

## ВОЗМОЖНОСТИ ФИЗИКО-ТЕОРЕТИЧЕСКИХ МЕТОДОВ В ЭКОЛОГИИ ПОЧВ (НА ПРИМЕРЕ МОДЕЛИРОВАНИЯ СТРУКТУРЫ ПОЧВЕННО-КЛИМАТИЧЕСКИХ АРЕАЛОВ)

© 2023 А. В. Чичулин

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)

**Цель исследования.** Рассмотреть новые возможности современных физико-теоретических методов решения задач экологии почв, связанных с количественным описанием закономерностей системной организации почвенно-климатических ареалов в зависимости от совместного учёта гидротермических факторов внешней среды и свойств почвенного субстрата.

**Методы.** Методологический и физико-теоретический анализ экспериментальных и теоретических познавательных процедур, принятых в экологии почв, в частности – используемых понятий, гипотез и идеализаций. Математическое моделирование структуры взаимосвязей между факторами почвообразования.

**Основные результаты.** Методологический анализ предположений, лежащих в основе количественного определения двух традиционных гидротермических коэффициентов – радиационного индекса сухости ( $R/LP$ ) и коэффициента увлажнения ( $P/E_0$ ) даёт основание относить их к краевым (граничным) условиям почвы, определяемым, главным образом, климатическими характеристиками. Это является одной из причин их ограниченной применимости при рассмотрении почвенно-экологических задач, связанных с необходимостью количественного описания взаимосвязей между типами теплового и водного режимов почв и общими климатическими закономерностями их распространения на земной поверхности.

На основе фундаментального принципа аффинного подобия (разновидности общего принципа симметрии) предложены новые, обобщенные переменные  $R/E^\alpha$  и  $P/E^\beta$ , в которых испарение почвенной влаги  $E(R,P)$ , определенное на всем диапазоне изменения средних многолетних климатических характеристик  $R$  (радиационного баланса) и  $P$  (осадков), выступает в роли общей системы отсчёта. Специфика гидротермического отклика почвенного субстрата определяется соответствующими структурно-функциональными индексами подобия  $\alpha$  и  $\beta$ . Физический смысл новых переменных состоит в том, что они характеризуют полноту использования конкретным почвообразовательным процессом радиационной энергии ( $\alpha$ ) и осадков ( $\beta$ ).

**Заключение.** Математическая модель, построенная на функциональной зависимости между обобщенными переменными, позволяет предсказать новые структурно-функциональные закономерности (радиальные и тангенциальные) в системной организации почвенно-климатических ареалов. По сравнению с климатическими гидро- и терморядами, предложенными В.Р. Волобуевым, структурно-функциональные закономерности лучше описывают экспериментальные данные.

**Ключевые слова:** симметрия; системная организация ареалов; индексы подобия почв; дискретный почвенный спектр; аридно-гумидный дуализм почв.

**Цитирование:** Чичулин А.В. Возможности физико-теоретических методов в экологии почв (на примере моделирования структуры почвенно-климатических ареалов) // Почвы и окружающая среда. 2024. Том 6. № 4. e229. DOI: [10.31251/pos.v6i4.229](https://doi.org/10.31251/pos.v6i4.229).

### МЕТОДОЛОГИЧЕСКОЕ ВВЕДЕНИЕ

Чтобы понять физические законы, мы должны усвоить себе раз и навсегда, что все они в какой-то степени приближённые.

А. Эйнштейн.

В парадигме современного теоретического (генетического) почвоведения понятие «взаимодействие» является ключевым. С точки зрения современной физики это относит почву к «неклассическим объектам» исследования, методологические и теоретические предпосылки

изучения которых *принципиально* отличаются от соответствующих предпосылок изучения «классических объектов» (Дышлевый, 1976). Перечислим их.

- Главной предпосылкой является предположение, что свойства «классических объектов» изучения не зависят от окружающих условий, в частности – от экспериментальных средств исследования. Предполагается, что этой зависимостью можно либо пренебречь, либо учесть при обработке результатов наблюдения и получить знание о физическом объекте «самом по себе». Для объекта «неклассического типа» связью с условиями и средствами исследования уже никак нельзя пренебречь. В методологических исследованиях об этом говорится как о необходимости в теории объекта учитывать «эффект познания», описывать не только объект сам по себе, но и взаимодействие объекта с условиями его познания. Именно поэтому для теоретического знания таких объектов характерно прежде всего органическое включение методологических принципов специального рода исследования, без которых такое знание не может быть построено (Овчинников, 1988; Фролов, 2002).

