосфера Земли*. 2018. Т. XXII. № 6. С. 16–25. doi:10.21782/KZ1560-7496-2018-6(16-25)

12. Кураков С.А., Крутиков В.А., Ушаков В.Г. Автономный измеритель профиля температуры АИПТ // *Приборы и техника эксперимента*. 2008. № 5. С. 166–167.
13. Методы климатологической обработки метеорологических наблюдений / Под общ. ред. О.А. Дроздова. Л.: Гидрометеиздат, 1957. 492 с.
14. Расписание погоды: банк гидрометеорологических данных. URL: <http://rp5.ru> (дата обращения: 16.11.2017)
15. Романова Е.А. *Растительность болот*. // Растительный покров Западно-Сибирской равнины. Новосибирск: Наука, 1985. С. 138–161.
16. Трофимова И.Е., Балыбина А.С. Районирование Западно-Сибирской равнины по термическому режиму почв // *География и природные ресурсы*. 2015. №3. С.27–38.
17. IUSS Working Group, 2014. WRB, World Reference Base for Soil Resources 2014, update 2015. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. Rome: FAO, 2015.203 p.
18. Kiselev M.V., Dyukarev E.A., Voropay N.N. Features of seasonal temperature variations in peat soils of oligotrophic bogs in south taiga of Western Siberia // *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*. 2018. Vol. 138. 012006. doi: [10.1088/1755-1315/138/1/012006](https://doi.org/10.1088/1755-1315/138/1/012006)

Поступила в редакцию 27.09.2019

Принята 11.11.2019

Опубликована 19.11.2019

#### Сведения об авторах:

**Коронатова Наталья Геннадьевна** – кандидат биологических наук, старший научный сотрудник лаборатории биогеоценологии, ФГБУН Институт почвоведения и агрохимии Сибирского отделения РАН (Новосибирск, Россия); [koronatova@issa-siberia.ru](mailto:koronatova@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/)

## TEMPERATURE REGIME OF FIBRIST HISTOSOLS OF THE BAKCHAR MIRE (WEST SIBERIA)

© 2019 N.G. Koronatova 

*Address: Institute of Soil Science and Agrochemistry, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia. E-mail: [koronatova@issa-siberia.ru](mailto:koronatova@issa-siberia.ru)*

**The aim of the study.** Observations of the thermal regime of peat soils were carried out in three ecosystems of the Bakchar mire (56°50'N, 82°50'E): in an more drained raised bog with pine-shrub-sphagnum community (ryam) and two waterlogged ecosystems: sedge-sphagnum poor fen (sedge mire) and shrub-cotton grass-sphagnum marginal part of the poor fen adjacent to the ryam (cotton grass mire).

**Methodology.** Thermal regime of fibrist histosols was studied using temperature loggers, i.e autonomous soil temperature meters AIPT (IMCES SB RAS, Tomsk). Loggers were installed into unflooded hummocks of 30–40 cm height in the ryam and sedge mire, and in the flooded leveled hollow of the cotton grass mire on June 26, 2012. The temperature was recorded until September 18, 2013, and in the cotton grass mire it was recorded until May 21, 2013, when the equipment failed due to high water table. The recording of temperature was carried out at depths of 2, 5, 10, 15, 20, 30, 40, 60, 80, 120, 160, 240 cm once per hour. To assess the weather conditions during the study period, we used data on air temperature, precipitation and snow depth of the Bakchar weather station (<http://rp5.ru>).

**Main results.** The average annual temperature in the peat soil of the ryam decreased from 3.9°C in the surface layer to 2.7°C at a depth of 160 cm and increased to 3.0°C at a depth of 240 cm; in the sedge mire it increased from 3.4°C in the surface layer to 6.7°C at a depth of 160 cm and decreased to 6.2°C at a depth of 240 cm. In the cotton grass mire, average temperature slightly increased from the surface to the deepest layers at 0.15°C, averaging 4.7°C. The annual temperature amplitude at the depth of 20 cm was slightly higher than 15°C in the ryam and the cotton grass mire, which indicated soil climatic conditions as mild, and 21.6°C in the sedge mire, which complied with the temperate continental soil climate. The average temperature during the warm period (June–September) in the sedge mire was 1.5–3.1°C warmer than in the cotton grass mire. In the ryam the average temperature of the warm period in the upper 2–5 cm was the same as in the sedge mire, but sharply decreased with depth, unlike both poor fens. During the cold period (October–March), average temperature increased with depth

from  $-1 \dots -4$  °C to  $3 \dots 6$  °C, and the average value became positive at a depth of 25–30 cm in the sedge mire and the ryam, and at a depth of 13 cm in the cotton grass mire, which reflects the different water table depth at different elements of the microrelief. The delay of the heat wave was most pronounced in the ryam: at a depth of 240 cm the maximum average monthly temperatures was in November, in the poor fens it was in September–October. The minimum monthly temperatures were recorded in December 2012 in all ecosystems, whereas negative temperatures reached to a depth of 30 cm in the ryam, to a depth of 15 cm into the sedge mire, and to a depth of 5 cm into the cotton grass mire in accordance with the water table depth. Daily summer temperature fluctuations reached to the depth of 20 cm in the cotton grass mire, 30 cm in the ryam and 40 cm in the sedge mire. The highest temperature values were observed on July 20, 2012: at a depth of 2 cm it was 34.5 °C in the ryam, 30.0 °C in the sedge mire and 26.8 °C in the cotton grass mire, which reflects an increase in water table from the ryam to the cotton grass mire. According to the Bakchar weather station, on that date the maximum air temperature reached 35.0 °C. Minimum daily temperatures were recorded in November in all ecosystems at a depth of 2 cm:  $-18.0$  °C in the sedge mire on November 26,  $-4.9$  °C in the cotton grass mire on November 8, and  $-10.0$  °C in the ryam on November 9. The difference between ecosystems is associated with the retention of snow by trees and shrubs, its demolition into hollows of the cotton grass mire and blowing off from hummocks in the sedge mire. As snow cover increased during the winter, daily temperatures increased to the daily average values of  $-5.3$ ,  $-2.3$ , and  $-1.4$  °C in the sedge mire, the ryam, and the cotton grass mire, respectively. The sum of the positive average daily temperatures for the hydrological year 2012/13 was higher in the sedge mire (2156 °C and 2280 °C at a depth of 2 and 20 cm) compared with the ryam (1906 and 1474 °C at a depth of 2 and 20 cm). The sum of negative temperatures at a depth of 2 and 20 cm was  $-485$  and  $-188$  °C in the ryam,  $-872$  and  $-378$  °C in the sedge mire,  $-225$  and  $-67$  °C in the cotton grass mire. The ratio of the positive temperature sums at the depth of 20 cm to the positive air temperature sums, characterizing the degree of soil heatability, amounted to 0.62 for the ryam and 0.96 for the sedge mire. Temperature gradients reached to the deepest layers of the soil profile in both poor fens, being  $0$  °C·cm $^{-1}$  below 60 cm in the ryam. Gradients were minimal in the ryam. Seasonal frost reached to the depth of 59 cm in the sedge mire, 44 cm in the cotton grass mire and 53 cm in the ryam, and the duration of stable soil frost in the surface layer was 171, 157 and 181 days, respectively. Thus in the peat soil of the cotton grass mire the difference between cold and warm seasons is less pronounced, while the sedge mire soil is characterized by the more contrasting and warmer climate, and the ryam soil is more contrasting and cold. The revealed difference in the soil thermal regimes is associated with the microrelief, which determined the water table depth and redistribution of snow cover. Hummocks and lower standing water table in the ryam and the sedge mires as compared with the cotton grass mire contributed to better warming in the summer and greater freezing in the winter.

**Conclusion.** The thermal regimes of ryams and poor fens of the Bakcharsky mire differ due to different elements of the microrelief and, possibly, mesoclimatic differences.

**Key words:** Bakchar Mire; thermal regime; Fibrist Histosol; southern taiga of Western Siberia

**How to cite:** Koronatova N.G. Temperature regime of Fibrist Histosols of the Bakchar Mire (West Siberia) // *The Journal of Soils and Environment*. 2019. 2(3). e79. doi: [10.31251/pos.v2i3.79](https://doi.org/10.31251/pos.v2i3.79) (in Russian with English abstract).

#### REFERENCES

1. *Mires of Western Siberia, their structure and hydrological regime*. Eds. K.E. Ivanov, S.M. Novikov. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1976, 448 p. (in Russian)
2. Dimo V.N. *Thermal regime of soils of the USSR*. Moscow, Kolos Publ., 1972, 360 p. (in Russian)
3. Dyukarev E.A. The amplitude of daily temperature variation of peat soil, *Tomsk State University Journal*, 2012, No 365, p. 201–205. (in Russian)
4. Dyukarev E.A., Golovatskaya E.A. Features of the temperature regime of a bog peat deposit in the southern taiga of Western Siberia, *Geography and Natural Resources*, 2013, No 1, p. 65–71. (in Russian)
5. Dyukarev E.A., Golovatskaya E.A., Duchkov A.D., Kazantsev S.A. Temperature monitoring in Bakcharsky bog (Western Siberia), *Russian Geology and Geophysics*, 2009, No 50(6), p. 579–586. (in Russian)
6. Kiselyov M.V., Voropay N.N., Dyukarev E.A. Temperature regime of the soil in the sedge-Sphagnum mire of the raised bog in the southern taiga of Western Siberia, *Geography and Natural Resources*, 2017, No 3, p. 110–117. doi: [10.21782/GIPR0206-1619-2017-3\(110-117\)](https://doi.org/10.21782/GIPR0206-1619-2017-3(110-117)) (in Russian)
7. Kiselyov M.V., Dyukarev E.A., Voropay N.N. *The dynamics of peat soil freezing in mire ecosystems*. In book: XI Siberian meeting on climate and environmental monitoring (Tomsk, 21–23 September 2015). Tomsk, IMCES SB RAS, 2015, p. 32–34. (in Russian)
8. Kiselyov M.V., Dyukarev E.A., Voropay N.N. *Comparison of temperature regimes of peat soils of mire ecosystems in the warm period*. In book: Problems of study and use of peat resources of Siberia: Proceedings of the III International Scientific and Practical Conference (Tomsk, 27 September – 3 October 2015). Stavropol, Alfa Print Ltd, 2015, p. 93–96. (in Russian)
9. *Soil classification and diagnostic of Russia* / Authors and compilers: L.L. Shishov, V.D. Tonkonogov, I.I. Lebedeva, M.I. Gerasimov. Smolensk: Oykumena Publ., 2004. 342 p. (in Russian)

10. Koronatova N.G., Mironycheva-Tokareva N.P. Temperature regime of peat deposit of ombrotrophic bogs in the forest-steppe zone of Western Siberia (on the example of the Nikolayevsky ryam), *Tomsk State University Journal. Biology*, 2019, No 45, p. 190–209. doi: [10.17223/19988591/45/10](https://doi.org/10.17223/19988591/45/10). (in Russian)
11. Koronatova N.G., Mironycheva-Tokareva N.P., Solomin Ya.R. Temperature regimes of peat deposit of palsas and hollows in flat palsa complexes of Western Siberia, *Earth's Cryosphere*, 2018, Vol. 22, No 6, p. 16–25. doi: [10.21782/KZ1560-7496-2018-6\(16-25\)](https://doi.org/10.21782/KZ1560-7496-2018-6(16-25)). (in Russian)
12. Kurakov S.A., Krutikov V.A., Ushakov V.G. Autonomous temperature profile meter ATPM, *Instruments and Experimental Techniques*, 2008, No 5, p. 166–167. (in Russian)
13. *Methods of climatological processing of meteorological observations*. Eds. Drozdov O.A., Leningrad, Gidrometeoizdat, 1957, 492 p. (in Russian)
14. Weather schedule: hydrometeorological data bank. [Electronic resource]. Available at: <http://rp5.ru> (accessed 16.11.2017).
15. Romanova E.A. *Mire vegetation*. In book: *Vegetation of the West Siberian Plain*. Novosibirsk, Nauka, 1985, p. 138–161. (in Russian)
16. Trofimova I.E., Balybina A.S. Regionalization of the West Siberian Plain from thermal regime of soils, *Geography and Natural Resources*, 2015, No 3, p. 27–38. (in Russian)
17. *IUSS Working Group, 2014*. WRB, World Reference Base for Soil Resources 2014, update 2015. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. Rome: FAO, 2015. 203 p.
18. Kiselev M.V., Dyukarev E.A., Voropay N.N. Features of seasonal temperature variations in peat soils of oligotrophic bogs in south taiga of Western Siberia, *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*, 2018, vol. 138, 012006. doi: [10.1088/1755-1315/138/1/012006](https://doi.org/10.1088/1755-1315/138/1/012006)

*Received 27 September 2019*

*Accepted 11 November 2019*

*Published 19 November 2019*

**About the author:**

**Koronatova Natalia G.** – PhD in Biology, Senior Researcher of Laboratory of Biogeocenology, Institute of Soil Science and Agrochemistry of Siberian Branch of RAS, (Novosibirsk, Russia); [koronatova@issa-siberia.ru](mailto:koronatova@issa-siberia.ru)

*The author read and approved the final manuscript*



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

**РАЗНООБРАЗИЕ БАКТЕРИАЛЬНОГО АНСАМБЛЯ В ЭМБРИОЗЕМЕ  
САМОЗАРАСТАЮЩЕГО ЗОЛОТВАЛА**© 2019 Н.Б. Наумова <sup>1</sup>, И.П. Беланов <sup>1</sup>, Т.Ю. Аликина <sup>2</sup>

Адрес: <sup>1</sup>ФГБУН Институт почвоведения и агрохимии СО РАН,  
проспект академика Лаврентьева, 8/2, г. Новосибирск, 630090, Россия.  
E-mail: [naumova@issa-siberia.ru](mailto:naumova@issa-siberia.ru), [belanov@issa-siberia.ru](mailto:belanov@issa-siberia.ru)

<sup>2</sup>ФГБУН Институт химической и фундаментальной медицины СО РАН,  
проспект академика Лаврентьева, 8/2, г. Новосибирск, 630090, Россия. E-mail: [alikina@niboch.nsc.ru](mailto:alikina@niboch.nsc.ru)

**Цель исследования:** Целью исследования была оценка структуры и состава бактериальных ансамблей по разнообразию последовательностей генов 16S рРНК в молодой почве, формирующейся при самозарастании золоотвала.

**Место и время проведения.** В качестве объекта исследования был выбран эмбриозем самозарастающего в течение девяти лет золоотвала ТЭЦ-5 г.Новосибирска (54°59' с.ш., 83°03' в.д.), а в качестве фоновой почвы – серая почва под ненарушенным березовым лесом недалеко от золоотвала (55°00' с.ш., 83°04' в.д.); образцы почв отобраны из слоя 0-5 см в конце июля 2017 г. в трех индивидуальных повторностях.

**Методология.** Экстрагированную из почв тотальную ДНК использовали в качестве матрицы для амплификации варибельного района V3-V4 генов 16S рРНК, и полученные ампликоны секвенировали на платформе Illumina MiSeq. Статистическую обработку данных проводили методами описательной статистики и анализа главных компонент.

**Основные результаты.** Всего в изученных образцах почвы было выявлено 4887 различных ОТЕ, относящихся к 306 родам, 212 семействам, 123 порядкам, 84 классам и 32 типам бактерий. На уровне типа основные доминанты бактериальных ансамблей эмбриозема и серой почвы были одинаковы (*Proteobacteria*, *Acidobacteria* и *Actinobacteria*), и по общему очертанию относительного обилия типов изученные бактериальные ансамбли были довольно схожи, что в целом свидетельствует о направленности почвообразования к серой почве. Большое обилие представителей типа *Chloroflexi* (среди которых есть аэробные и анаэробные термофилы, аноксигенные фототрофы и организмы, использующие органические галиды в качестве субстратов для анаэробного дыхания) в молодом эмбриоземе самозарастающего золоотвала согласуется с неблагоприятными условиями (резкие колебания температуры, высокая влажность, pH, содержание металлов) в этом педогенном субстрате на ранней стадии формирования почвы. Относительное обилие представителей порядков *Rhizobiales*, *Actinomycetales* и неклассифицированных представителей *Acidobacteria\_Gr6* и *Acidobacteria\_Gr3* было в 1,5-2,4 раза больше в контрольной почве, при этом доминируя и в эмбриоземе. Индексы  $\alpha$ -биоразнообразия, характеризующие видовое богатство в каждой экосистеме (Као-1, Маргаллефа, Фишера, число ОТЕ) были выше в серой почве, а выравненность и равномерность распределения последовательностей по различным ОТЕ, наоборот, были выше в эмбриоземе. Индекс Шеннона был одинаково высок (6,3) в обеих почвах.

**Заключение.** За девять лет самозарастания золоотвала в формирующемся эмбриоземе развился богатый видами выровненный по структуре бактериальный ансамбль, который уже на этом раннем этапе педогенеза на уровне типа был близок к таковому в серой почве под ненарушенным лесом, расположенном по соседству с золоотвалом. В бактериальном ансамбле молодого эмбриозема доминирует специфичный комплекс бактерий (*Chloroflexi*, *Xanthomonadales*, *Geobacter*, *Aciditerrimonas*, *Iamiaceae* и др.), осуществляющих выветривание педогенного субстрата. Присутствие нитрификаторов (*Nitrospira*), денитрификаторов (*Reynanella*) на фоне доминирования азотфиксаторов (*Bradyrhizobium*, *Rhizobiales*) свидетельствует о становлении всего комплекса процессов трансформации азота уже на ранних стадиях почвообразования в ходе спонтанного самозарастания золоотвала. Доминирование в формирующемся эмбриоземе бактерий, информация о последовательностях генов 16S рРНК которых отсутствует в соответствующих базах данных, подчеркивает необходимость более детального исследования почвенных микробных ансамблей, развивающихся на отвалах, в связи с большой площадью территорий, занятых такого рода техногенными объектами.

**Ключевые слова:** эмбриозем; серая почва; золоотвал; отходы ТЭЦ; бактериальный ансамбль; гены 16S рРНК; Illumina MiSeq; березовый лес; Западная Сибирь

**Цитирование:** Наумова Н.Б., Беланов И.П., Аликина Т.Ю. Таксономическое разнообразие бактериального ансамбля в эмбриоземе самозарастающего золоотвала // Почвы и окружающая среда. 2019. Том 2. № 3. е84. doi: 10.31251/pos.v2i3.84

## ВВЕДЕНИЕ

Ежегодно российская энергетика наряду с электроэнергией и теплом производит около 25 млн тонн золошлаковых отходов (Энергетика..., 2019), основная масса которых годами хранится в золоотвалах. В настоящее время накопленный объем отходов теплоэнергетики в России достигает порядка 1,5 млрд тонн, а площадь золоотвалов превышает 20 тыс. гектаров (Шилов, Шилова, 2017). В Новосибирской области ежегодно от сжигания угля образуется около 800 тыс. тонн золошлаковых отходов, отвалы с которыми занимают более 1000 га (Калачев, 2007).

По окончании эксплуатации золоотвалы требуют проведения работ по консервации, но в перспективе необходимо восстанавливать экосистемные функции и сервисы, в частности, почвенно-экологические функции поверхностного слоя отработанных золоотвалов как основного интерфейса взаимодействия всех компонентов экосистемы. Несмотря на довольно длительную историю изучения таких территорий, нельзя не согласиться с выводом о том, что многие физические, химические и биологические аспекты особенностей формирования и развития эмбриоземов на золоотвалах изучены недостаточно (Haynes, 2009).

Одним из наиболее экономически и технически эффективных способов консервации является стимулирование процессов самозарастания постиндустриальных ландшафтов. Почвенные микроорганизмы на начальных стадиях самовосстановления экосистем играют исключительно важную роль не только как агенты выветривания зольного субстрата и разложения органического вещества, но являются основной частью органического вещества, с которой собственно и запускается весь комплекс процессов его трансформации и гумификации в минеральном субстрате золоотвала. Однако почвосубстраты техногенных экосистем в плане инвентаризации биоразнообразия микробных сообществ современными метагеномными методами практически не изучены.

Целью исследования была оценка структуры и состава бактериальных ансамблей по разнообразию последовательностей генов 16S рРНК в молодой почве, формирующейся при самозарастании золоотвала.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

**Объекты исследования.** В качестве объекта исследования для оценки регенерационных экосистем постиндустриальных ландшафтов был выбран один из золоотвалов ТЭЦ 5 г.Новосибирска (54°59' с.ш., 83°03' в.д.), а в качестве фонового (контрольного) участка, характеризующего данную территорию в природно-экологическом отношении, был выбран лесной биогеоценоз, расположенный недалеко от золоотвала (55°00' с.ш., 83°04' в.д.) в естественном березовом колке. Причиной, обусловившей данный выбор, являлось то, что на прилегающих территориях, ранее вовлеченных в сельскохозяйственный оборот, в настоящее время интенсивно протекает естественный процесс лесовосстановления. Таким образом, можно предположить, что конечной стадией направления регенерации при ряде условий может являться формирование на поверхности золоотвала именно лесных сообществ. Оба объекта расположены в лесостепи. Район их местонахождения теплый, с суммой среднесуточных температур выше 10 °С 1926 °С·день средняя температура июля составляет 25,7°С, и умеренно влажный, с годовым количеством осадков 300–400 мм; безморозный период длится 120–130 дней (Климат..., 2014).

Эксплуатация выбранного для исследования гидроотвала была прекращена в 2008 году, до 2010 года для снижения пыления на его поверхности постоянно поддерживали зеркало воды. Материнская порода представлена зольным материалом, на поверхности которого идет процесс самозарастания. Площадь гидроотвала составляет 20 га. Почвенный покров данного участка представлен эмбриоземом инициальным и эмбриоземом органо-аккумулятивным в соответствии с классификацией Андроханова и др. (2004), или Technosols в соответствии с международной классификацией (IUSS Working Group WRB, 2014). Образцы эмбриозема органо-аккумулятивного, отбирали для данной работы. На поверхности сформировалась открытая растительная группировка – разнотравно-вейниковая с облепихой крушеновидной (*Calamagrostis epigeios* + *Berteroa incana* + *Artemisia vulgaris* – *Hippophaë rhamnoides*) с общим проективным покрытием составляло 3%, при средней высоте травостоя 40 см. Мхи покрывали 80% поверхности участка, в качестве доминантов были отмечены *Leptobryum pyriforme* (Hedw.) Wits., *Bryum sp.*; встречались

также *Funaria hydrometrica* Hedw. и *Bryum argenteum* Hedw., а из древесных видов – подрост облепихи крушеновидной (*Hippophaë rhamnoides* L.) и тополя пирамидального (*Populus italica* Du Roi) (Sheremet et al., 2018).

Почва фонового участка классифицируется как серая (Классификация..., 2004), или как Gley-Luvic Phaeozem (IUSS Working Group WRB, 2015). Основной лесобразующей породой является береза белая (*Betula pendula* Roth.), но изредка попадаются деревья сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.). Под покровом деревьев растет богатое злаково-разнотравное сообщество из 47 видов растений, относящихся к 27 семействам, в основном *Fabaceae*, *Asteraceae*, *Caryophyllaceae*, *Plantaginaceae*, *Polygonaceae*, *Hypericaceae*, *Primulaceae*, *Lamiaceae*, *Euphorbiaceae*, *Rosaceae*, *Lythraceae*, *Apiaceae-Ubelleferae*.

**Отбор почвенных образцов.** Почвенные образцы отбирали из 0-5 см слоя гумусово-аккумулятивного горизонта серой почвы под ненарушенным березовым лесом (контроль) и эмбриозема органо-аккумулятивного (золоотвал после 9 лет самозарастания) в конце июля 2017 г. в трех индивидуальных повторностях и сразу же доставляли в лабораторию. Почву просеивали через сито с диаметром ячеек 2 мм и до проведения физико-химических анализов хранили в холодильнике при +4 °С. Аликвоты почвы для экстракции ДНК хранили при -20 °С.

**Химические анализы.** Содержание  $C_{\text{орг}}$  определяли путем бихроматного окисления аликвоты почвенного образца. Определение содержания органического азота в почве проводили по Кьельдалю; содержание подвижных форм питательных элементов ( $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{P}_2\text{O}_5$ ), водорастворимого углерода ( $C_{\text{вод}}$ ) и pH ( $\text{H}_2\text{O}$ ) измеряли стандартными методами (Soil Sampling..., 2008). Все анализы выполняли в трехкратной повторности. Базальное дыхание почвы ( $\text{CO}_2$ ) определяли путем измерения выделения  $\text{CO}_2$  почвой после стабилизации и без каких-либо добавок (Pell et al., 2006). Все значения рассчитаны на абсолютно-сухую почву и представлены в табл. 1.

Таблица 1

Некоторые физико-химические свойства серой почвы и эмбриозема самозарастающего золоотвала

Свойство	Серая почва		Эмбриозем		p*
Удельная масса, г·см <sup>-3</sup> почвы	0,42	± 0,02	1,31	± 0,06	0,00
pH	6,5	± 0,04	8,5	± 0,09	0,00
$C_{\text{вод}}^{**}$ , мкг·кг <sup>-1</sup> почвы	56	± 13	22	± 1	0,00
$C_{\text{орг}}$ , %	7,51	± 0,05	1,61	± 0,09	0,00
$N_{\text{орг}}$ , %	0,43	± 0,01	0,04	± 0,00	0,00
$C_{\text{орг}}/N_{\text{орг}}$	20,3	± 0,3	65	± 1,4	0,00
$\text{NO}_3^-$ , мг N·кг <sup>-1</sup> почвы	2,9	± 0,1	1,9	± 0,1	0,00
$\text{NH}_4^+$ , мг N·кг <sup>-1</sup> почвы	1,7	± 0,6	1,9	± 0,1	0,20
Подвижный $\text{P}_2\text{O}_5$ , мг·кг <sup>-1</sup> почвы	1,2	± 0,0	6,1	± 0,1	0,00
$P_{\text{общ}}$ , мг·кг <sup>-1</sup> почвы	84,9	± 0,6	47	± 2,7	0,00
$\text{CO}_2$ , мкл·ч <sup>-1</sup> ·г <sup>-1</sup> почвы	11,2	± 0,9	0,5	± 0,1	0,00

\* Вероятность отсутствия различий (t-критерий Стьюдента)

\*\* Обозначения:  $C_{\text{вод}}$  – водорастворимый органический C,  $C_{\text{орг}}$  – почвенный органический C,  $N_{\text{орг}}$  – почвенный органический N

**Экстракция ДНК из почвы.** ДНК экстрагировали из почвы с помощью набора DNeasy PowerSoil Kit (Qiagen, Германия) в соответствии с инструкцией производителя. Для лучшего механического разрушения образца использовали TissueLyser II (Qiagen, Германия) в течение 45 с

при 5000 об/мин. Дополнительной очистки извлеченной ДНК не требовалось; качество ее выделения оценивали с помощью электрофореза в 1%-ном агарозном геле и тестовой ПЦР.

**Амплификация и секвенирование генов 16S рРНК.** Экстрагированную из почв метагеномную ДНК использовали в качестве матрицы для амплификации переменного района (V3-V4) генов 16S рРНК с помощью праймеров 343F (5'-CTCCTACGGRRSGCAGCAG-3') и 806R (5'-GGACTACNVTGGGTWTCTAAT-3') в сочетании с адаптерными последовательностями Illumina, а также баркодами на праймерах. Полимеразную цепную реакцию проводили в трех повторностях в объеме 50 мкл (Kirillova et al., 2016). Библиотеки секвенировали с помощью 600-cycle PE kit на секвенаторе MiSeq (Illumina, США) в ЦКП «Геномика» (ИХБФМ СО РАН, г.Новосибирск).

**Биоинформатический анализ.** Полученные парные последовательности анализировали с помощью UPARSE скриптов (Edgar, 2013), используя Usearch v.10.0.240 (Edgar, 2010). Биоинформатическая обработка включала перекрытие парных ридов, фильтрацию по качеству и длине, учет одинаковых последовательностей, отбрасывание синглетонов, удаление химер и объединение в операционные таксономические единицы (ОТЕ, в метагеномных исследованиях применяется в качестве синонима понятию вида). Последнее проводили на основе 97%-ного порога сходства ОТЕ с помощью алгоритма кластеризации UNOISE (Edgar, 2016a). Таксономическую принадлежность последовательностей ОТЕ определяли с помощью SINTAX (Edgar, 2016b) по базе рибосомальных последовательностей RDP.

Таксономическую структуру совокупности полученных таким образом последовательностей бактериального ансамбля оценивали по отношению числа последовательностей каждого таксона к общему числу последовательностей, выраженному в процентах, т.е. по относительному обилию таксона. Доминантными считали таксоны с относительным обилием  $\geq 1\%$ ; умеренными и крупными доминантами считали таксоны с относительным обилием от 1 до 5% и свыше 5%, соответственно. Термин «ансамбль» (английский эквивалент *assemblage*), в соответствии с предложением Фота и др. (Fauth et al., 1996), использован как обозначающий филогенетически родственные группы в пределах сообщества, т.е. совокупности разных видов, встречающихся в одном месте в одно время.

**Статистическую обработку** данных проводили методами описательной статистики, корреляционного анализа и анализа главных компонент с помощью пакета Statistica v.13.3. Индексы биоразнообразия рассчитывали с помощью статистического пакета PAST 3.19 (Hammer et al., 2001).

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

**Видовое богатство бактериальных ансамблей.** Всего в данном исследовании было выявлено 4887 различных ОТЕ (Табл.2), из которых подавляющее большинство принадлежало 26 типам *Bacteria*, а 35 ОТЕ принадлежали представителям 6 типов *Archaea*.

Представители типа *Proteobacteria* доминировали по видовому богатству (1421 ОТЕ), составляя 29% от числа выявленных ОТЕ. У приблизительно такой же части всех ОТЕ, а именно 1171 ОТЕ, т.е. 24%, типовую принадлежность установить не удалось. К типу *Acidobacteria* было отнесено 425 ОТЕ, а к типу *Actinobacteria* – 443 ОТЕ, что в обоих случаях составляет 9% от общего богатства ОТЕ в нашем исследовании.

**Таблица 2**

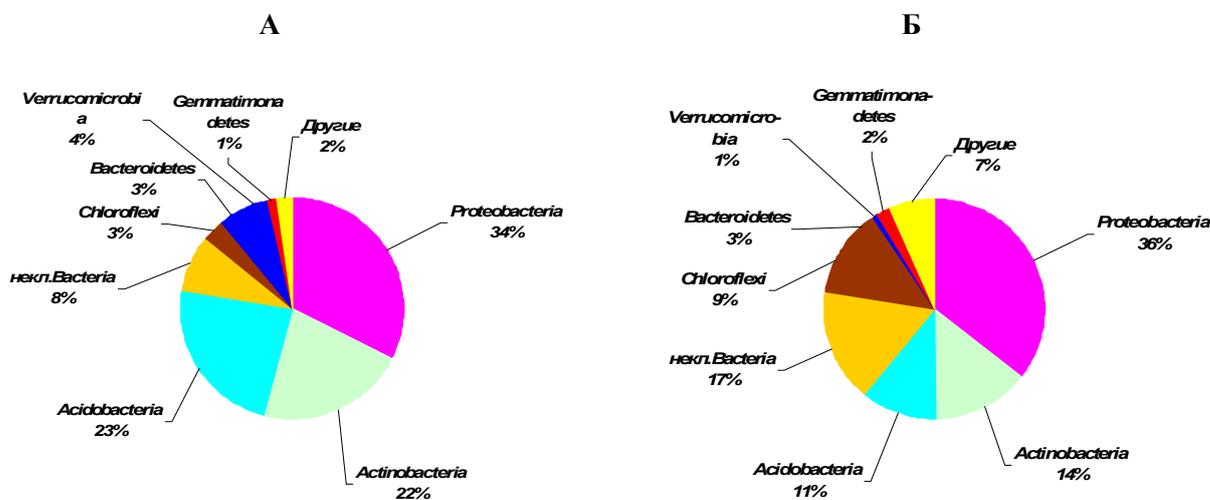
Таксономический состав бактериальных ОТЕ в образцах контрольной серой почвы и самозрастающего золоотвала

Таксон	Все ОТЕ	Доминантные ОТЕ
Надцарство	2	1
Тип	32	7
Класс	84	13
Порядок	123	9
Семейство	212	19
Род	306	20
ОТЕ	4887	33

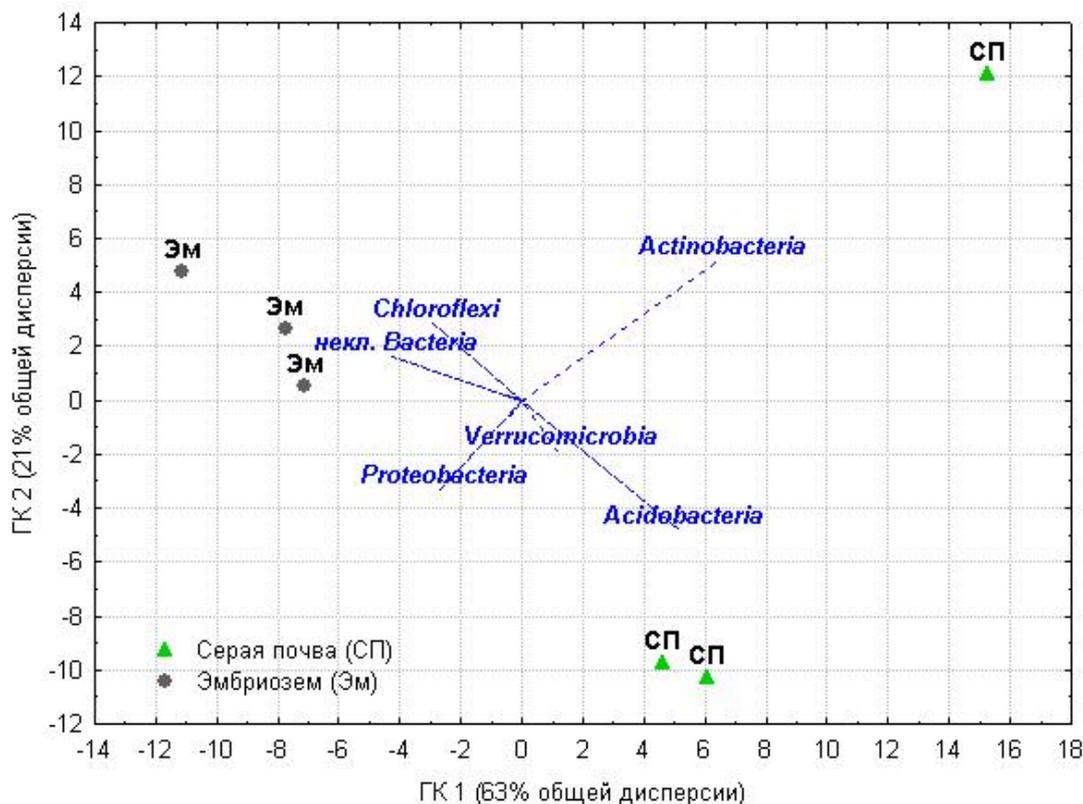
**Относительное обилие таксонов в бактериальных ансамблях.** Так же, как и по богатству ОТЕ, по относительному обилию последовательностей фрагментов генов 16S рРНК в почвах обеих экосистем доминировали представители *Proteobacteria*, составляя более трети всего ансамбля последовательностей (рис.1). По многим таксонам была выявлена статистически значимая разница между изученными экосистемами (табл.3–5). Относительное обилие представителей порядков *Rhizobiales*, *Actinomycetales* и неклассифицированных представителей *Acidobacteria\_Gp6* и *Acidobacteria\_Gp3* было в 1,5–2,4 раза больше в контрольной почве; при этом и на золоотвале они были основными доминирующими порядками (табл. 5).