- Следующей предпосылкой изучения «неклассических объектов» является принятие условия, что для их физико-теоретического описания принципиально важным является *целостное* представление объектов, объединяющее их противоположные, порой взаимоисключающие аспекты (примерами таких объединений из области физики являются: пространство – время, волна – частица, инерция – тяготение, порядок – хаос) (Акчурин 1974; Овчинников, 1988). Вообще, следует подчеркнуть, что поиски единства на основе общих принципов представляют один из важнейших мотивов современной науки (Илларионов, 1979).

Примерами наиболее известных и выдающихся физических теорий, занимающимися «неклассическими объектами», служат специальная теория относительности (1905 г.), релятивистская теория гравитации (1915 г.), квантовая механика (1926–1930 гг.) и теория самоорганизации, синергетика (70-е годы XX века). Интересно отметить, что хотя эти теории были созданы на несколько десятилетий позже официально признанной даты оформления идейной основы генетического почвоведения («Русский чернозём» В.В. Докучаева опубликован в 1883 г.), они гораздо быстрее вышли на более высокий уровень теоретического и математического развития. Совершенно очевидно, что дело не в абстрактной «сложности» почвы, а в том, что реальные проблемы её изучения лежат в другой плоскости.

Дело в том, что в течении тысячелетий люди, работая с почвой, обходились качественно-наглядным, в чем-то даже мифопоэтическим пониманием происходящих в ней процессов. Для решения большинства практических задач этого было достаточно. С применением развитых к тому времени *количественных* – экспериментальных и теоретических – методов, почвоведы неизбежно стали встречаться с классическими методологическими проблемами исследования собственной познавательной деятельности. Такие ситуации неоднократно повторялись в истории науки – и задолго до, и после создания генетического почвоведения, когда «правильные» математические, физические, химические и другие количественные подходы оказывались в действительности не универсальными, а имеющими определенную, ограниченную область применения. «Классические» количественные теории, понятия и методы, развитые для описания «простых», однородных, обособленных объектов, будучи использованными при изучении почв, оказывались разобщенными, даже противоречащими друг другу. Логика их развития требовала отказа от необоснованной абсолютизации достигнутого в них уровня познания действительности, оформленного в соответствующей «картине мира». Появилась необходимость поиска условий совместимости разобщенных понятий – их обобщения. «Простые» решения приводили к «кризисной» ситуации в конкретно-теоретическом смысле именно потому, что в почвах преобладали «сложные», интегральные формы взаимодействующих структур и процессов. Их надо было не только увидеть, но и теоретически выразить полученные результаты в логике как традиционных, так и новых научных понятий.

Однако проблема заключалась в том, что такого обобщения требовала теория, но не практика сельского хозяйства. В почвоведении же практически всегда побеждали практические задачи. Дело в том, что люди с успехом занимались сельским хозяйством, ирригацией, мелиорацией, рекультивацией почв за много тысячелетий до В.В. Докучаева и оформления им генетического почвоведения как фундаментальной науки. Достигнутого уровня качественного и локального понимания происходящих процессов в почве было достаточно. Однако не было осознанной потребности в развитии единой *количественной* теории.

Между тем, явное осознание кризисных ситуаций и существующих теоретических противоречий исключительно важно для любой науки. Обращаясь в качестве контрастного примера к истории развития теоретических представлений в физике можно отметить, что именно во времена кризисных ситуаций в конкретно-научном смысле, разрешение различных противоречий обеспечивало революционные шаги в ее развитии. Важным является то, чтобы наличие противоречий осознавалось значительной частью научного сообщества.

Например, по воспоминаниям физика-теоретика А. Пайса (1989), А. Эйнштейн в 1949 г. описывал эпоху создания квантовой механики следующим образом: «Все мои попытки приспособить теоретические основы физики к новым результатам потерпели полную неудачу. Это было так, точно из-под ног ушла земля и нигде не видно было твердой почвы, на которой можно было бы строить» (цит. по: Пайс, 1989, с. 346). Интересно сопоставить эту «землю, уходящую из-под ног» у физиков со спокойным отношением почвоведов к теоретическим проблемам своей науки.

Говорить о сознательном замалчивании существующих проблем в почвоведении было бы, конечно, преувеличением. Как мы уже упоминали, объективные причины заключаются в реальной нацеленности почвоведения на решение не теоретических, а, исключительно, прикладных проблем. Хотя с этим, конечно же, мало кто согласится. Поэтому сошлёмся на мнение авторитетного почвовед-теоретика (и безусловно – практика) И.А. Соколова (2004, с. 4): «Работа в области генетического почвоведения – дело неблагодарное, особенно в наше время, когда столь популярно одно из древнейших и самых живучих заблуждений о том, что ценна только та наука, которая немедленно дает эффект для практики в форме материальной выгоды. История не раз опровергала и, казалось бы, хоронила это заблуждение. Но оно возрождается снова и снова. К почвоведению это приложимо в полной мере». И далее, говоря не только о стагнации, но даже деградации теоретического почвоведения, И.А. Соколов (2004, с. 5) пишет: «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».

В зарубежном почвоведении ситуация немного другая. Явно просматривается общее понимание кризисной ситуации и предлагаются некоторые методы её разрешения. В данной работе их мы не рассматриваем, отметим только, что в программном резюме работы «Возможности современных и будущих фундаментальных исследований в почвоведении» (2000), написанной группой ведущих почвоведов США, озаглавленном «Культура фундаментальных исследований в науке о почве», отмечается, что «безусловные успехи, которых уже достигло прикладное почвоведение ... создали впечатление о том, что теоретическое почвоведение возникает обычно как побочный продукт при или после, прикладных исследований в области сельского хозяйства... Становится всё более очевидным, что сложность и разнообразие современных практических задач требует теперь *более широкого подхода к науке о почве*; подходы, стимулированные только прикладными задачами оценки земель, оказались недостаточными».

## ТЕОРИЯ

Цель настоящей работы – рассмотреть возможности современных физико-теоретических методов решения задач экологии почв, связанных с построением математической модели, описывающей закономерности системной организации почвенно-климатических ареалов в зависимости от гидротермических факторов внешней среды и с учётом реакции почвенного субстрата на эти факторы. Новые возможности этих методов, реализованные в конкретной математической модели, выявляются в результате выполнения следующих процедур:

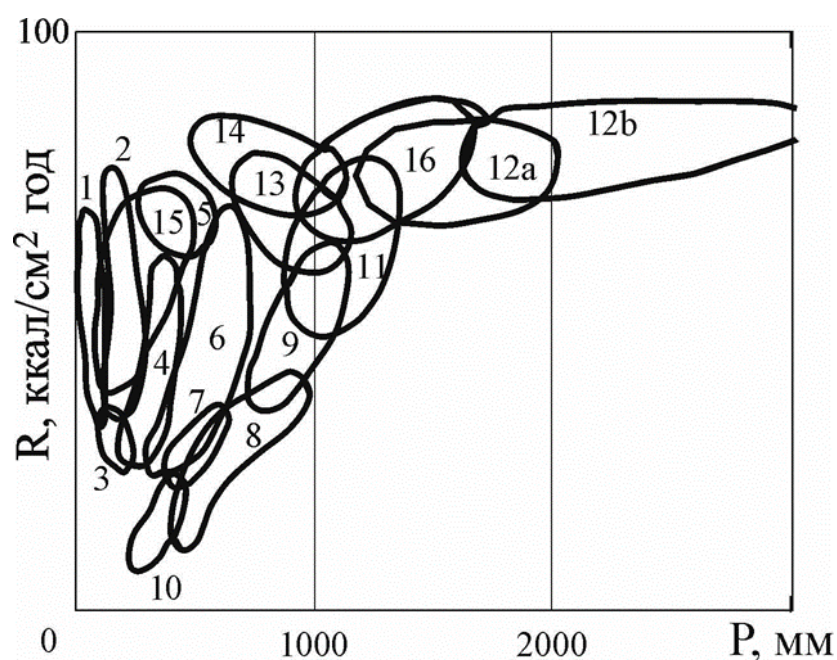
- Методологического анализа традиционных, применяемых в настоящее время, независимых гидротермических коэффициентов. Обоснования необходимости применения нового количественного метода их описания. Выбора нового элементарного объекта теории. Физико-теоретического обобщения традиционных коэффициентов. Установления связи между ними на основе выбора единой системы отсчета;

- Принятия гипотезы аффинного подобия для зависимости функции испарения почвенной влаги  $E(R,P)$  как интегральной характеристики почвообразовательного процесса от гидротермических факторов  $R$  и  $P$ . Обоснования возможности учета свойств почвенного субстрата

через индексы подобия, совместно описывающих изменение масштаба  $E(R,P)$ . Отметим, что через теорию аффинного подобия в настоящей работе автоматически реализуется системный подход.

Краткий исторический очерк развития количественных методов описания зависимости характера почвенного покрова от гидротермических условий представляет собой одну из задач настоящей работы. Однако главная наша цель – как можно подробнее описать исходные методологические принципы построения новой физико-теоретической модели, саму модель и новые результаты (главным образом, на качественном уровне), полученные с её помощью.

С самого начала разработки основ генетического почвоведения почвоведы уделяли большое внимание характеристике климатических условий почвообразования. На рисунке 1 показано расположение почвенно-климатических ареалов в координатах: средний многолетний радиационный баланс  $R$  – средние многолетние осадки  $P$  (Волобуев, 1953; 1973; 1974). Задача заключается в том, чтобы найти универсальные, опирающиеся на фундаментальные физико-теоретические принципы, математические уравнения, описывающие структуру этих ареалов. История почвоведения и её современная фаза развития дают немало примеров решения этой задачи.