Так же, как и по числу ОТЕ, по относительному обилию большая доля бактериальных последовательностей (рис.1), особенно в эмбриоземе, не была идентифицирована даже до типового уровня.

Анализ структуры взаимоотношений почвенных образцов и относительного обилия типов бактерий в них (рис.2) методом главных компонент выявил разделение изученных экосистем по главной компоненте 1 (отвечающей за более двух третей общей дисперсии): положение образцов серой почвы определяло относительное обилие *Acidobacteria* и *Actinobacteria*, а образцов эмбриозема – *Chloroflexi* и неклассифицированные *Bacteria*. Главная компонента 2, отвечающая за пятую часть общей дисперсии, выявила разброс между индивидуальными повторностями в пределах обеих групп, особенно выраженный в ненарушенной почве и связанный с обильностью *Actinobacteria*. Корреляционный анализ показал, что относительное обилие *Acidobacteria* статистически значимо связано с содержанием  $N_{\text{орг}}$  в почве, выделением  $CO_2$  (для обоих показателей  $R_{\text{спирмена}}=0,83$ ,  $P \leq 0,05$ ) и отношением C/N ( $R_{\text{спирмена}}=-0,83$ ,  $P \leq 0,05$ ), а относительное обилие *Chloroflexi* имеет противоположный этому корреляционный профиль. Среди умеренных доминантов *Gemmatimonadetes* имели положительную корреляцию с плотностью почвы ( $R_{\text{спирмена}}=0,94$ ,  $P \leq 0,05$ ), а обилие *Verrucomicrobia* статистически значимо не связано с почвенными свойствами, хотя и вносит вклад в дифференциацию образцов по обоим главным компонентам.



**Рисунок 1.** Таксономическая структура бактериальных ансамблей в образцах серой почвы под березовым лесом и эмбриозема самозарастающего золоотвала (оцененная по вкладу тип-специфичных последовательностей генов 16S рРНК в общее число последовательностей): А – лес, Б – золоотвал. Обозначения: *некл.Bacteria* - последовательности, относящиеся к царству *Bacteria*, но не идентифицированные даже до уровня типа. Числа представляют среднее значением ( $n=3$ ).



**Рисунок 2.** Анализ методом главных компонент относительного обилия тип-специфических последовательностей в бактериальных ансамблях образцов серой почвы под березовым лесом и эмбриозема самозарастающего золоотвала. Обозначения: *некл. Bacteria* – последовательности, относящиеся к *Bacteria*, но не идентифицированные ниже уровня типа.

**Таблица 3**

Относительное обилие тип-специфических последовательностей фрагментов генов 16S рРНК в серой почве под березовым лесом (контроль) и эмбриоземе самозарастающего золоотвала ТЭЦ (среднее  $\pm$  стандартное отклонение)

Тип	Контроль	Золоотвал	p*
<i>Proteobacteria</i>	32,6 $\pm$ 6,3	35,6 $\pm$ 3,0	0,50
<i>Actinobacteria</i>	21,6 $\pm$ 11,4	14,1 $\pm$ 1,6	0,32
<i>Bacteroidetes</i>	3,3 $\pm$ 1,2	3,5 $\pm$ 0,7	0,85
<b><i>Acidobacteria</i>**</b>	<b>23,2<math>\pm</math> 4,4</b>	<b>11,2<math>\pm</math> 0,6</b>	<b>0,01</b>
<i>Verrucomicrobia</i>	4,0 $\pm$ 2,4	0,9 $\pm$ 0,2	0,09
<i>Candidatus WPS-1</i>	<b>0,3<math>\pm</math> 0,0</b>	<b>0,2<math>\pm</math> 0,1</b>	<b>0,05</b>
<b><i>некл. Bacteria</i></b>	<b>8,4<math>\pm</math> 0,1</b>	<b>16,6<math>\pm</math> 1,1</b>	<b>0,00</b>
<i>Chloroflexi</i>	3,4 $\pm$ 2,3	9,5 $\pm$ 4,1	0,09
<i>Gemmatimonadetes</i>	1,3 $\pm$ 0,3	2,1 $\pm$ 0,4	0,04
<i>Candidatus Saccharibacteria</i>	0,6 $\pm$ 0,1	1,5 $\pm$ 0,1	0,01
<i>Nitrospirae</i>	0,2 $\pm$ 0,1	1,1 $\pm$ 0,1	0,00
<i>Firmicutes</i>	0,2 $\pm$ 0,1	0,6 $\pm$ 0,1	0,00
<i>Другие</i>	3,7 $\pm$ 0,8	9,0 $\pm$ 1,2	0,08
<i>Euryarchaeota</i>	0,00 $\pm$ 0,0	1,5 $\pm$ 0,1	0,00

\* Вероятность отсутствия различий (t-критерий Стьюдента)

\*\* жирным шрифтом выделены строки, где различия статистически значимы на уровне  $P \leq 0,05$ , а разным фоном выделены строки с отсутствием различий (желтый фон), с более высокими значениями в контрольной почве (зеленый фон) и с более высокими значениями на золоотвале (серый фон).

**Таблица 4.** Относительное обилие класс-специфичных последовательностей фрагментов генов 16S рРНК бактерий в серой почве под березовым лесом (контроль) и эмбриоземе самозарастающего золоотвала ТЭЦ (среднее  $\pm$  стандартное отклонение)

Класс	Контроль	Золоотвал	p*
<i>Actinobacteria</i>	19,8 $\pm$ 10,6	13,9 $\pm$ 1,6	0,39
<i>unc Chloroflexi</i>	1,6 $\pm$ 1,2	3,8 $\pm$ 2,0	0,18
<i>Cytophagia</i>	1,0 $\pm$ 0,3	1,2 $\pm$ 0,3	0,39
<i>Acidobacteria Gp17</i>	0,9 $\pm$ 0,4	1,2 $\pm$ 0,2	0,25
<i>Sphingobacteriia</i>	1,2 $\pm$ 0,6	0,9 $\pm$ 0,3	0,55
<b><i>Alphaproteobacteria</i></b>	<b>18,8<math>\pm</math> 4,0</b>	<b>11,3<math>\pm</math> 0,6</b>	<b>0,03</b>
<b><i>Acidobacteria Gp6</i></b>	<b>13,3<math>\pm</math> 3,7</b>	<b>5,9<math>\pm</math> 0,4</b>	<b>0,03</b>
<b><i>Acidobacteria Gp16</i></b>	<b>2,7<math>\pm</math> 0,6</b>	<b>1,6<math>\pm</math> 0,3</b>	<b>0,05</b>
<i>Spartobacteria</i>	3,4 $\pm$ 2,3	0,1 $\pm$ 0,0	0,06
<b><i>Gemmatimonadetes</i></b>	<b>1,3<math>\pm</math> 0,3</b>	<b>2,1<math>\pm</math> 0,4</b>	<b>0,05</b>
<b><i>Acidobacteria Gp3</i></b>	<b>2,0<math>\pm</math> 0,1</b>	<b>0,9<math>\pm</math> 0,1</b>	<b>0,00</b>
<b><i>Acidobacteria Gp4</i></b>	<b>1,9<math>\pm</math> 0,5</b>	<b>0,9<math>\pm</math> 0,1</b>	<b>0,03</b>
<b>некл. <i>Bacteria</i></b>	<b>8,4<math>\pm</math> 0,1</b>	<b>16,6<math>\pm</math> 1,1</b>	<b>0,00</b>
<b><i>Betaproteobacteria</i></b>	<b>5,3<math>\pm</math> 1,1</b>	<b>10,8<math>\pm</math> 1,9</b>	<b>0,01</b>
<b><i>Deltaproteobacteria</i></b>	<b>5,2<math>\pm</math> 0,3</b>	<b>6,5<math>\pm</math> 0,6</b>	<b>0,02</b>
<b><i>Gammaaproteobacteria</i></b>	<b>3,0<math>\pm</math> 1,0</b>	<b>6,4<math>\pm</math> 0,1</b>	<b>0,00</b>
<b><i>Anaerolineae</i></b>	<b>1,4<math>\pm</math> 1,0</b>	<b>5,2<math>\pm</math> 2,1</b>	<b>0,04</b>
<b>Другие</b>	<b>8,9<math>\pm</math> 0,2</b>	<b>10,2<math>\pm</math> 0,1</b>	<b>0,00</b>

**Таблица 5.** Относительное обилие порядок-специфичных последовательностей фрагментов генов 16S рРНК бактерий в серой почве под березовым лесом (контроль) и эмбриоземе самозарастающего золоотвала ТЭЦ (среднее  $\pm$  стандартное отклонение)

Порядок	Контроль	Золоотвал	p*
<b>некл. <i>Betaproteobacteria</i></b>	<b>3,8<math>\pm</math> 0,8</b>	<b>5,5<math>\pm</math> 1,1</b>	<b>0,09</b>
<b>некл. <i>Actinobacteria</i></b>	<b>4,9<math>\pm</math> 1,9</b>	<b>3,4<math>\pm</math> 0,5</b>	<b>0,28</b>
<b><i>Mycococcales</i></b>	<b>4,1<math>\pm</math> 0,3</b>	<b>3,4<math>\pm</math> 0,5</b>	<b>0,14</b>
<b><i>Rhodospirillales</i></b>	<b>3,6<math>\pm</math> 1,2</b>	<b>2,2<math>\pm</math> 0,2</b>	<b>0,12</b>
<b>некл. <i>Chloroflexi</i></b>	<b>1,6<math>\pm</math> 1,1</b>	<b>3,8<math>\pm</math> 2,0</b>	<b>0,18</b>
<b><i>Cytophagales</i></b>	<b>1,0<math>\pm</math> 0,3</b>	<b>1,2<math>\pm</math> 0,3</b>	<b>0,39</b>
<b>некл. <i>Acidobacteria Gp17</i></b>	<b>0,9<math>\pm</math> 0,4</b>	<b>1,2<math>\pm</math> 0,2</b>	<b>0,25</b>
<b><i>Sphingobacteriales</i></b>	<b>1,2<math>\pm</math> 0,6</b>	<b>0,9<math>\pm</math> 0,3</b>	<b>0,55</b>
<b>некл. <i>Acidobacteria Gp6</i></b>	<b>13,3<math>\pm</math> 3,7</b>	<b>5,9<math>\pm</math> 0,4</b>	<b>0,03</b>
<b><i>Rhizobiales</i></b>	<b>12,6<math>\pm</math> 1,8</b>	<b>5,8<math>\pm</math> 0,3</b>	<b>0,00</b>
<b><i>Actinomycetales</i></b>	<b>10,6<math>\pm</math> 8,2</b>	<b>4,2<math>\pm</math> 0,4</b>	<b>0,25</b>
<b>некл. <i>Acidobacteria Gp16</i></b>	<b>2,6<math>\pm</math> 0,6</b>	<b>1,6<math>\pm</math> 0,3</b>	<b>0,05</b>
<b>некл. <i>Spartobacteria</i></b>	<b>3,4<math>\pm</math> 2,3</b>	<b>0,1<math>\pm</math> 0,0</b>	<b>0,06</b>
<b>некл. <i>Acidobacteria Gp3</i></b>	<b>2,0<math>\pm</math> 0,1</b>	<b>1,3<math>\pm</math> 0,2</b>	<b>0,00</b>
<b>некл. <i>Acidobacteria Gp4</i></b>	<b>1,8<math>\pm</math> 0,5</b>	<b>0,9<math>\pm</math> 0,1</b>	<b>0,03</b>
<b><i>Gaiellales</i></b>	<b>2,1<math>\pm</math> 0,2</b>	<b>0,4<math>\pm</math> 0,2</b>	<b>0,00</b>
<b>некл. <i>Bacteria</i></b>	<b>8,4<math>\pm</math> 0,1</b>	<b>16,6<math>\pm</math> 1,1</b>	<b>0,00</b>
<b><i>Acidimicrobiales</i></b>	<b>3,6<math>\pm</math> 1,3</b>	<b>5,9<math>\pm</math> 0,7</b>	<b>0,06</b>
<b><i>Anaerolineales</i></b>	<b>1,4<math>\pm</math> 1,0</b>	<b>5,2<math>\pm</math> 2,1</b>	<b>0,04</b>
<b><i>Burkholderiales</i></b>	<b>1,4<math>\pm</math> 0,4</b>	<b>4,3<math>\pm</math> 0,8</b>	<b>0,01</b>
<b><i>Xanthomonadales</i></b>	<b>1,5<math>\pm</math> 0,4</b>	<b>3,4<math>\pm</math> 0,2</b>	<b>0,00</b>
<b><i>Gemmatimonadales</i></b>	<b>1,3<math>\pm</math> 0,3</b>	<b>2,1<math>\pm</math> 0,4</b>	<b>0,04</b>
<b>некл. <i>Alphaproteobacteria</i></b>	<b>0,9<math>\pm</math> 0,3</b>	<b>2,1<math>\pm</math> 0,2</b>	<b>0,00</b>
<b>некл. <i>Gammaaproteobacteria</i></b>	<b>1,2<math>\pm</math> 0,7</b>	<b>1,5<math>\pm</math> 0,3</b>	<b>0,06</b>
<b><i>Desulfuromonadales</i></b>	<b>0,1<math>\pm</math> 0,1</b>	<b>2,6<math>\pm</math> 1,9</b>	<b>0,02</b>
<b>некл. <i>Candidatus Saccharibacteria</i></b>	<b>0,6<math>\pm</math> 0,1</b>	<b>1,3<math>\pm</math> 0,6</b>	<b>0,01</b>
<b>Другие</b>	<b>11,2<math>\pm</math> 3,0</b>	<b>13,2<math>\pm</math> 2,5</b>	<b>0,04</b>

\* Вероятность отсутствия различий (t-критерий Стьюдента)

\*\* жирным шрифтом выделены строки, где различия статистически значимы на уровне  $P \leq 0,05$ , а разным фоном выделены строки с отсутствием различий (желтый фон), с более высокими значениями в контрольной почве (зеленый фон) и с более высокими значениями на золоотвале (серый фон)

Таблица 6

Относительное обилие доминантных ОТЕ-специфичных последовательностей фрагментов генов 16S рРНК бактерий серой почве под березовым лесом (контроль) и эмбриоземе самозарастающего золоотвала ТЭЦ (среднее  $\pm$  стандартное отклонение)

№	OTUs	Контроль	Золоотвал	p*
9	<i>Mycobacterium sp.</i>	2,5 $\pm$ 1,9	0,1 $\pm$ 0,0	0,10
54	некл. <i>Chloroflexi</i>	0,4 $\pm$ 0,6	0,7 $\pm$ 0,6	0,52
3	<b><i>Bradyrhizobium sp.</i>**</b>	<b>6,4<math>\pm</math> 1,1</b>	<b>0,2<math>\pm</math> 0,1</b>	<b>0,00</b>
16	некл. <i>Acidobacteria Gp16</i>	1,2 $\pm$ 0,3	0,0 $\pm$ 0,0	0,01
20	некл. <i>Rhizobiales</i>	2,3 $\pm$ 0,3	0,3 $\pm$ 0,1	0,00
22	<i>Spartobacteria gis</i> ***	1,6 $\pm$ 1,0	0,0 $\pm$ 0,0	0,05
24	<i>Plumatobacter sp.</i>	0,7 $\pm$ 0,2	0,3 $\pm$ 0,1	0,04
33	<i>Reyranella sp.</i>	0,8 $\pm$ 0,3	0,3 $\pm$ 0,0	0,03
51	некл. <i>Acidobacteria Gp6</i>	0,8 $\pm$ 0,2	0,4 $\pm$ 0,1	0,03
63	некл. <i>Acidobacteria Gp6</i>	1,0 $\pm$ 0,3	0,0 $\pm$ 0,0	0,01
71	некл. <i>Acidobacteria Gp6</i>	0,9 $\pm$ 0,3	0,0 $\pm$ 0,0	0,01
121	некл. <i>Acidobacteria Gp6</i>	1,3 $\pm$ 0,5	0,0 $\pm$ 0,0	0,01
27	некл. <i>Anaerolineaceae</i>	0,1 $\pm$ 0,1	2,4 $\pm$ 1,6	0,07
28	некл. <i>Chloroflexi</i>	0,1 $\pm$ 0,1	2,5 $\pm$ 1,3	0,03
30	некл. <i>Xanthomonadales</i>	0,2 $\pm$ 0,1	1,3 $\pm$ 0,2	0,00
31	<i>Geobacter sp.</i>	0,0 $\pm$ 0,0	1,0 $\pm$ 0,6	0,05
34	некл. <i>Actinobacteria</i>	0,0 $\pm$ 0,0	1,1 $\pm$ 0,1	0,00
36	некл. <i>Acidobacteria Gp6</i>	0,0 $\pm$ 0,0	1,4 $\pm$ 0,1	0,00
42	некл. <i>Actinobacteria</i>	0,0 $\pm$ 0,0	0,7 $\pm$ 0,2	0,02
45	<i>Nitrospira sp.</i>	0,0 $\pm$ 0,0	0,9 $\pm$ 0,1	0,00
46	некл. <i>Acidobacteria Gp6</i>	0,3 $\pm$ 0,0	1,0 $\pm$ 0,1	0,00
56	<i>Aciditerrimonas sp.</i>	0,0 $\pm$ 0,0	1,1 $\pm$ 0,2	0,00
61	некл. <i>Lamiaceae</i>	0,4 $\pm$ 0,2	1,0 $\pm$ 0,2	0,04
119	некл. <i>Bacteria</i>	0,0 $\pm$ 0,0	0,7 $\pm$ 0,3	0,02
134	<i>Rhodoferax sp.</i>	0,0 $\pm$ 0,0	1,0 $\pm$ 0,5	0,03
428	некл. <i>Acidobacteria Gp16</i>	0,2 $\pm$ 0,1	1,1 $\pm$ 0,2	0,01
	Другие	77,8 $\pm$ 0,7	81,5 $\pm$ 1,8	0,03

\* Вероятность отсутствия различий (t-критерий Стьюдента).

\*\* жирным шрифтом выделены строки, где различия статистически значимы на уровне  $P \leq 0,05$ , а разным фоном выделены строки с отсутствием различий (желтый фон), с более высокими значениями в контрольной почве (зеленый фон) и с более высокими значениями на золоотвале (серый фон).

\*\*\* *gis-genus incertae sedis*, т.е. род неопределенного положения в классификации.

### Индексы $\alpha$ -биоразнообразия ансамблей последовательностей генов 16S рРНК

Индексы  $\alpha$ -биоразнообразия, характеризующие видовое богатство в каждой экосистеме (Као-1, число ОТЕ, Маргалефа, Фишера) были выше в контрольной почве (табл.7). Также выше были и индексы, отражающие большее доминирование (доминирование, индекс Бергера-Паркера). Индексы выравненности и равномерности распределения последовательностей по различным ОТЕ, наоборот, были выше на золоотвале, что, как правило, интерпретируют как большее биоразнообразие. Примечательно, что индекс Шеннона, который чаще всего применяют для оценки  $\alpha$ -биоразнообразия, будучи очень высоким в почве обеих экосистем, достоверно не различался, так же как и индексы Симпсона, Бриллюэна и Менхиника. Таким образом, видовое (т.е. ОТЕ) богатство в почве золоотвала было на треть ниже по сравнению с таковым в контрольной почве, однако в пределах этого меньшего числа видов структура сообщества была более разнообразна.

Таблица 7

Индексы  $\alpha$ -биоразнообразия (среднее  $\pm$  стандартное отклонение) бактериальных ансамблей в гумусово-аккумулятивном горизонте лесной почвы под березовым лесом (контроль) и верхнем слое почвосубстрата самозарастающего золоотвала ТЭЦ (среднее  $\pm$  стандартное отклонение)

Индекс	Контроль	Золоотвал	p*
Симпсона	0,993 $\pm$ 0,000	0,995 $\pm$ 0,001	0,07
Шеннона	6,3 $\pm$ 0,1	6,3 $\pm$ 0,1	0,64
Бриллуэна	6,2 $\pm$ 0,0	6,2 $\pm$ 0,1	0,88
Менхиника	9,8 $\pm$ 1,9	10,0 $\pm$ 0,4	0,84
<b>Число ОТЕ</b>	<b>2910<math>\pm</math> 278</b>	<b>2166<math>\pm</math> 69</b>	<b>0,01</b>
Доминирование	0,007 $\pm$ 0,000	0,005 $\pm$ 0,001	0,07
<b>Маргалефа</b>	<b>254<math>\pm</math> 12</b>	<b>201<math>\pm</math> 5</b>	<b>0,00</b>
<b>Фишера</b>	<b>576<math>\pm</math> 13</b>	<b>470<math>\pm</math> 12</b>	<b>0,00</b>
<b>Бергера-Паркера</b>	<b>0,052<math>\pm</math> 0,006</b>	<b>0,026<math>\pm</math> 0,013</b>	<b>0,04</b>
<b>Као-1</b>	<b>3356<math>\pm</math> 144</b>	<b>2391<math>\pm</math> 57</b>	<b>0,00</b>
<b>Выравненность</b>	<b>0,18<math>\pm</math> 0,03</b>	<b>0,25<math>\pm</math> 0,01</b>	<b>0,02</b>
<b>Равномерность</b>	<b>0,79<math>\pm</math> 0,02</b>	<b>0,82<math>\pm</math> 0,01</b>	<b>0,03</b>

\* Вероятность отсутствия различий (t-критерий Стьюдента).

\*\* Жирным шрифтом выделены строки, где различия статистически значимы на уровне  $P \leq 0,05$ , а разным фоном выделены строки с отсутствием различий (желтый фон), с более высокими значениями в контрольной почве (зеленый фон) и с более высокими значениями на золоотвале (серый фон)

#### ОБСУЖДЕНИЕ

Изучению развития экосистем отработанных золоотвалов посвящено много работ (Haunes, 2009), однако исследований, выполненных с помощью метагеномных методов, до сих пор очень мало. В большинстве работ разнообразие почвенных микроорганизмов, чаще всего бактерий, оценено с помощью методов культивирования на твердых питательных средах (см., например, Pen-Muratov et al., 2014); хотя давно понятно, что эти методы неадекватны целям оценки состава и структуры сообществ микроорганизмов (McCaig et al., 1999).

За девять лет самозаращения золоотвала в формирующемся эмбриоземе развился богатый видами выровненный по структуре бактериальный ансамбль, который на этом раннем этапе педогенеза на уровне типа был уже близок к таковому в серой почве под ненарушенным лесом, расположенном по соседству с золоотвалом. На уровне типа основные доминанты бактериальных ансамблей эмбриозема и серой почвы были одинаковы (*Proteobacteria*, *Acidobacteria* и *Actinobacteria*), и по общему очертанию относительного обилия типов изученные бактериальные ансамбли были довольно схожи, что в целом свидетельствует о возможности направленности почвообразования к серой почве. Основное отличие касалось *Acidobacteria* – главного доминанта почв разнообразных лесных экосистем мира наряду с *Proteobacteria*. Представители последнего доминировали в изученных почвах как по видовому разнообразию, так и по относительному обилию, которое было одинаково в обеих почвах, что в общем согласуется с результатами других исследований (Chen et al., 2017б). В этой же работе выявлено более низкое биоразнообразие бактериального ансамбля зарастающего золоотвала, при этом величины индекса  $\alpha$ -биоразнообразия Шеннона как в контроле, так и на золоотвале были в 2,5–3,0 раза ниже рассчитанных для наших объектов (6,2–6,3). Примечательно, что в нашей работе выравненность и равномерность бактериального ансамбля эмбриозема были больше, чем в серой почве, что может свидетельствовать о том, что большее число организмов опробует разнообразие микрообитаний на начальных стадиях педогенеза.

Тем не менее, на более низких таксономических уровнях бактериальный ансамбль эмбриозема существенно отличался от такового в ненарушенной серой почве. Значительно большее относительное обилие в эмбриоземе представителей типа *Chloroflexi* согласуется с имеющимися сведениями об их физиологии и биохимии, т.е. что среди них есть аэробные и анаэробные термофилы, аноксигенные фототрофы и организмы, использующие органогаалиты в качестве субстратов для анаэробного дыхания (Krzmarzick et al., 2012), а также о том, что обилие представителей типа *Chloroflexi* увеличивается при орошении сточными водами (Chen et al., 2017а). Таким образом, значительно повышенное присутствие представителей типа *Chloroflexi* в молодом эмбриоземе самозарастающего в течение девяти лет зольного гидроотвала вполне логично с точки зрения экологических условий формирования отвала (искусственный водоем) и

его последующего самозаращения (открытая поверхность с резкими колебаниями температуры). Повышенное обилие одного вида, представляющего семейство *Anaerolineaceae* (тип *Chloroflexi*), в эмбриоземе обусловлено, скорее всего, щелочным pH (Guo et al., 2019).

Среди бактерий, относящихся к порядку *Xanthomonadales* (класс *Gammaproteobacteria*), наряду с патогенами растений и человека, есть много свободноживущих непатогенных видов, способных активно разлагать целлюлозу и выживать в таких неблагоприятных местообитаниях, как загрязненные почвы и горячие источники (Eichorst, Kuske, 2012; Castro-Silva et al., 2013; Bayer-Santos et al., 2019), и поэтому их присутствие среди доминантов эмбриозема также выглядит вполне обоснованным экофизиологически.

Род *Geobacter* объединяет очень интересные бактерии с уникальной физиологией (Lovley et al., 2011; Lovley, Walker, 2019), способные, в частности, восстанавливать нерастворимые оксиды Fe (III) и Mn (IV), т.е. осуществлять процессы огромного биогеохимического значения, и присутствие *Geobacter sp.* среди доминантов в эмбриоземе, развивающемся на зольном субстрате в качестве педогенной матрицы, говорит само за себя. Восстанавливать Fe (III), а также детоксицировать и/или использовать в качестве углеродных субстратов органические соединения антропогенного происхождения (например, при неполном сжигании углей и/или загрязнении речной воды, используемой для гидротранспортировки), могут и бактерии рода *Rhodoferax* (Kasanke et al., 2019), одна ОТЕ которого была выявлена среди доминантов бактериального ансамбля эмбриозема в нашем исследовании. Что касается *Aciditerrimonas* (тип *Actinobacteria*), то представители этого рода тоже способны восстанавливать Fe (III) в анаэробных условиях (Itoh et al., 2011). Большое обилие одной относящейся к семейству *Iamiaceae* ОТЕ (тип *Actinobacteria*) в эмбриоземе согласуется со способностью этих бактерий жить в условиях повышенного содержания металлов, активно участвуя в становлении и поддержании процессов трансформации абиотической и биотической составляющих педогенного субстрата. Таким образом, на ранних стадиях преобразования зольного субстрата в бактериальном ансамбле молодого эмбриозема доминирует специфичный комплекс бактерий, осуществляющих выветривание материнской породы.

Несмотря на то, что четыре ОТЕ, отнесенные к классу *Acidobacteria Gp6*, были более обильны в ненарушенной почве, две других ОТЕ того же класса были более обильны в эмбриоземе. В целом это свидетельствует о разнообразии экологических ниш бактерий этого класса и о важности их роли в почвах наземных экосистем в целом и в ходе педогенеза в техногенных экосистемах в частности.

Доминирование представителей порядка *Rhizobiales*, очень существенное в изученной нами серой почве и в целом типичное для почв лесных экосистем (Naumova et al., 2015; Наумова и др., 2018; VanInsberghe et al., 2015; Dukunde et al., 2019), было выявлено и в эмбриоземе, хотя и значительно менее выраженное. Это свидетельствует об исключительной важности процесса фиксации атмосферного азота для становления цикла азота и формирования биогеоценоза на золоотвале.

Самым крупным доминантом в серой ненарушенной почве была одна ОТЕ, представляющая род *Bradyrhizobium*. Ранее установлено, что несимбиотические, т.е. свободно живущие представители этого рода доминируют в лесных почвах (VanInsberghe et al., 2015). Следовательно, выделение этой бактерии в культуре и изучение ее физиолого-биохимических особенностей очень целесообразно для разработки препарата этой бактерии для внесения в отработанные золоотвальные субстраты и ускорения восстановления экосистемных функций и сервисов при рекультивационных технологиях.

Присутствие среди доминантов эмбриозема одного из видов *Nitrospira* – широко распространенных в различных экосистемах бактерий (Daims et al., 2016) – говорит о формировании связи между восстановленными и окисленными формами минерального азота (Palomo et al., 2019). Одна ОТЕ рода *Reyranella*, представители которого являются денитрификаторами и обнаружены в лесных почвах (Kim et al., 2013), была выявлена и в эмбриоземе. Все это вместе с доминированием порядка *Rhizobiales* свидетельствует о становлении всего комплекса процессов трансформации азота уже на ранних стадиях педогенеза на самозарастающем золоотвале.

Следует заметить, что повышенное обилие *Nitrospira*, *Geobacter*, *Actinobacteria* и *Acidobacteria* в эмбриоземе может указывать на наличие тяжелых металлов, в частности, меди (Nunes et al., 2016) в их окружении.

Представители *Spartobacteria* были среди основных доминантов с большим обилием в серой почве. Эти бактерии являются важными компонентами бактериальных ансамблей различных почв

(Bergmann et al., 2011), осуществляющими разложение растительного материала (Ranjan et al., 2015). Информации о физиологии и биохимии *Spartobacteria* до сих пор немного; было выдвинуто предположение об их меньшем метаболическом разнообразии и большей специализации (низкомолекулярные) в плане субстратов углерода и энергии для обеспечения доминирования в почве (Brewer et al., 2017). Таким образом, значительно меньшая представленность этого класса в эмбриоземе самовосстанавливающейся экосистемы золоотвала вероятнее всего связана с недостаточным поступлением нужного растительного материала и/или продуктов его гидролиза. Род *Ilumatobacter*, также более обильный в фоновой почве, плохо переносит присутствие металлов в среде обитания (Berg et al., 2019). Род *Reyranella*, среди которых есть денитрификаторы, встречается в лесных почвах (Kim et al., 2013), и один его вид является умеренным доминантом и в изученной нами серой почве; выявление его и на золоотвале свидетельствует о наличии агентов процесса денитрификации в этой экосистеме, подтверждая, как отмечено выше, становление всего комплекса процессов трансформации азота.

Отметим, что потенциальное видовое богатство (т.е. Као-1) составило в ненарушенной серой почве 3356 ОТЕ и в эмбриоземе 2391 ОТЕ при экстракции тотальной ДНК из 0,1 г сырой почвы. При этом индекс биоразнообразия Шеннона был довольно высок и одинаков в почве обеих экосистем, что свидетельствует о быстром формировании разнообразного состава бактериальной составляющей педогенных и экосистемных процессов.

Наличие 8–10% последовательностей фрагментов генов 16S рРНК, неидентифицированных даже до таксономического уровня типа, является обычным для большинства верхних горизонтов/слоев почв, что связано как с принципиальной невозможностью охватить все разнообразие прокариот на планете, так и с методическими аспектами анализа, техническими аспектами пополнения баз данных и т.п. Однако 17% неидентифицированных последовательностей эмбриозема представляют довольно значительную величину, которая объясняется, по-видимому, меньшей изученностью такого рода почвосубстратов и, как следствие, отсутствием информации о генах 16S рРНК в базах данных, в данном случае RDP.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Доминирование в формирующемся эмбриоземе бактерий, информация о последовательностях генов 16S рРНК которых отсутствует в соответствующих базах данных, подчеркивает необходимость более детального исследования почвенных микробных ансамблей, развивающихся в ходе педогенеза при самозаращении или рекультивации отвалов в связи с увеличением площадей, занятых такого рода техногенными объектами. Выявление доминирования азотфиксаторов как в ненарушенной лесной почве, так и в формирующемся эмбриоземе обуславливает необходимость детального изучения ансамблей симбиотических и несимбиотических азотфиксаторов и возможности их использования для ускорения рекультивации и фиторемедиации с целью восстановления экосистемных сервисов. Особого внимания в этой связи заслуживают бактерии, осуществляющие выветривание техногенных субстратов в ходе педогенеза.