**Рисунок 1.** Расположение почвенно-климатических общностей (по Волобуеву, 1974): 1 – пески пустынь, 2 – серозёмы, 3 – бурые почвы полупустынь, 4 – каштановые почвы, 5 – каштановые почвы Африки, 6 – чернозёмы, 7 – серые лесные почвы, 8 – подзолы и подзолистые почвы, 9 – бурые лесные почвы, 10 – почвы тундр, 11 – желтозёмы, 12 – краснозёмы и латериты (12a – основной ареал, 12b – более редкое распространение), 13 – коричневые почвы сухих лесов и кустарников (Африка), 14 – чёрные почвы саванн и тропических прерий, 15 – светло-бурые почвы тропических полупустынь, 16 – красно-бурые почвы саванн. Расположение почвенно-климатических общностей представлено в координатах: средний многолетний радиационный баланс ( $R$ ) – средние многолетние осадки ( $P$ ).

За рубежом получили распространение следующие коэффициенты:

- дождевой фактор Ланга:

$$F_L = P/T \quad (1)$$

впоследствии непринципально модифицированный Мартони:

$$F_M = P/(T + 10) \quad (2)$$

где  $P$  – годовая суммы осадков  $P$  (мм),  $T$  – средняя годовая температура  $T$  ( $^{\circ}\text{C}$ );

- коэффициент  $NS$  Мейера, равный отношению осадков  $P$  к абсолютному дефициту насыщения воздуха водяными парами  $D$ :

$$NS = P/D \quad (3)$$



- показатель эффективности осадков:

$$I = \sum_{n=1}^{n=12} 115 \left( \frac{P}{T-10} \right)_n^{10} \quad (4)$$

основанный на суммировании месячных величин, причем осадки измеряются в дюймах, а среднемесячная температура – в градусах Фаренгейта (Иенни, 1948).

В бывшем СССР нашёл широкое применение (используется до сих пор) гидротермический коэффициент Селянинова, представляющий собой отношение суммы осадков (мм) за период с температурой выше 10°C к сумме температур (°C) за тот же период, увеличенное в 10 раз (Добровольский, Урусевская, 2004). Популярность и лучшую применимость, по сравнению с коэффициентами (1) – (4), ему обеспечил одновременный учёт (эмпирический) *пороговых* значений и тепла, и влаги. Эти коэффициенты можно условно отнести к традиционным.

В последнее время во многих практических работах (Казеев и др., 2015; Соколов, 2019; Губарев и др., 2022) используются и другие, реже применяемые, но также откровенно эмпирические гидротермические коэффициенты по Мезенцеву, индексы континентальности по Горчинскому, Конраду, Ценкеру и аридности по Емберже. Приводить явный вид этих коэффициентов здесь смысла не имеет. Можно сказать только, что они носят локальный характер, а их ограниченную применимость в теоретическом смысле, обеспечивает то, что все они характеризуют, главным образом, только климатические условия и не учитывают свойства почвенного субстрата.

Многообразие конкретных коэффициентов отражает, в конечном счёте, многообразие почвенных закономерностей. Однако, можно сказать, что их количество служит косвенным признаком существования упомянутой выше кризисной ситуации в теории почвообразования. Не все из перечисленных коэффициентов обладают одинаковой степенью общности и теоретической обоснованности. Поэтому в работе мы ограничимся только двумя коэффициентами в наибольшей степени удовлетворяющие этим условиям, а именно: а) безразмерный коэффициент увлажнения Высоцкого-Иванова, введенный по предложению В.В. Докучаева еще в 1904 г.:

$$K_P = P/E_0 \quad (5)$$

показывающий в какой мере выпадающие в данном регионе осадки  $P$  (мм) возмещают испаряемость  $E_0$  (мм) с водной поверхности по эвапориметру; и б) радиационный индекс сухости, определенный М.И. Будыко в 1948 г.

$$K_R = R/LP \quad (6)$$

отражающий возможность накопления влаги при данных условиях  $R$  (ккал см<sup>2</sup> год), где  $L$  – скрытая теплота парообразования, принятая равной 600 (кал см<sup>-3</sup>) (Реймерс, 1990). На практике эти коэффициенты используются по отдельности. Ранее мы подробно разбирали причины их ограниченной применимости в этих случаях (Чичулин, 2019; 2020). Поэтому здесь только кратко напомним эти причины и подчеркнем возможность обобщения этих коэффициентов, в частности – совместного использования. Именно последнее обеспечивает возможность *целостного* физико-теоретического описания процессов гидротермического обмена почвы и окружающей среды.

Определенную степень общности и одновременно теоретической обоснованности, с точки зрения теории подобия, традиционным коэффициентам (5) и (6) придаёт безразмерный характер (Гухман, 1973). Обратим внимание, что в обоих определениях используются понятия потенциально возможных (максимальных) величин испарения – с водной поверхности, находящейся на поверхности почвы (для  $K_P$ ) и полностью всех осадков (для  $K_R$ ).

В этой работе лишь подчеркнём, что данные гидротермические коэффициенты, будучи совершенно правильными по отдельности и обеспечивающие простоту и удобство при решении задач климатической группировки почв, являются *взаимно несовместимыми*, их нельзя применять *одновременно*, для одинаковых условий они дают разные численные значения. Это проявляется в том, что гидроряды, рассчитанные на основе радиационного индекса сухости удовлетворяют условию:

$$R \propto P \quad (7)$$

тогда как аналогичные ряды, рассчитанные на основе коэффициента увлажнения – условию:

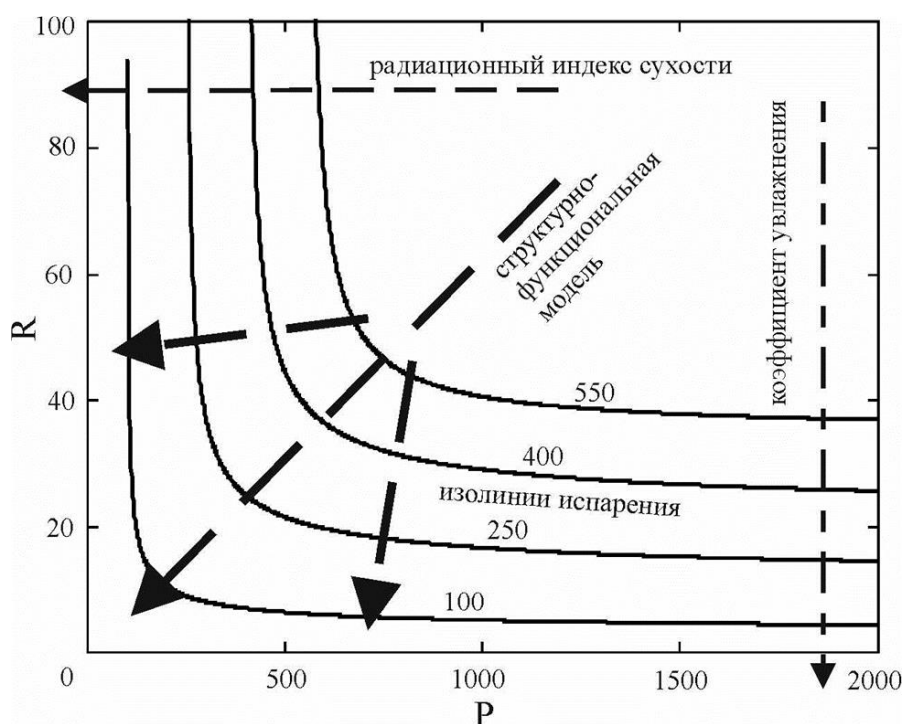
$$R \propto P^{1.48} \quad (8)$$

Физическая причина несовместимости (7) и (8) заключается в том, что радиационный индекс сухости в большей степени коррелирует с условиями существования аридных почв, а коэффициент увлажнения – с условиями для гумидных (рис. 2). Тем не менее, этих коэффициентов было вполне

достаточно для решения локальных прикладных задач, тем более, что они носят не абсолютный, а относительный характер, то есть, несмотря на свою количественную форму, эти коэффициенты служат лишь для качественной группировки почвенных ареалов. Но для решения глобальных экологических проблем, когда требуется теоретически рассматривать весь диапазон изменения гидротермических условий, необходимо выработать более глубокий уровень понимания взаимосвязей гидротермических параметров. Возникает задача: найти логические условия совместимости этих коэффициентов, обобщить их. Сущность такого обобщения состоит в рассмотрении их совокупно, как единой логически связанной системы, в отыскании условий совместимости результатов различных экспериментов. Напрямую это сделать невозможно. Но оказалось, что задачу можно решить, если *переопределить* традиционные коэффициенты следующим образом:

$$K_P = P/E(R, P) \text{ и } K_R = R/E(R, P) \quad (9)$$

Мы сохранили за новыми коэффициентами обозначения традиционных. Путаницы не должно возникнуть, поскольку они никогда в дальнейшем не используются вместе. Заметим, что новые коэффициенты (9) в асимптотических пределах при  $E(R, P)_{P \rightarrow \infty}$  и  $E(R, P)_{R \rightarrow \infty}$  переходит в традиционные коэффициенты (5) и (6). Тем самым выполняется фундаментальный методологический принцип соответствия, утверждающий, что любая новая научная теория или понятие должны включать старую теорию или понятие как частный асимптотический случай (Эйнштейн, Инфельд, 1965). Теплоту парообразования  $L$  мы положили равной 1 поскольку это не вносит в модель принципиальных изменений.