#### ФИНАСОВАЯ ПОДДЕРЖКА

Работа по отбору и химическому анализу почвенных образцов, а также написанию статьи выполнена при поддержке государственного задания ИПА СО РАН в рамках программы с № госрегистрации АААА-А17-117030110078-1. Работа по секвенированию ДНК и биоинформатическому анализу выполнена при финансовой поддержке РФФИ и Правительства Новосибирской области в рамках Проекта №18-44-540002

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Андроханов В.А., Куляпина Е.Д., Курачев В.М. *Почвы техногенных ландшафтов: генезис и эволюция*. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2004. 205 с.
2. Калачёв А. И. *Комплексная система утилизации ЗШМ* // Консорциум Феникс, июнь 2017. С. 32.
3. *Классификация и диагностика почв России* / Составители: Шишов Л.Л., Тонконогов В.Д., Лебедева И.И., Герасимова М.И. Смоленск: Ойкумена, 2004. 342 с.
4. *Климат Новосибирска и его изменения* / Лучицкая И.О., Белая Н.И., Арбузов С.А. Федеральная служба по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды, Сибирский региональный научно-исследовательский гидрометеорологический институт. Новосибирск: Издательство СО РАН, 2014. 224 с.

5. Наумова Н. Б., Аликина Т. Ю., Кузнецова Г. В. Биоразнообразие бактериальных ансамблей в бурозёме элювирированном под сосной корейской // *Почвы и окружающая среда*. 2018. Т.1. №3. С.151–169. doi:10.31251/pos.v1i3.31
6. Шилов С.О., Шилова Е.А. Выбор возможного варианта расширения золотвала на основании сметного расчета // *Синергия наук*. 2017. № 12. С. 821–827. URL: <http://synergy-journal.ru/archive/article0609>
7. Энергетика и промышленность России. 2019. №5. (361) март 2019 года URL: <https://www.eprussia.ru/epr/361/1492205.htm>
8. Bayer-Santos E., Ceseti L.de M., Farah C.S., Alvarez-Martinez C.E. Distribution, Function and Regulation of Type 6 Secretion Systems of *Xanthomonadales* // *Frontiers in Microbiology*. 2019. doi:10.3389/fmicb.2019.01635
9. Berg J., Brandt K.K., Al-Soud W.A., Holm P.E., Hansen L.H., Sørensen S.J., Nybroe O. Selection for Cu-tolerant bacterial communities with altered composition, but unaltered richness, via long-term Cu exposure // *Applied and Environmental Microbiology*. 2012. V.78(20). P. 7438–7446. doi:10.1128/AEM.01071-12
10. Bergmann G. T., Bates S.T., Eilers K.G., Lauber C.L., Caporaso J.G., Walters W.A., Knight R., Fierer N. The under-recognized dominance of *Verrucomicrobia* in soil bacterial communities // *Soil Biology and Biochemistry*. 2011. V.43. Is.7. P. 1450–1455. doi: 10.1016/j.soilbio.2011.03.012
11. Brewer T., Handley K., Carini P. et al. Genome reduction in an abundant and ubiquitous soil bacterium ‘Candidatus *Udaeobacter copiosus*’ // *Nature Microbiology*. 2017. V.2. art. 16198 doi:10.1038/nmicrobiol.2016.198
12. Castro-Silva C., Ruíz-Valdiviezo, V. M., Valenzuela-Encinas C. et al. The bacterial community structure in an alkaline saline soil spiked with anthracene // *Electronic Journal of Biotechnology*. 2013. V.16. No.5. doi: 10.2225/vol16-issue5-fulltext-14
13. Chen L, Feng Q, Li C. et al. Impacts of aquaculture wastewater irrigation on soil microbial functional diversity and community structure in arid regions // *Sci Rep*. 2017a. V.7. №1. Art.11193. doi: 10.1038/s41598-017-11678-z
14. Chen X.W., Wong J.T., Leung A.O., Ng C.W., Wong M.H. Comparison of plant and bacterial communities between a subtropical landfill topsoil 15years after restoration and a natural area // *Waste Management*. 2017b. V.63, №49-57. doi: 10.1016/j.wasman.2016.08.015
15. Daims H., Lückner S., Wagner M. A New Perspective on Microbes Formerly Known as Nitrite-Oxidizing Bacteria // *Trends in Microbiology*. V.24. Is.9. P.699-712. doi: 10.1016/j.tim.2016.05.004
16. Dukunde A., Schneider D., Schmidt M. et al. Tree Species Shape Soil Bacterial Community Structure and Function in Temperate Deciduous Forests // *Frontiers in microbiology*. 2019. V.10. Art. 1519. doi:10.3389/fmicb.2019.01519
17. Edgar R.C. Search and clustering orders of magnitude faster than BLAST // *Bioinformatics*. 2010.V.26. Iss.19. P. 2460–2461. doi: 10.1093/bioinformatics/btq461
18. Edgar R.C. UPARSE: highly accurate OTU sequences from microbial amplicon reads // *Nature Methods*. 2013. V.10. P. 996–998. doi: 10.1038/nmeth.2604
19. Edgar R.C. UNOISE2: Improved error-correction for Illumina 16S and ITS amplicon reads // *bioRxiv*. 2016a. doi: 10.1101/081257
20. Edgar R. C. SINTAX, a Simple Non-Bayesian Taxonomy Classifier for 16S and ITS Sequences // *bioRxiv*. 2016b. doi: 10.1101/074161
21. Eichorst S.A., Kuske C.R. Identification of Cellulose-Responsive Bacterial and Fungal Communities in Geographically and Edaphically Different Soils by Using Stable Isotope Probing // *Applied and Environmental Microbiology*. 2012. V.78. №7. P. 2316–2327. doi: 10.1128/AEM.07313-11
22. Fauth E., Bernardo J., Camara M., Resetarits Jr. W.J., Van Buskirk J., McCollum S.A. Simplifying the Jargon of Community Ecology: A Conceptual Approach // *The American Naturalist*. 1996. V.147. P.282-286.
23. Guo A., Ding L., Tang Z., Zhao Z., Duan G. Microbial response to CaCO<sub>3</sub> application in an acid soil in southern China // *Journal of Environmental Science (China)*. 2019. V.79. P.321–329. doi: 10.1016/j.jes.2018.12.007
24. Hammer O., Harper D.A.T., Ryan P.D. PAST: Paleontological Statistics Software Package for Education and Data Analysis // *Palaeontologia Electronica*. 2001. V.4. Iss.1. P.9.
25. Haynes R.J. Reclamation and revegetation of fly ash disposal sites - Challenges and research needs // *J Environ Manage*. 2009. V.90. №1. P. 43-53. doi: 10.1016/j.jenvman.2008.07.003
26. Itoh T., Yamanoi K., Kudo T., Ohkuma M., Takashina T. *Aciditerrimonas ferrireducens* gen. nov., sp. nov., an iron-reducing thermoacidophilic actinobacterium isolated from a solfataric field // *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology*. 2011. V.61(Pt 6). P.1281–1285. doi:10.1099/ijs.0.023044-0
27. IUSS Working Group, 2014. WRB, World Reference Base for Soil Resources 2015. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. FAO, Rome. 203 p.
28. Kasanke C.P., Collins R.E., Leigh M.B. Identification and Characterization of a Dominant Sulfolane-Degrading *Rhodoferrax* sp. via Stable Isotope Probing Combined with Metagenomics // *Scientific Reports*. 2019. V.9. 3121 doi:10.1038/s41598-019-40000-2
29. Kim S.J., Ahn J.H., Lee T.H., Weon H.Y., Hong S.B., Seok S.J., Whang K.S., Kwon S.W. *Reyranella soli* sp. nov., isolated from forest soil, and emended description of the genus *Reyranella* Pagnier et al. 2011 // *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology*. 2013. V.63(Pt 9). P.3164-3167. doi: 10.1099/ijs.0.045922-0
30. Kirillova I.V., Argant J., Lapteva E.G., Korona O.M., J. van der Plicht., Zinoviyev E.V., Kotov A.A., Chernova O.F., Fadeeva E.O., Baturina O.A., Kabilov M.R., Shidlovskiy F.K., Zanina O.G. The diet and environment of

- mammoths in North-East Russia reconstructed from the contents of their feces // *Quaternary International*. 2016. V. 406. P. 147-161. doi:10.1016/j.quaint.2015.11.002
31. Krzmarzick M.J., Crary B.B., Harding J.J., Oyerinde O.O., Leri A.C., Myneni S.C., Novak P.J. Natural niche for organohalide-respiring *Chloroflexi* // *Applied and Environmental Microbiology*. 2012. V.78. №2. P. 393-401. doi: 10.1128/AEM.06510-11
32. Lovley D.R., Walker D.J. F. Geobacter Protein Nanowires // *Frontiers in Microbiology*. 2019. V.10. P. 2078. doi:10.3389/fmicb.2019.02078
33. Lovley D.R., Ueki T., Zhang T., Malvankar N.S., Shrestha P.M., Flanagan K.A., Akujkar M., Butler J.E., Giloteaux L., Rotaru A.E., Holmes D.E., Franks A.E., Orellana R., Risso C., Nevin K.P.. *Geobacter*: the microbe electric's physiology, ecology, and practical applications // *Advances in Microbial Physiology*. 2011. V.59. P.1-100. doi: 10.1016/B978-0-12-387661-4.00004-5
34. McCaig A.E., Glover L.A., Prosser J.I. Molecular analysis of bacterial community structure and diversity in unimproved and improved upland grassland pastures // *Applied and Environmental Microbiology*. 1999. V. 65. №4. pp. 1721-1730.
35. Naumova N.B., Kuznetsova G.V., Alikina T.Y., Kabilov M.R. Bacterial 16S DNA diversity in the rhizosphere soil of two pine species // *Биомика*. 2015. Т.7. № 2. С.127-136. URL: <http://biomics.ru/year/2015/79-tom-07-2-2015g.html>
36. Nunes I., Jacquioud S., Brejnrod A., Holm P.E., Johansen A., Brandt K.K., Priemé A., Sørensen S.J. Coping with copper: legacy effect of copper on potential activity of soil bacteria following a century of exposure // *FEMS Microbiology Ecology*. 2016. V.92. №11. f1w175. doi:10.1093/femsec/f1w175
37. Palomo A., Dechesne A., Smets B.F. Genomic profiling of *Nitrospira* species reveals ecological success of comammox *Nitrospira* // *bioRxiv*. 2019. 612226. doi: 10.1101/612226
38. Pell M., Stenstrom L., Granhall U. Soil respiration // *Microbiological methods for Assessing Soil Quality*. Wallingford: CABI International, 2005. P.117-126.
39. Pen-Mouratov S., Shukurov N., Yu J., Rakhmonkulova S., Kodirov O., Barness G., Kersten M., Steinberger Y. Successive development of soil ecosystems at abandoned coal-ash landfills // *Ecotoxicology*. 2014. V.23(5). P.880-897. doi: 10.1007/s10646-014-1227-5
40. Ranjan K., Paula F.S., Mueller R.C., Jesus Eda C., Cenciani K., Bohannan B.J., Nüsslein K., Rodrigues J.L. Forest-to-pasture conversion increases the diversity of the phylum *Verrucomicrobia* in Amazon rainforest soils // *Frontiers in Microbiology*. 2015. V.6. Art.779. doi: 10.3389/fmicb.2015.00779
41. Sheremet N., Belanov I., Doronkin V., Lamanova T., Naumova N. Biogeocenosis development during initial revegetation of a coal combustion ash dump // *BIO Web of Conferences* 2018. 11. 00038 Prospects of Development and Challenges of Modern Botany. doi: 10.1051/bioconf/20181100038
42. *Soil Sampling and methods of Analysis*. 2nd edition. Boca Raton: CRC Press; 2008. 1224 p.
43. VanInsberghe D., Maas K. R., Cardenas E., Strachan C. R., Hallam S. J., Mohn W.W. Non-symbiotic *Bradyrhizobium* ecotypes dominate North American forest soils // *The ISME journal*. 2015.V.9. №11. P. 2435-2441. doi:10.1038/ismej.2015.54
44. Yamada T., Sekiguchi Y. Cultivation of Uncultured *Chloroflexi* Subphyla: Significance and Ecophysiology of Formerly Uncultured *Chloroflexi* 'Subphylum I' with Natural and Biotechnological Relevance // *Microbes and environments*. JSME. 2009. V.24. P. 205-216. doi:10.1264/jsme2.ME09151S

Поступила в редакцию 27.11.2019

Принята 19.12.2019

Опубликована 19.12.2019

#### Сведения об авторах:

**Наумова Наталья Борисовна** – кандидат биологических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории агрохимии Института почвоведения и агрохимии СО РАН (Новосибирск, Россия); [naumova@issa-siberia.ru](mailto:naumova@issa-siberia.ru)

**Беланов Иван Петрович** – кандидат биологических наук, старший научный сотрудник лаборатории рекультивации Института почвоведения и агрохимии СО РАН (Новосибирск, Россия); [belanov@issa-siberia.ru](mailto:belanov@issa-siberia.ru)

**Аликина Татьяна Юрьевна** – младший научный сотрудник ЦКП «Геномика» Института химической биологии и фундаментальной медицины СО РАН (Новосибирск, Россия); [alikina@niboch.nsc.ru](mailto:alikina@niboch.nsc.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/)

## TAXONOMIC DIVERSITY OF BACTERIAL ASSEMBLAGE IN TECHNOSOL OF THE REVEGETATING FLY ASH DUMP

© 2019 N.B. Naumova <sup>1</sup>, I.P. Belanov <sup>1</sup>, T.Y. Alikina <sup>2</sup>

<sup>1</sup>Institute of Soil Science and Agrochemistry, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia. E-mail: [naumova@issa-siberia.ru](mailto:naumova@issa-siberia.ru), [belanov@issa-siberia.ru](mailto:belanov@issa-siberia.ru)

<sup>2</sup>Institute of Chemical Biology and Fundamental Medicine, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia. E-mail: [alikina@niboch.nsc.ru](mailto:alikina@niboch.nsc.ru)

**Background.** The aim of the study was to assess the composition and structure of bacterial assemblages by estimating 16S rRNA gene sequences diversity in a young Technosol, developing on a revegetating fly ash dump.

**Location and place of the study.** Two soils were chosen for the study in the environs of the thermoelectric power station No.5 in Novosibirsk region: 1) nine years old Technosol (54°59' NL, 83°03' EL), developing on the spontaneously revegetating fly ash dump, and 2) Phaeozem under undisturbed white birch forest (55°00' NL, 83°04' EL). Soils were sampled from the 0-5 cm layer as three individual replicates each.

**Materials and methods.** The total DNA extracted from soil samples was used as a matrix for PCR amplification using V-3-V4 primers for 16S rRNA genes. The obtained amplicons were sequenced on Illumina MiSeq platform in the Genomics Core Facility of the Institute of Chemical Biology and Fundamental Medicine SB RAS (Novosibirsk, Russia). Descriptive statistics and principal components analysis were used to analyze and present the data.

**Results.** Overall 4887 different operational taxonomic units (OTUs) were found at the 97% similarity level; the OTUs were ascribed to 306 genera, 212 families, 123 orders, 84 classes and 32 phyla of bacteria domain. At the phylum level bacterial assemblages in both soils were dominated by Proteobacteria, Acidobacteria and Actinobacteria, showing rather similar outline of the phyla relative abundance, confirming the direction of pedogenesis towards Phaeozem. Higher abundance of Chloroflexi a physiologically diverse phyla with aerobic and anaerobic thermophiles, anoxygenic phototrophs and anaerobes, able to respire organic halides, in the young Technosol complies with harsh edaphic conditions there. Although the relative abundance of Rhizobiales, Actinomycetales and unclassified Acidobacteria Gp6 and Acidobacteria Gp3 was found to be 1.5–2.4 times higher in the undisturbed Phaeozem, they also were predominating in the Technosol samples. The  $\alpha$ -biodiversity indices, pertaining mostly to species/OTUs richness, i.e. Chao-1, OTUs number, Margalef, Fisher's alpha, were higher in Phaeozem, whereas evenness and equitability were higher in Technosol. Both soils demonstrated similar Shanno indices, which were rather high (6.3).

**Conclusions.** Nine years of spontaneous revegetation on the terminated fly ash dump of the thermoelectric power station resulted in the development of the Technosol, containing quite rich and diverse bacterial assemblage, which was rather close in structure at the phylum taxonomic level to the adjacent undisturbed Phaeozem. Overall the early stages of pedogenesis were dominated by specific bacterial assemblage (Chloroflexi, Xanthomonadales, Geobacter, Aciditerrimonas, Iamiaceae and some others), performing weathering of the pedogenic substrate, i.e. fly ash. The present of nitrifiers (Nitrospira), denitrifiers *денитрификаторов* (Reyranella) together with diazotrophs (Bradyrhizobium, Rhizobiales) dominance evidences the establishment of the entire network of nitrogen transformation process already at the early stages of revegetation of the fly ash dump. Large percentage (17%) of Bacteria, the information about which ribosomal gene sequences is most likely absent in the respective data bases necessitates more detailed research into the soil microbiome on fly ash dumps.

**Key words:** Technosol; Phaeozem; fly ash dump; thermoelectric power station waste; bacterial assemblage; 16S rRNA genes; Illumina MiSeq; birch forest; West Siberia

**How to cite:** Naumova N.B., Belanov I.P., Alikina T.Y. Taxonomic diversity of bacterial assemblage in technosol of the revegetating fly ash dump // The Journal of Soils and Environment. 2019. 2(3). e84. doi: [10.31251/pos.v2i3.84](https://doi.org/10.31251/pos.v2i3.84) (in Russian with an English abstract).