**Рисунок 2.** Изолинии испарения почвенной влаги. Единицы измерения радиационного баланса ( $R$ ) и осадков ( $P$ ) приведены на рис. 1. Тонкими штриховыми стрелками обозначены области действия традиционных гидротермических коэффициентов – радиационного индекса сухости и коэффициента увлажнения. Области подобия для почвенно-климатических ареалов ищутся путём сдвига изолиний либо только по оси осадков, либо только по оси радиационного баланса. Толстыми штриховыми стрелками – область действия рассматриваемой в работе физико-теоретической, структурно-функциональной модели. Для этой модели – глобальное подобие (для всех почвенно-климатических одинаково) определяется сдвигом всех изолиний испарения по диагонали с различными коэффициентами подобия ( $\alpha=1,48$ ;  $\beta=1$ ).

Условия (9), по существу, означает принятие гипотезы глобального подобия – для всех почвенно-климатических ареалов, во всем диапазоне изменения факторов  $R$  и  $P$ . Тогда как каждый

из традиционных гидротермических коэффициентов в качестве системы референции (системы отсчета) использует только отдельные части *граничных* условий  $E(R,P)_{P \rightarrow \infty}$  и  $E(R,P)_{R \rightarrow \infty}$  для испарения почвенной влаги  $E$ , новые коэффициенты для аналогичной цели используют полную кривую  $E(R,P)$ , тем самым *опосредованно* учитывая специфику испарения почвенной влаги из всего объема толщи почвенного субстрата (см. рис. 2). Именно это условие является основной причиной отличия результатов, описываемой в настоящей работе структурно-функциональной модели, от гидротермической системы В.Р. Волобуева и группировки почв на основании радиационного индекса сухости М.И. Будыко.

Физический смысл новых коэффициентов можно пояснить, сославшись на аналогию с обоснованием И.П. Герасимовым (1986) новой «парадигмы» – необходимости внести определённое дополнение в учение В.В. Докучаева о факторах почвообразования. Изучение генезиса почв должно идти не путём прямого сопоставления факторов почвообразования со свойствами почв (именно это делают традиционные коэффициенты (5, 6)), а через те почвенные процессы, которые формируют свойства почв под влиянием факторов (условий) почвообразования. Двучленную формулу «свойства почв ← факторы почвообразования» И.П. Герасимов предложил заменить в трехчленную «свойства почв ← процессы почвообразования ← факторы почвообразования» (Добровольский, 2005). Аналогичным образом в описываемой модели новые переменные опосредованно (забегая вперед, скажем – через индексы подобия  $\alpha$  и  $\beta$  в определении (11)) учитывают изменение структуры взаимосвязей между переменными  $E$ ,  $R$ ,  $P$  для субстрата каждой почвы.

### РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

На рисунке 2 приведены изолинии испарения почвенной влаги  $E(R, P)$ , которые входят в определение новых коэффициентов (9). Они описываются выведенным нами на основе оцифрованных графических данных В.Р. Волобуева (1974) феноменологическим уравнением:

$$R(P, E) = \frac{E^{2.69} \left(\frac{E}{1000}\right)^{4.91} + 0.98}{(P-E)^{3.44} \left(\frac{E}{1000}\right)^{3.9}} + \left(\frac{E}{50}\right)^{1.48} \quad (10)$$

На этом же рисунке изображены области и характер сдвигов изолиний испарения почвенной влаги задаваемых традиционными (5), (6) (строго горизонтальный или вертикальный сдвиг) и новыми структурно-функциональными коэффициентами (9) (сдвиг по диагонали при преобразованиях аффинного подобия).

Однако преобразованием (9) задача решается не полностью. При выполнении этого условия уравнения, описывающие структуру почвенно-климатических ареалов, могут не стягиваться в единую функциональную зависимость. Этот вопрос мы не будем разбирать подробно в данной работе, отметим только, что следующий шаг в построении новых обобщенных переменных заключается в принятии гипотезы *локальной* однородности для *каждого* почвенно-климатического ареала по отдельности. Это достигается введением однородных функций с индексами подобия  $\alpha$  и  $\beta$ :

$$K_R = R/E^\alpha, \quad K_P = P/E^\beta \quad (11)$$

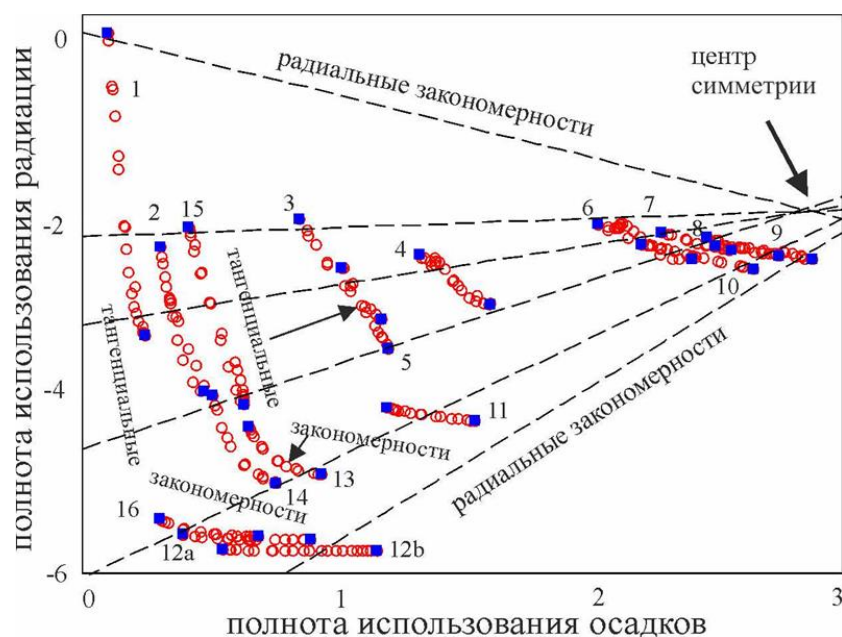
После преобразований (11) почвенно-климатические ареалы стягиваются в практически однозначные криволинейные зависимости, описываемые уравнениями общего вида (рис. 3):

$$K_R = f(K_P) \quad (12)$$

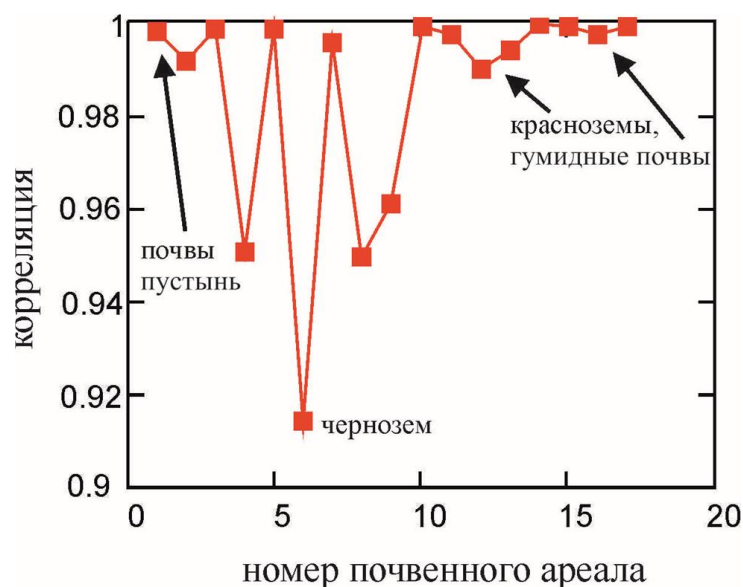
Записывая это уравнение в развернутом виде, получим:

$$K_R(K_P) = \frac{a}{(K_P - b)^c} + d \quad (13)$$

Несмотря на свой феноменологический характер, это уравнение фиксирует очень интересный результат. Оказывается, что добиться максимальной корреляции (средние коэффициенты корреляции для всех почв практически равны 0,99) между новыми переменными  $K_R$  и  $K_P$  по (13) можно только введя начальные точки отсчета для них –  $b$  и  $d$ , разные для разных почв (рис. 4). Мы получили этот новый результат, заранее его не предполагая. Сопоставляя его с эмпирически фиксированным, например, в коэффициенте Селянинова, условием подсчёта температур выше 10 °С, можно утверждать, что мы получили новое, обобщенное условие.



**Рисунок 3.** Расположение почвенно-климатических ареалов в обобщённых переменных (11), учитывающих свойства почвенного субстрата. Номера у линий соответствуют номерам ареалов, изображенных на рисунке 1. Вместо гидро- и терморядов В.Р. Волобуева выделяются новые – радиальные и тангенциальные закономерности. Тангенциальные составляющие представляют из себя почвенно-климатические ареалы, полученные преобразованием аффинного подобия из исходных данных, изображенных на рисунке 1, с индексами  $\alpha$  и  $\beta$ , разными для разных ареалов. Они стягиваются практически в одну нелинейную зависимость, изображенную красными кружками, и описываются уравнениями (12) и (13). Границы ареалов, изображенные синими квадратами, располагаются на радиальных закономерностях, описываются линейными уравнениями и в своей совокупности указывают на существование центра симметрии – новой почвенно-климатической закономерности.