### REFERENCES

1. Androkhonov V.A., Kulyapina E.D., Kurachev V.M. Soil of technogenic landscapes: genesis and evolution. Novosibirsk: Nauka SB RAS Publ., 2004. 205 p. (in Russian)
2. Kalachev A.I. A complex system of fly ash materials utilization, *Consortium Fenix*, June 2017, p.32. (in Russian)

3. *Soil classification and diagnostic of Russia* / Authors and compilers: L.L. Shishov, V.D. Tonkonogov, I.I. Lebedeva, M.I. Gerasimov. Smolensk: Oykumena Publ., 2004. 342 p. (in Russian)
4. *The Climate of Novosibirsk and its changes* / Luchitskaya I.O., Belaya N., Arbuzov S.A. Federal Agency of Hydrometeorology and Environment Monitoring, Siberian Regional Hydrometeorological Research Institute. Novosibirsk: SB RAS Pubs., 2014. 224 p. (in Russian)
5. Naumova N.B., Alikina T.Y., Kuznetsova G.V. Biodiversity of bacterial assemblages in the Haplic Cambisol under Korean pine, *The Journal of Soils and Environment*, 1(3), 151-169. doi:[10.31251/pos.v1i3.31](https://doi.org/10.31251/pos.v1i3.31) (in Russian)
6. Shilov S.O., Shilova E.A. Selecting an option for fly ash dump extension on the basis of estimate calculation, *The Synergy of sciences*, 2017, No. 12, p. 821–827. URL: <http://synergy-journal.ru/archive/article0609> (in Russian)
7. *Energy industry and industry of Russia*. 2019. March. Iss.5 (361). URL: <https://www.eprussia.ru/epr/361/1492205.htm> (in Russian)
8. Bayer-Santos E., Ceseti L.de M., Farah C.S., Alvarez-Martinez C.E. Distribution, Function and Regulation of Type 6 Secretion Systems of *Xanthomonadales*, *Frontiers in Microbiology*, 2019, doi:[10.3389/fmicb.2019.01635](https://doi.org/10.3389/fmicb.2019.01635)
9. Berg J., Brandt K.K., Al-Soud W.A., Holm P.E., Hansen L.H., Sorensen S.J., Nybroe O. Selection for Cu-tolerant bacterial communities with altered composition, but unaltered richness, via long-term Cu exposure, *Applied and Environmental Microbiology*, 2012, V.78(20), p. 7438–7446. doi:[10.1128/AEM.01071-12](https://doi.org/10.1128/AEM.01071-12)
10. Bergmann G. T., Bates S.T., Eilers K.G., Lauber C.L., Caporaso J.G., Walters W.A., Knight R., Fierer N. The under-recognized dominance of *Verrucomicrobia* in soil bacterial communities, *Soil Biology and Biochemistry*, 2011, 43(7), p. 1450–1455. doi: [10.1016/j.soilbio.2011.03.012](https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2011.03.012)
11. Brewer T., Handley K., Carini P. et al. Genome reduction in an abundant and ubiquitous soil bacterium ‘Candidatus *Udaeobacter copiosus*’, *Nature Microbiology*. 2017. V.2. art. 16198. doi:[10.1038/nmicrobiol.2016.198](https://doi.org/10.1038/nmicrobiol.2016.198)
12. Castro-Silva C., Ruíz-Valdiviezo, V. M, Valenzuela-Encinas C. et al. The bacterial community structure in an alkaline saline soil spiked with anthracene, *Electronic Journal of Biotechnology*, 2013, 16(5). doi: [10.2225/vol16-issue5-fulltext-14](https://doi.org/10.2225/vol16-issue5-fulltext-14)
13. Chen L, Feng Q, Li C. et al. Impacts of aquaculture wastewater irrigation on soil microbial functional diversity and community structure in arid regions, *Scientific Reports*, 2017a, V.7(1), Art.11193. doi: [10.1038/s41598-017-11678-z](https://doi.org/10.1038/s41598-017-11678-z)
14. Chen X.W., Wong J.T., Leung A.O. et al. Comparison of plant and bacterial communities between a subtropical landfill topsoil 15years after restoration and a natural area, *Waste Management*, 2017b, 63(49-57). doi: [10.1016/j.wasman.2016.08.015](https://doi.org/10.1016/j.wasman.2016.08.015)
15. Daims H., Lückner S., Wagner M. A New Perspective on Microbes Formerly Known as Nitrite-Oxidizing Bacteria, *Trends in Microbiology*. 2016, V. 24, p. 699–712. doi: [10.1016/j.tim.2016.05.004](https://doi.org/10.1016/j.tim.2016.05.004)
16. Dukunde A., Schneider D., Schmidt M. Et al. Tree Species Shape Soil Bacterial Community Structure and Function in Temperate Deciduous Forests, *Frontiers in microbiology*, 2019, V.10, Art. 1519. doi:[10.3389/fmicb.2019.01519](https://doi.org/10.3389/fmicb.2019.01519)
17. Edgar R.C. Search and clustering orders of magnitude faster than BLAST, *Bioinformatics*, 2010, 26(19), p. 2460–2461. doi: [10.1093/bioinformatics/btq461](https://doi.org/10.1093/bioinformatics/btq461)
18. Edgar R.C. UPARSE: highly accurate OTU sequences from microbial amplicon reads, *Nature Methods*, 2013, V.10, p. 996–998. doi: [10.1038/nmeth.2604](https://doi.org/10.1038/nmeth.2604)
19. Edgar R.C. UNOISE2: Improved error-correction for Illumina 16S and ITS amplicon reads, *bioRxiv*, 2016a. doi:[10.1101/081257](https://doi.org/10.1101/081257)
20. Edgar R. C. SINTAX, a Simple Non-Bayesian Taxonomy Classifier for 16S and ITS Sequences, *bioRxiv*, 2016b. doi:[10.1101/074161](https://doi.org/10.1101/074161)
21. Eichorst S.A., Kuske C.R. Identification of Cellulose-Responsive Bacterial and Fungal Communities in Geographically and Edaphically Different Soils by Using Stable Isotope Probing, *Applied and Environmental Microbiology*, 2012, 78(7), p. 2316–2327. doi: [10.1128/AEM.07313-11](https://doi.org/10.1128/AEM.07313-11)
22. Fauth E., Bernardo J., Camara M. et al. Simplifying the Jargon of Community Ecology: A Conceptual Approach, *The American Naturalist*, 1996, V.147. P.282–286.
23. Guo A., Ding L., Tang Z. et al. Microbial response to CaCO<sub>3</sub> application in an acid soil in southern China, *Journal of Environmental Science (China)*, 2019, V.79, p.321–329. doi: [10.1016/j.jes.2018.12.007](https://doi.org/10.1016/j.jes.2018.12.007)
24. Hammer O., Harper D.A.T., Ryan P.D. PAST: Paleontological Statistics Software Package for Education and Data Analysis, *Palaeontologia Electronica*, 2001, 4(1), p.9.
25. Haynes R.J. Reclamation and revegetation of fly ash disposal sites – Challenges and research needs, *J Environ Manage*, 2009, 90(1), p. 43–53. doi: [10.1016/j.jenvman.2008.07.003](https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2008.07.003)
26. Itoh T., Yamanoi K., Kudo T. et al. *Aciditerrimonas ferrireducens* gen. nov., sp. nov., an iron-reducing thermoacidophilic actinobacterium isolated from a solfataric field, *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology*, 2011, 61(Pt 6), p.1281–1285. doi:[10.1099/ijs.0.023044-0](https://doi.org/10.1099/ijs.0.023044-0)
27. IUSS Working Group, 2014. WRB, World Reference Base for Soil Resources 2015. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. *FAO, Rome.203 p.*
28. Kasanke C.P., Collins R.E., Leigh M.B. Identification and Characterization of a Dominant Sulfolane-Degrading *Rhodoferrax* sp. via Stable Isotope Probing Combined with Metagenomics, *Scientific Reports*, 2019, V.9. 3121. doi:[10.1038/s41598-019-40000-2](https://doi.org/10.1038/s41598-019-40000-2)

29. Kim S.J., Ahn J.H., Lee T.H. et al. *Reyranella soli* sp. nov., isolated from forest soil, and emended description of the genus *Reyranella* Pagnier et al. 2011 // *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology*. 2013. 63(Pt 9). P.3164-3167. doi: [10.1099/ij.s.0.045922-0](https://doi.org/10.1099/ij.s.0.045922-0)
30. Kirillova I.V., Argant J., Lapteva E.G., Korona O.M., J. van der Plicht., Zinovyev E.V., Kotov A.A., Chernova O.F., Fadeeva E.O., Baturina O.A., Kabilov M.R., Shidlovskiy F.K., Zanina O.G. The diet and environment of mammoths in North-East Russia reconstructed from the contents of their feces, *Quaternary International*, 2016, V. 406, p. 147-161. doi:[10.1016/j.quaint.2015.11.002](https://doi.org/10.1016/j.quaint.2015.11.002)
31. Krzmarzick M.J., Crary B.B., Harding J.J., Oyerinde O.O., Leri A.C., Myneni S.C., Novak P.J. Natural niche for organohalide-respiring *Chloroflexi*, *Applied and Environmental Microbiology*, 2012, 78(2), p. 393-401. doi: [10.1128/AEM.06510-11](https://doi.org/10.1128/AEM.06510-11)
32. Lovley D.R., Walker D.J. F. *Geobacter* Protein Nanowires, *Frontiers in Microbiology*, 2019, V.10, p. 2078. doi:[10.3389/fmicb.2019.02078](https://doi.org/10.3389/fmicb.2019.02078)
33. Lovley D.R., Ueki T., Zhang T. et al. *Geobacter*: the microbe electric's physiology, ecology, and practical applications, *Advances in Microbial Physiology*, 2011, V.59, p.1-100. doi: [10.1016/B978-0-12-387661-4.00004-5](https://doi.org/10.1016/B978-0-12-387661-4.00004-5)
34. McCaig A.E., Glover L.A., Prosser J.I. Molecular analysis of bacterial community structure and diversity in unimproved and improved upland grassland pastures, *Applied and Environmental Microbiology*, 1999, 65(4), p. 1721-1730.
35. Naumova N.B., Kuznetsova G.V., Alikina T.Y., Kabilov M.R. Bacterial 16S DNA diversity in the rhizosphere soil of two pine species, *Biomics*. 2015, 7(2), p.127-136. URL: <http://biomics.ru/year/2015/79-tom-07-2-2015g.html>
36. Nunes I., Jacquiod S., Brejnrod A., et al. Coping with copper: legacy effect of copper on potential activity of soil bacteria following a century of exposure, *FEMS Microbiology Ecology*, 2016, 92(11), p.175. doi:[10.1093/femsec/fiw175](https://doi.org/10.1093/femsec/fiw175)
37. Palomo A., Dechesne A., Smets B.F. Genomic profiling of *Nitrospira* species reveals ecological success of comammox *Nitrospira*, *bioRxiv*, 2019, 612226. doi: [10.1101/612226](https://doi.org/10.1101/612226)
38. Pell M., Stenstrom L., Granhall U. Soil respiration, *Microbiological methods for Assessing Soil Quality*. Wallingford: CABI International, 2005, p.117-126.
39. Pen-Mouratov S., Shukurov N., Yu J. Successive development of soil ecosystems at abandoned coal-ash landfills, *Ecotoxicology*, 2014, 23(5). p.880-897. doi: [10.1007/s10646-014-1227-5](https://doi.org/10.1007/s10646-014-1227-5)
40. Ranjan K., Paula F.S., Mueller R.C. Forest-to-pasture conversion increases the diversity of the phylum *Verrucomicrobia* in Amazon rainforest soils, *Frontiers in Microbiology*, 2015, V.6, Art.779. doi: [10.3389/fmicb.2015.00779](https://doi.org/10.3389/fmicb.2015.00779)
41. Sheremet N., Belanov I., Doronkin V., Lamanova T., Naumova N. Biogeocenosis development during initial revegetation of a coal combustion ash dump. In book: *BIO Web of Conferences 2018. 11. 00038 Prospects of Development and Challenges of Modern Botany*. doi: [10.1051/bioconf/20181100038](https://doi.org/10.1051/bioconf/20181100038)
42. *Soil Sampling and methods of Analysis*. 2nd edition. Boca Raton: CRC Press; 2008. 1224 p.
43. VanInsberghe D., Maas K. R., Cardenas E., Strachan C. R., Hallam S. J., Mohn W.W. Non-symbiotic *Bradyrhizobium* ecotypes dominate North American forest soils, *The ISME journal*, 2015, 9(11). p. 2435-2441. doi:[10.1038/ismej.2015.54](https://doi.org/10.1038/ismej.2015.54)
44. Yamada T., Sekiguchi Y. Cultivation of Uncultured *Chloroflexi* Subphyla: Significance and Ecophysiology of Formerly Uncultured *Chloroflexi* 'Subphylum I' with Natural and Biotechnological Relevance, *Microbes and environments*. *JSME*, 2009, V.24, p. 205-216. doi:[10.1264/jsme2.ME09151S](https://doi.org/10.1264/jsme2.ME09151S)

Received 27 November 2019

Accepted 19 December 2019

Published 19 December 2019

**About the authors:**

**Naumova Natalia** – Candidate of Biological Sciences, Leading 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); [naumova@issa-siberia.ru](mailto:naumova@issa-siberia.ru)

**Belanov Ivan** – Candidate of Biological Sciences, Senior Researcher in the Laboratory of Soil Reclamation in the Institute of Soil Science and Agrochemistry of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Novosibirsk, Russia); [belanov@issa-siberia.ru](mailto:belanov@issa-siberia.ru)

**Alikina Tatiana** – Junior Researcher in the “Genomics” Core Facility, Institute of Chemical Biology and Fundamental Medicine, SB RAS, Novosibirsk, Russia; [alikinga@niboch.nsc.ru](mailto:alikinga@niboch.nsc.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/)

**К 90-ЛЕТИЮ ПРОФЕССОРА ВИКТОРА ПЕТРОВИЧА ПАНФИЛОВА**

© 2019 С.Я. Кудряшова, Н.А. Шапорина

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

*Приведены биографические данные и краткий очерк научной деятельности профессора, доктора биологических наук Виктора Петровича Панфилова, организатора и первого заведующего лабораторией физики почв Института почвоведения и агрохимии СО РАН, внесшего значительный вклад в изучение фундаментальных и прикладных почвенно-физических и мелиоративных свойств и режимов почв Сибири.*

**Ключевые слова:** Виктор Петрович Панфилов; агрофизические свойства и режимы почв; мелиорация водно-воздушного и теплового режимов почв Сибири

**Цитирование:** Кудряшова С.Я., Шапорина Н.А. К 90-летию профессора Виктора Петровича Панфилова // Почвы и окружающая среда. 2019. Том 2. №3. е81. doi: 10.31251/pos.v2i1.81



Виктор Петрович родился 15 сентября 1929 года в с. Краснозаводское Боготольского района Красноярского края. В 1952 году успешно окончил биолого-почвенный факультет Томского государственного университета и был направлен в г. Новосибирск, где и состоялась его научная карьера. Началась она с должности старшего лаборанта лаборатории почвоведения отдела почвоведения Биологического института (БИН) Западно-Сибирского филиала АН СССР. В составе почвенного отдела БИН была организована лаборатория физики, мелиорации и эрозии почв; ее руководителем был назначен В.П. Панфилов, в 1960 г. защитивший диссертацию на соискание ученой степени кандидата сельскохозяйственных наук “Водный режим богарных и орошаемых почв Центральной Кулунды”. Целевые исследования почвенного отдела БИНа в 1950-1960 годы были сосредоточены в горных районах юга Сибири, на территории которых маршрутными и стационарными методами был получен большой объем фактического материала, ставший основой для создания первой целостной и глубокой характеристики почвенного покрова Горного Алтая. Наряду с географо-генетическим

направлением почвенных исследований значительные успехи были достигнуты при изучении агрофизических свойств почв, которые имели большое практическое значение для их агромелиоративной оценки и теоретического обоснования комплекса зональных систем земледелия. Для территорий обширного горного обрамления юга Сибири одной из первых была представлена оценка мелиоративных особенностей почв сухостепных котловин, составляющих основной фонд сельскохозяйственных земель Горного Алтая (Панфилов, 1956; 1964а,б).

Как самостоятельное подразделение специализированная лаборатория физики почв была выделена из объединенной лаборатории физики, мелиорации и эрозии почв в 1968 г. при создании Института почвоведения и агрохимии СО АН СССР. Основные направления научных исследований Института были связаны с решением государственных программ по изучению и освоению земельного фонда Сибири. Планы тематических заданий ИПА СО АН СССР по рациональному использованию земельных ресурсов включали широкий спектр задач по вовлечению новых территорий в хозяйственное использование, созданию зональных систем земледелия, разработке и применению агромелиоративных мероприятий, а также вопросы прогнозирования воздействия мелиораций на свойства почв и состояние почвенного покрова. Лаборатория физики почв в числе ведущих подразделений Института внесла существенный вклад в развитие почвенно-мелиоративного направления. В результате исследований были получены

показатели агрофизических свойств почв и параметры их водно-физического и температурного режимов в различных природно-климатических зонах Сибири. Одним из наиболее значимых достижений лаборатории является выполнение программы по изучению физических свойств, водного режима и водного баланса почв Кулундинской степи. Научные результаты стали основой докторской диссертации, которую Виктор Петрович защитил в 1971 году, и фундаментальной монографии “Физические свойства и водный режим почв Кулундинской степи” (1973), в которой освещены материалы исследований физических свойств, водного режима и водного баланса почв Кулунды в связи с проблемами орошения, борьбы с засухой и эрозией. Впервые была представлена подробная характеристика и агромелиоративная оценка водно-физических свойств основных типов каштановых почв, рассмотрены закономерности их изменения в зависимости от гранулометрического состава почвообразующих пород и условий почвообразования, установлены статистические взаимосвязи между значениями содержания гранулометрических фракций, их наименьшей влагоемкостью и максимальной гигроскопичностью; составлены картосхемы гранулометрического состава, наименьшей влагоемкости и максимальных запасов доступной растениям влаги, что позволило оценить возможности накопления влаги и дифференцировать агромелиоративные мероприятия по повышению плодородия почв и рациональному использованию природных ресурсов изученной территории (Панфилов, 1972, 1973, 1974).

Важный период, который способствовал организации лаборатории как научного коллектива, связан с выполнением большого объема работ по разделам Государственной целевой научно-исследовательской программы “Сибирь”, в рамках которой был сформирован один из самых крупных научно-практических проектов “Разработка научных основ рационального использования, охраны и воспроизводства земельных ресурсов Сибири”. В.П. Панфилов являлся координатором почвенно-мелиоративного направления программы “Сибирь” и ответственным исполнителем нескольких тематических заданий Госагропрома СССР и ГКНТ СССР. Под руководством Виктора Петровича для всех почвенно-климатических зон Западной Сибири был выполнен большой объем работ по накоплению, обобщению и систематизации материалов многочисленных экспедиционных, маршрутных и стационарных почвенно-физических исследований с использованием новых полевых и лабораторных методов, точной аппаратуры и измерительной техники. Научным результатом этого периода стал фундаментальный труд “Агрофизическая характеристика почв Западной Сибири” (1976), в котором освещены агрофизические свойства и режимы основных типов почв и показаны их региональные особенности в зависимости от почвенно-климатической зональности; проведена группировка почв и составлены картосхемы, отражающие зональную специфику, количественные и качественные отличия типов почв и их комплексов по обеспечению растений необходимыми условиями роста; дан прогноз возможных отрицательных и положительных изменений почвенно-физических условий при мелиорациях территории, определены пути их оптимизации и направленного регулирования (Агрофизическая..., 1976; Почвенно-физическая..., 1977; Теплофизические ..., 1981; Куликов и др., 1986).

В.П. Панфилов руководил большим циклом работ по изучению структуры порового пространства, энергетики почвенной влаги, тепловых и воздушных свойств различных типов почв. Под его руководством впервые в условиях сибирского региона была рассмотрена сущность взаимосвязей физических свойств почв с главнейшими показателями их биологической активности, что обуславливало тесное смыкание физики почв с биологическими науками, предлагались пути создания и стабилизации оптимальных биофизических параметров почв. В последние годы он особое внимание уделял исследованию и агромелиоративной оценке водно-тепловых свойств и режимов сибирских черноземов в целях обоснования перспектив развития на их основе оросительной мелиорации. Новые обширные материалы глубокопрофильного изучения этих почв способствовали решению проблемы их ирригационного освоения, рационального использования и охраны. В.П. Панфиловым была дана оценка воздействия на свойства и режимы черноземов ненормированного орошения; исследованы закономерности нисходящего и восходящего передвижения почвенной влаги, ее доступность растениям в диапазоне естественного и дополнительного увлажнения. С учетом этих данных были теоретически и экспериментально обоснованы допустимые пределы (степень, глубина, диапазон) увлажнения автоморфных почв Западной Сибири при поливах, рекомендованные в качестве обязательных элементов водного режима, свойств почв и в целом, экологоохранной технологии орошения. Несомненным достижением В.П. можно признать разработку концепции использования и охраны сибирских

черноземов в орошаемом земледелии, что послужило началом разработки научных основ орошения и охраны почв Западно-Сибирского региона (Черноземы..., 1988). Основные принципы и подходы концепции формулируются следующим образом.

1. Орошение должно быть строго нормированным, исключая, прежде всего, инфильтрационные потери влаги, поскольку, во-первых, именно они являются источником большинства бед орошаемого земледелия на всей без исключений территории зоны, а во-вторых, это одно из направлений ресурсосбережения.

2. Нормирование предполагает строгий контроль за соблюдением основных параметров почвенного увлажнения:

а) мощность увлажняемого вегетационными поливами слоя не должна превышать 40-50 см по всему региону;

б) увлажнение вышеназванного слоя должно регулироваться строго в диапазоне от предполивного порога до НВ, для чего в каждом конкретном случае необходимо наладить систему оперативного контроля за влажностью почвы до глубины 50 см.

3. Орошение должно быть дифференцированным в плане применимости для расчетов поливных норм того или иного предполивного порога, где учитывались бы прежде всего гранулометрический состав почв и подстилающих пород, характер и степень засоления, условия залегания водоупоров.

Виктор Петрович активно занимался научно-организационной деятельностью: был членом ряда специализированных советов, долгие годы возглавлял Новосибирское отделение Докучаевского общества почвоведов, успешно руководил подготовкой кандидатских и докторских диссертаций, опубликовал 145 научных работ, в том числе 6 монографий. Настоящий труженик, увлеченный наукой, глубоко порядочный, скромный, доступный в общении – таким остаётся Виктор Петрович в сердцах его учеников и последователей.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Панфилов В.П. *Краткая характеристика почвенного покрова Горно-Алтайской автономной области // Естественная кормовая база Горно-Алтайской автономной области* (Тр. Биол. ин-та СО АН СССР. Вып. 2). Новосибирск, 1956. С. 126–135.
2. Панфилов В.П. *Мелиоративные особенности почв сухих котловин Горного Алтая // Труды конференции почвоведов Сибири и Дальнего Востока*. Новосибирск, 1964а. С. 423–427.
3. Панфилов В.П. *Агрофизические свойства основных типов почв Новосибирской области // Генезис почв Западной Сибири*. Новосибирск, 1964б. С. 151–216.
4. Панфилов В.П. *Вопросы физики почв Западной Сибири // Генетические особенности и вопросы плодородия почв Западной Сибири*. Новосибирск: Наука, 1972. С. 107–115.
5. Панфилов В.П. *Физические свойства и водный режим почв Кулундинской степи*. Новосибирск: Наука, 1973. 260 с.
6. Панфилов В.П. *Современное состояние и задачи почвенно-физических исследований в Сибири // Доклады сибирских почвоведов к X Междунар. конгр. почвоведов*. Новосибирск: Наука, 1974. С.25–35.
7. *Агрофизическая характеристика почв Западной Сибири* / В.П. Панфилов (отв. ред.). Новосибирск: Наука, 1976. 544 с.
8. *Почвенно-физические условия мелиорации в Западной Сибири* / В.П. Панфилов (отв. ред.). Новосибирск: Наука, 1977. 88 с.
9. *Теплофизические свойства и режимы черноземов Приобья* / В.П. Панфилов (отв. ред.). Новосибирск: Наука, 1981. 118 с.
10. Куликов А.И., Панфилов В.П., Дугаров В.И. *Физические свойства и режимы лугово-черноземных почв Бурятии*. Новосибирск: Наука, 1986. 137 с.
11. Хмелев В.А., Панфилов В.П., Дюкарев А.Г. *Генезис и физические свойства текстурно-дифференцированных почв*. Новосибирск: Наука, 1988. 128 с.
12. *Черноземы: свойства и особенности орошения*. / В.П. Панфилов (отв. ред.). Новосибирск: Наука, 1988. 128 с.

Поступила в редакцию 26.10.2019

Принята 31.10.2019

Опубликована 01.11.2019

**Сведения об авторах:**

**Кудряшова Светлана Яковлевна** – кандидат биологических наук, старший научный сотрудник лаборатории почвенно-физических процессов Института почвоведения и агрохимии СО РАН (Новосибирск, Россия); [kudryashova@issa-siberia.ru](mailto:kudryashova@issa-siberia.ru)

**Шапорина Нина Аркадьевна** – кандидат биологических наук, старший научный сотрудник лаборатории почвенно-физических процессов Института почвоведения и агрохимии СО РАН (Новосибирск, Россия); [shaporina@issa-siberia.ru](mailto:shaporina@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/)

**TOWARDS THE 90<sup>TH</sup> ANNIVERSARY OF VICTOR PETROVICH PANFILOV**

© 2019 S.Y. Kudryashova, N.A. Shaporina

*Address: Institute of Soil Science and Agrochemistry, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia. E-mail: [kudryashova@issa-siberia.ru](mailto:kudryashova@issa-siberia.ru)*

*The article presents some biographical data and brief description of research activity of Professor, Doctor of Biological Sciences Victor Petrovich Panfilov, an organizer and the first head of the laboratory of soil physics of the Institute of Soil Science and Agrochemistry of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, who significantly contributed into fundamental and applied studies of soil physical and meliorative properties and regimes in Siberia.*

**Keywords:** *Victor Petrovich Panfilov; soil agrophysical properties and regimes; soil thermal regimes; soil hydrological regimes; Siberia*

**How to cite:** *Kudryashova S.Ya., Shaporina N.A. Towards the 90<sup>th</sup> anniversary of Victor Petrovich Panfilov // The Journal of Soils and Environment. 2019. 2(3). e78. doi: [10.31251/pos.v2i3.81](https://doi.org/10.31251/pos.v2i3.81) (in Russian with English abstract).*

REFERENCES

1. Panfilov V.P. *Brief characterization of soil cover of the Altai Mountain Autonomous Oblast*. In book: Natural feed pool of the Altai Mountain Autonomous Oblast (Proc. Biol. Institute SB AS USSR. Issue 2). Novosibirsk, 1956, p. 126–135. (in Russian)
2. Panfilov V.P. *Meliorative peculiarities of the dry valley soils in the Altai Mountains*. In book: Proc. Conf. of Soil Scientists from Siberia and the Far East. Novosibirsk, 1964a, p. 423–427. (in Russian)
3. Panfilov V.P. *Agrophysical properties of the main soil types of the Novosibirsk region*. In book: The genesis of Soils in West Siberia. Novosibirsk, 1964b, p. 151–216. (in Russian)
4. Panfilov V.P. *The problems of soil physics in West Siberia*. In book: Genetic peculiarities and soil fertility in West Siberia. Novosibirsk: Nauka Publ., 1972, p. 107–115. (in Russian)
5. Panfilov V.P. *Physical properties and water regime in soils of the Kulunda steppe*. Novosibirsk: Nauka Publ., 1973. 260 p. (in Russian)
6. Panfilov V.P. *Current status and tasks of the soil physics' research in Siberia*. In book: Materials of Siberian soil scientists prepared for the X<sup>th</sup> International Soil Science Congress. Novosibirsk: Nauka Publ., 1974, p.25–35. (in Russian)
7. *Agrophysical characterization of soil of West Siberia*. Novosibirsk: Nauka Publ., 1976. 544 c. (in Russian)
8. *Soil physical environment for melioration in West Siberia*. Novosibirsk: Nauka Publ., 1977. 88 p. (in Russian)
9. *Thermal and physical properties and regimes of chernozems in the near Ob region*. Novosibirsk: Nauka Publ., 1981. 118 p. (in Russian)
10. Kulikov A.I., Panfilov V.P., Dugarov V.I. *Physical properties and regimes of the meadow chernozemic soils in Buryatia*. Novosibirsk: Nauka Publ., 1986. 137 p. (in Russian)
11. Khmelev V.A., Panfilov V.P., Dukarev A.G. *Genesis and physical properties of the texture-differentiated soils*. Novosibirsk: Nuka Publ., 1988. 128 p. (in Russian)
12. *Chernozems: their properties and irrigation peculiarities*. Novosibirsk: Nauka Publ., 1988. 128 p. (in Russian)

*Received 26 October 2019*

*Accepted 31 October 2019*

*Published 01 November 2019*

**About the authors:**

**Kudryashova Svetlana Y.** – Candidate of Biol. Sci., Senior Researcher of the Laboratory for Soil Physics of the Institute of Soil Science and Agrochemistry, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Novosibirsk, Russia); [kudryashova@issa-siberia.ru](mailto:kudryashova@issa-siberia.ru)

**Shaporina Nina A.** – Candidate of Biol. Sci., Senior Researcher of the Laboratory for Soil Physics of the Institute of Soil Science and Agrochemistry, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Novosibirsk, Russia); [shaporina@issa-siberia.ru](mailto:shaporina@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/)



## МОРФОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ОРОШАЕМЫХ ПОЧВ ЦЕНТРАЛЬНОЙ ФЕРГАНЫ

© 2019 А.Т. Турдалиев, К.А. Аскарлов, Ф.А. Мирзаев

Адрес: Ферганский государственный университет, ул. Мураббийлар, 19, г. Фергана, Узбекистан.  
E-mail: [avazbek1002@mail.ru](mailto:avazbek1002@mail.ru)

**Цель исследования.** Изучить морфологические особенности и гранулометрический состав орошаемой луговой сазовой почвы.

**Место и время проведения.** Центральная Фергана, Узбекистан, 2019 г.

**Методология.** Морфогенетический и сравнительно-географический методы.

**Основные результаты.** Охарактеризованы педолитные горизонты с карбонатно-гипсовыми новообразованиями. Эти горизонты имеют неблагоприятные для роста и развития растений водно-физические свойства, которые являются результатом протекающих в почвах пустынной зоны специфических гидроаккумулятивных процессов в связи с орошением и близким залеганием грунтовых вод.

**Ключевые слова:** морфология почв; гипс; арзык; шох; педолит; луговые сазовые почвы; аккумуляция; почвенный горизонт; гранулометрический состав

**Цитирование:** Турдалиев А.Т., Аскарлов К.А., Мирзаев Ф.А. Морфологические особенности орошаемых почв Центральной Ферганы // Почвы и окружающая среда. 2019. Том 2. № 3. е71. doi: [10.31251/pos.v2i3.71](https://doi.org/10.31251/pos.v2i3.71)

### ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время во всех странах мира наблюдается тенденция возрастания негативного антропогенного воздействия на почвы, в частности, минерализованных грунтовых вод. В результате такого воздействия происходит изменение экологических свойств почвы, снижение плодородия, а в отдельных случаях почва становится непригодной для сельскохозяйственного использования.

В условиях орошаемого земледелия в пустыне при слабой мутности вод почвенный профиль растет вниз, хотя может наблюдаться отложение наилка незначительной мощности и формирование намытых почв. На орошаемых площадях часто применяют минеральные и органоминеральные соединения для обеспечения растений необходимыми питательными элементами и сохранения плодородия почв.

Генетические горизонты почв характеризуют изменение ее свойств по вертикали и отчасти по горизонтали; эта пространственная дифференциация связана с распространением воздействия почвообразовательных факторов на горную материнскую породу. Обычно переходы между горизонтами имеют относительно постепенный характер (Aysen, 2009). Однако в природе эта закономерность не всегда сохраняется. В Центральной Фергане имеют место резкие переходы между отдельными горизонтами, причиной которых, с одной стороны, является первичная неоднородность почвообразующих пород, а с другой стороны – проявление гидроаккумулятивных процессов под влиянием орошения и близкого залегания грунтовых вод.

Морфология почв является результатом длительного почвообразовательного процесса: переход горных пород в новое биокосное тело – почву – требует времени (Розанов, 2004; Апарин и др., 2011). В настоящее время изучение морфологических свойств почв является актуальным как для почвоведения в целом, так и для производства сельскохозяйственных культур. На основании морфологических признаков почв можно получить обоснованные представления об их элементном и вещественном составе, почвенных процессах, режимах и особенностях почвообразования в данном регионе.

Морфология орошаемых луговых сазовых почв Центральной Ферганы медленно изменяется, отражая меняющиеся почвенные свойства. Различные агротехнологии, агромелиоративные и агрогеохимические приемы в значительной степени воздействуют на почву, что приводит к изменению её морфологических особенностей.

Беседин П.Н. (1981), исследуя генетические горизонты орошаемых луговых сазовых почв в свое время на генетико-географические закономерности распространения и морфологические

признаки почв Ферганской долины обратил внимание Панков М.А. (1957), который указал, в частности, на наличие карбонатных горизонтов в этих почвах.

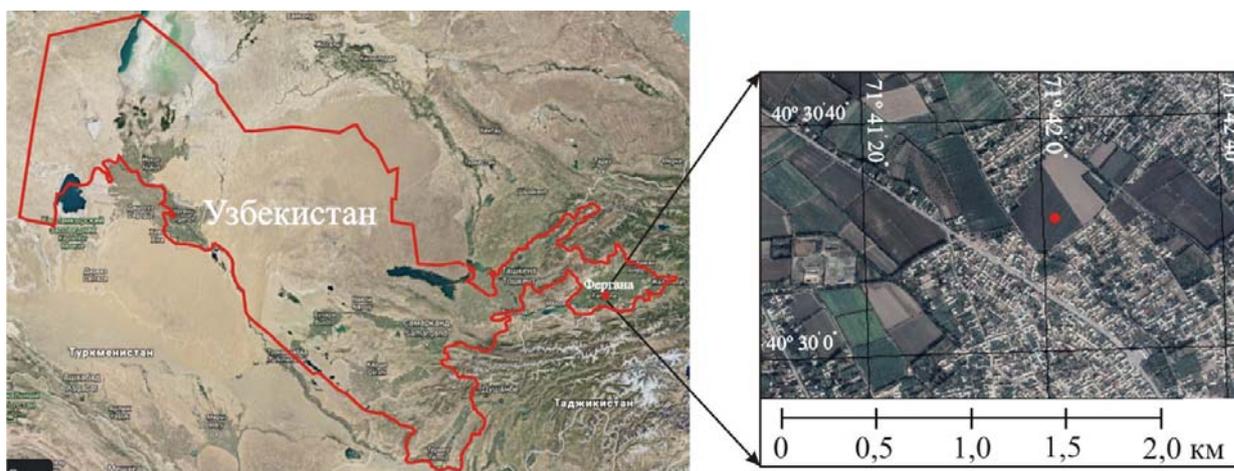
Беседин П.Н. (1981), исследуя генетические горизонты орошаемых луговых сазовых почв Ферганской долины, отметил, что в разных генетических горизонтах гидроморфных почв Центральной Ферганы аккумулируются сернокислые соли натрия и кальция, и установил, что широкое распространение в этом регионе имеют арзык-карбонат-гипсовые почвы.

В целом работ, посвящённых исследованиям почв с арзык-шоховыми горизонтами (т.е. горизонтами, обогащенными карбонатно-гипсовыми новообразованиями), мало.

### МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Объектом исследования были новоосвоенные, новоорошаемые, староорошаемые луговые сазовые почвы (Классификация .., 1977) Центральной Ферганы (рис.1), сформированные на аллювиальных, аллювиально-пролювиальных отложениях, засоленные, имеющие на разных глубинах арзык-шоховые, шох-арзыкковые и гипсовые горизонты. Согласно мировой базе почвенных ресурсов (IUSS Working Group WRB, 2014) такие почвы относятся к Calcic Gypsisols (Aric, Gleyic, Siltic).

До сих пор традиционное изучение почв начинают с исследования морфологических признаков. Детальное описание морфологии почв в полевых условиях составляет основу почвенных исследований. В качестве основных применяли морфогенетический В.В. Докучаева (Розанов, 2004) и сравнительно-географический методы, а также определение гранулометрического состава почв пипеточным методом по Н.А. Качинскому.



**Рисунок 1.** Расположение района исследований и почвенного разреза луговой сазовой почвы на снимке с сервиса Google Earth.

Климат Ферганской области, как и всей Ферганской долины близок к аридному. Зима с продолжительностью 59 дней, относительно теплая, со средней температурой от 0 до 7 °С. Однако в отдельные годы температура зимой может понижаться до –25,8 °С. Снежный покров непродолжителен. Для летнего периода характерны высокие температуры и большая сухость воздуха (Климат Ферганы, 1983). Средняя температура июля – +27,4 °С, максимальная – +42,2°С (<https://ru.climate-data.org/>). Осадки в летний период – явление редкое, их среднемесячное количество в июле-августе составляет 3-5 мм. В среднем за год выпадает около 206 мм осадков (Климат Ферганы, 1983; <https://ru.climate-data.org/>).

### РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В Центральной Фергане при средней степени минерализации и слабом стоке минерализованных грунтовых вод в пустынных условиях в засоленных почвах с низким содержанием гумуса при соотношении С:N 5,2–7,9 сформировались луговые сазовые почвы. В этих почвах обнаружены плотные сцементированные арзык-шоховые педолитные (Герасимов, 1976) горизонты на разных глубинах залегания. Глубина расположения педолитных горизонтов с юга на север уменьшается, что связано с формой рельефа. В орошаемых луговых сазовых почвах Куштепинского района эта глубина составляет 93–111 см, а в Язьяванском районе – 32–55 см, в

Улугнорском – 18–33 см. Распределение педолитных горизонтов имеет мозаичный характер. Гранулометрический состав в основном легко- и среднесуглинистый. Характерная особенность этих почв – низкое содержание гумуса и наличие цементированных горизонтов на различной глубине залегания.

В аридных условиях при слабой степени природной дренированности даже малое содержание солей в грунтовых водах приводит к их аккумуляции и последующему засолению почв. Содержащиеся в поливных водах соли в количестве 1–1,5 г/л служат дополнительным источником аккумуляции солей в почвах. При этом нарушается солевое равновесие и соотношение солей. Наличие простых солей ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ) в почвах влияет на энергетику почв и процессы почвообразования, на физические, химические и биогеохимические свойства. Немаловажное значение имеют качественный и количественный состав солей, их геоэнергетическое состояние. Надо помнить, что аккумуляция и расход энергии в почвах во многом связаны с количеством и качеством солей: известно, что каждая молекула кристаллизационной воды вносит в кристаллическую решетку 1542 Дж энергии (Турдалиев, Юлдашев, 2015), повышая энергетическое состояние почв.

Типичный профиль орошаемой луговой сазовой почвы пустынной зоны в Центральной Фергане (Разрез 5А в Куштепинском районе Ферганской области) приведен на рисунке 2. Разрез расположен на ровном поле после уборки хлопчатника (35 м к западу от основной автомобильной дороги, 60 м к югу от дренажа)

Глубина залегания грунтовых вод, горько-соленых на вкус, достигала 175 см.

*Морфологическое описание:*

Ап 0–28 см. Пахотный горизонт светло-серого цвета; сверху сухой, книзу наблюдается увеличение влажности; слабоплотный, среднесуглинистый, комковатый, имеются непрочно связанные комки, встречаются одиночные корни и корешки прошлых лет, в нижней части горизонта заметны гипсовые и карбонатные пятна, примазки; переход по цвету и плотности.

Ап-п 28–36 см. Подпахотный горизонт, светло-серый, среднесуглинистый, с непрочно связанной мелкокомковатой структурой; встречаются одиночные корешки, включений нет, водорастворимые соли, карбонатно-гипсовых пятен и примазок больше, чем в выше лежащем горизонте; переход к следующему горизонту нечеткий по цвету.

В1 36–91 см. Переходный горизонт, белесовато-серый с желто-коричневыми оттенками, плотный, включений нет, новообразований много, средне- и легкосуглинистый, комковатый, имеются непрочно связанные комки, встречаются одиночные корни, наблюдаются гипсовые и карбонатные пятна, примазки в нижней части горизонта; переход по цвету и плотности четкий.

В2 91–114 см. Переходный горизонт, белесовато-серый с желтыми оттенками, плотный, цементированный горизонт, включений нет, новообразований много. Этот горизонт служит ярким примером комплексного (механического, физико-химического и др.) геохимического барьера, роль которого в формировании почв и ее плодородии не до конца уточнена; переход к следующему горизонту резкий по плотности.

С1 114–132 см. Почвообразующая порода, светло-серого цвета с коричневыми и сизыми пятнами, много сизоватых пятен, мокрый, слабоплотный субстрат режется ножом, легкосуглинистый и суглинистый; переход постепенный по цвету и механическому составу.

С2 132–186 см. Почвообразующая порода, темно-коричневый, мокрый среднесуглинистый субстрат, включений нет, много коричневых и сизых пятен, есть конкреции и гипс; очень плотный цементированный горизонт, ниже идет напорная грунтовая вода.

Из приведенных материалов, а также из описания других разрезов в полевых условиях видно, что в Центральной Фергане на территории распространения орошаемых луговых сазовых засоленных почв имеются почвы с арзык-шоховыми, шох-арзыкковыми горизонтами с плохой воздухо- и водопроницаемостью на разных глубинах от поверхности.

Эти педолитные горизонты очень плотные и цементированные. Глубина расположения в почве уменьшается с юга на север, т.е. горизонты поднимаются вплоть до поверхности. При этом грунтовые воды тоже поднимаются в направлении с юга на север.

К характерным морфологическим признакам этих почв, кроме указанных выше, можно отнести большое содержание гипса, карбонатов кальция, магния, натрия и их сернокислых солей, а также разнообразие гранулометрического состава. Кроме того, имеются пятна вишневого окраски, которые образуются в комбинации с окислами железа и марганца; встречаются налеты, псевдомицелий и другие новообразования, представляющие собой легкорастворимые соли, гипс и карбонат кальция.

Новообразования в так называемых арзык-шоховых горизонтах свидетельствуют о влиянии минерализованных грунтовых вод, залегающих неглубоко от поверхности почвы. В этих горизонтах новообразования аккумулируются в большом количестве. При этом первичный почвенный материал и почвообразующая порода почти не отличаются. Здесь возникает особый цементирующий горизонт.



**Рисунок 2.** Разрез орошаемой луговой сазовой почвы пустынной зоны в Центральной Фергане (Куштепинский район).

В изученных горизонтах новообразования не являются частями в минералогическом отношении. Вместо углекислых и сернокислых солей кальция и магния часто выявляют полоторные окислы и другие соединения. В этих горизонтах выпадают соединения марганца, фосфора, кремния и др.

Изученные почвы имеют гумусово-карбонатный, или гумусово-арзык-шоховый профиль, представленный сочетанием гумусового горизонта с арзык-шоховым в нижней части.

Соединения железа, кремния, соли органических и минеральных кислот, углекислые и сернокислые соли кальция, магния железа сульфаты и хлориды натрия в зависимости от почвенно-геохимических условий выпадают в осадок и образуют новообразования.

Таким образом, формируются плотные сцементированные гидроаккумулятивные, так называемые педолитные, горизонты на различных глубинах почвенного профиля, гранулометрический состав которых приведен в таблице ниже.

**Таблица**

Гранулометрический состав орошаемой луговой сазовой почвы пустынной зоны в Центральной Фергане (Куштепинский район)

Горизонты	Глубина, см	Содержание фракций, %; размер частиц, мм							Сумма частиц, <0,01	Суглинистый
		1-0,25	0,25-0,1	0,1-0,05	0,05-0,01	0,01-0,005	0,005-0,001	<0,001		
A <sub>п</sub>	0-28	5,46	28,14	20,53	12,72	9,85	8,62	14,68	33,15	среднесуглинистый
A <sub>п-п</sub>	28-36	11,34	20,78	19,71	24,31	8,12	6,57	9,17	23,86	легкосуглинистый
B <sub>1</sub>	36-91	18,15	15,14	18,36	20,74	7,43	11,72	8,46	27,61	легкосуглинистый
B <sub>2</sub>	91-114	-	-	-	-	-	-	-	-	-
C <sub>1</sub>	114-132	12,42	15,36	18,32	15,2	15,7	12,14	10,86	38,7	среднесуглинистый
C <sub>2</sub>	132-186	13,62	14,45	24,3	16,8	11,2	9,34	10,29	30,83	среднесуглинистый

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Определено, что исследованная почва пустынной зоны Центральной Ферганы имеет следующее полное название – орошаемая луговая сазовая среднесуглинистая засоленная почва. Наличие так называемых арзык-шоховых и шох-арзыкковых горизонтов, являющихся результатом гидроаккумулятивных процессов в почвах Центральной Ферганы, приводит к появлению неблагоприятных водно-физических свойств.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Апарин Б.Ф., Касаткина Г.А., Сухачева Е.Ю. *Особенности морфологии почв с элювиальным горизонтом // Ресурсный потенциал почв – основа продовольственной и экологической безопасности России: сб. мат. Межд. науч. конф. (Санкт-Петербург, 2011).* Санкт-Петербург, 2011. 29-31 с.
2. Аринушкина Е.В. *Руководство по химическому анализу почв (2-е изд.).* М.: изд-во МГУ, 1970. 488 с.
3. Беседин П.Н. *Особенности засоления почв Центральной Ферганы // Распределения и движение солей в орошаемых почвах и методы регулирования солевых процессов.* М. 1981. С.9-21.
4. Герасимов И.П. *Генетические, географические и исторические проблемы современного почвоведения М., 1976.* 298 с.
5. 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. Климат Ферганы. Ленинград: Гидрометеиздат, 1983. 168 с.
6. *Методы агрохимических, агрофизических и микробиологических исследований в поливных хлопковых районах.* Ташкент. 1963. 440 с.
7. Панков М.А. *Почвы Ферганской области.* Ташкент. 1957. С. 23–33.
8. Розанов Б.Г. *Морфология почв.* М. 2004. 431 с.
9. Турдалиев А.Т., Юлдашев Г. *Геохимия педолитных почв.* Ташкент: 2015. 200 с.
10. Aysen A. *Problem Solving in Soil Mechanics.* Netherlands, 2009. 189 p.
11. *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. № 106.* FAO, Rome, 2014. 181 p.
12. *Turdaliev A.T., Yuldashev G. Morphological features of pedolytical soils in Central Ferghana // European science review. Austria. 2016. Nos.5-6. P. 14-15.*

Поступила в редакцию 29.05.2019

Принята 08.12.2019

Опубликована 24.12.2019

### Сведения об авторах:

**Турдалиев Авазбек Турдалиевич** – доктор биологических наук, заведующий кафедрой зоотехнии и агрономии Ферганского государственного университета (Фергана, Узбекистан); [avazbek1002@mail.ru](mailto:avazbek1002@mail.ru)

**Аскарров Камолиддин Абдуганиевич** – зам. декана факультета естественных наук Ферганского государственного университета (Фергана, Узбекистан)

**Мирзаев Файёз Алимджан угли** – магистрант 2 курса по направлению «Почвоведение» Ферганского государственного университета (Фергана, Узбекистан)

*Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.*



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

## MORPHOLOGICAL PECULIARITIES OF THE IRRIGATED SOILS IN THE CENTRAL FERGANA, UZBEKISTAN

© 2019 A.T. Turdaliev, K.A. Askarov, F.A. Mirzaev

*Address: Fergana State University, Fergana, Uzbekistan. E-mail: [avazbek1002@mail.ru](mailto:avazbek1002@mail.ru)*

**The aim of the study.** *To describe the morphology of the irrigated meadow saz soils (Calcic Gypsisols (Aric, Gleyic, Siltic)).*

**Location of the study.** *Central Fergana, Uzbekistan, 2019 year.*

**Methodology.** *Morphogenetic comparative method developed by V.V. Dokuchaev.*

**Result.** The pedolithic horizons with carbonate-gypsum accumulation were described. The hydrophysical properties of the horizons, formed due to the specific hydrological processes due to irrigation, do not favour plant growth and development

**Key words:** soil morphology; gypsum; arzyk; shokh; pedolith; accumulation; soil horizon; granulometric composition.

**How to cite:** Turdaliev A.T., Askarov K.A., Mirzaev F.A. Morphological features of the irrigated soils in Central Fergana // *The Journal of Soils and Environment*. 2019. 2(3). e71. doi: [10.31251/pos.v2i3.71](https://doi.org/10.31251/pos.v2i3.71) (in Russian with English abstract).

## REFERENCES

1. Aparin B.F., Kasatkina G.A., Suxacheva E.Yu. *Morphological features of soils with eluvial horizons*. In book: Resource potential of soils as a basis for food and environmental safety of Russia: Proc. Int. Conf. (Saint-Petersburg, 2011). Saint-Petersburg, 2011, 29-31 p. (in Russian)
2. Arinushkina E.V. *Soil chemical analyses manual*. Moscow, Moscow State University Publ., 1970, 488 p. (in Russian)
3. Besedin P.N. *Peculiarities of soil salinization in Central Fergana*. In book: Distribution and movement of salts in irrigated soils and the methods to regulate salinization processes. Moscow: Nauka, 1981, p.9-21. (in Russian)
4. Gerasimov I.P. Genetic, geographical and historical problems of modern soil science M., 1976. 298 p. (in Russian)
5. 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)
6. The climate of Fergana. Leningrad: Hydrometeoizdat, 1983, 168 p. (in Russian)
7. *Methods of agrochemical, agrophysical and microbiological studies in watering cotton areas*. 1963, 440 p. (in Russian)
8. Pankov M.A. *Soils of the Fergana region*. Tashkent, 1957, p. 23–33. (in Russian)
9. Rozanov B.G.. *Morphology of Soils*. Moscow, 2004, 431 p. (in Russian)
10. Turdaliev A.T., Yuldashev G. *Geochemistry of pedolithic soils*. Tashkent, 2015, 200 p. (in Russian)
11. Aysen A. *Problem Solving in soil Mexanics*. Netherlands, 2009. 189 p.
12. 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. № 106. FAO, Rome, 2014, 181 p.
13. Turdaliev A.T., Yuldashev G. Morphological features of pedolytical soils in Central Ferghana, *European science review, Austria*, 2016, nos.5-6, p. 14-15.

Received 05 May 2019

Accepted 08 December 2019

Published 24 December 2019

### About the authors:

**Turdaliev Avazbek T.** – Doctor of Biological Sciences, the Head of the Zootechnology and Agronomy Chair, Fergana State University, Uzbekistan; [avazbek1002@mail.ru](mailto:avazbek1002@mail.ru)

**Askarov Kamoliddin A.** – Deputy Dean of the Faculty of Natural Sciences, Fergana State University, Uzbekistan

**Mirzaev Faioz A.** – Master Student, Fergana State University, Uzbekistan.

*The authors read and approved the final version of the manuscript*



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