**Рисунок 4.** Коэффициенты корреляции для каждого из почвенно-климатических ареалов в новых переменных, изображенных на рисунке 3. Все ареалы характеризуются высокими коэффициентами корреляции, что свидетельствует об обоснованности принятой гипотезы однородности  $R \sim E^\alpha$  и  $P \sim E^\beta$  при математическом описании ареалов. Приведённые результаты интерпретируются таким образом: структуры аридных и гумидных ареалов являются самыми однородными, тогда как структуры ареалов чернозёмных почв характеризуются наибольшей неустойчивостью этих почв к изменению внешних гидротермических условий (наибольшей чувствительностью) и объединяют максимальное количество конкретных почвенных типов.



Для каждой почвы, для каждого вида растительности, при подсчёте корреляций между их изучаемыми характеристиками, количественные отсчеты температуры и влажности почвы необходимо вести не от абстрактного физического «нуля», а от физиологически обоснованной точки отсчета –  $b$  и  $d$ . Этот вывод перекликается с используемым в различных работах понятием «периода биологической активности» (Тейт, 1991). Напомним, что продолжительность периода биологической активности определяется как длительность периода, в течение которого температура воздуха устойчиво превышает  $10^\circ$  по Цельсию (по физическому смыслу близко к понятию, отражаемому в нашей модели коэффициентом  $d$ ), а запас продуктивной влаги составляет не менее 1–2% (близко к понятию, отражаемому коэффициентом  $b$ ).

Уравнение (13) можно назвать уравнением состояния почв, поскольку оно связывает между собой параметры, характеризующие внутренние свойства почвенного субстрата ( $a$ ,  $c$ ), внешние условия формирования почв ( $R$ ,  $P$ ), граничные условия ( $b$ ,  $d$ ) и специфическую реакцию *каждого отдельного* почвенно-климатического ареала на внешние факторы ( $\alpha$ ,  $\beta$ ). Очевидно, что оно учитывает гораздо более богатые и тонкие взаимосвязи между почвенно-климатическими характеристиками, чем традиционные гидротермические коэффициенты. Приведём рассчитанные нами коэффициенты корреляций, характеризующие эти взаимосвязи для всех ареалов, изображенных на рис. 1:

$$\begin{aligned} \text{corr}(b, d) &= 0.786; \text{corr}(b, a) = 0.712; \text{corr}(b, c) = -0.769; \\ \text{corr}(d, c) &= -0.708; \text{corr}(a, c) = -0.709 \end{aligned} \quad (14)$$

Видно, что они достаточно высоки, особенно для нормативов, традиционных для почвоведения, и, по существу, утверждают необходимость учитывать одновременно все факторы – внешние и внутренние. Следует критически отнестись к высоким значениям этих корреляций, так как их значения почти целиком зависят от принятой модели испарения почвенной влаги. В модели Волобуева, рассмотренной в настоящей работе, это уравнение (10). Для ранее рассмотренной нами модели Будыко (Чичулин, 2020) эти коэффициенты близки к 1, но с нашей точки зрения, это свидетельствует не о тесной взаимосвязи действующих факторов, а о слишком грубой идеализации, принятой в этой модели. Поэтому на сегодняшний день основная проблема на пути введения структурно-функциональной модели в практику почвоведов, это как можно более точное экспериментальное изучение функции  $E(R, P)$ .

## ВЫВОДЫ

1. «Картины мира», подразумеваемые традиционными гидротермическими коэффициентами, страдают односторонностью. Эти коэффициенты рассматривают *все* почвы как количественно подобные друг другу, причём радиационный индекс сухости Будыко за образец сравнения берёт аридные почвы (пески пустынь), а коэффициент увлажнения Высоцкого-Иванова – гумидные (краснозёмы). Причина такой односторонности заключается в том, что традиционные коэффициенты учитывают только климатические характеристики. Они не учитывают *реакцию почвенного субстрата* на внешние факторы. Математически это выражается в том, что системы координат, в которых применяются эти коэффициенты, являются декартовыми.

Эту проблему решает физико-теоретическая по форме и структурно-функциональная по сути модель, описанная в настоящей работе. «Картина мира», на которую она опирается, учитывает как количественное подобие почв, так и их качественное отличие друг от друга. При этом каждая почва обладает (разные почвы в разной степени) признаками как аридных, так и гумидных почв. По аналогии с квантово-волновым дуализмом можно говорить, что все почвы в модели подчиняются аридно-гумидному дуализму. Система координат для структурно-функциональной модели образована коэффициентами полноты использования почвами радиационного баланса и осадков, рассчитываемых их гиперболической функцией испарения почвенной влаги.

Законы аффинного подобия определяют класс почвенных систем, для которых уравнение состояния имеет вид (13). Замечательно, что в этот класс систем попадают все почвенно-климатические ареалы, для которых индивидуальные свойства различаются очень сильно – от аридных до гумидных. Следовательно, можно утверждать, что законы аффинного подобия представляют собой проявление некоторого глубокого свойства почвообразовательных процессов.

Специфика каждого почвообразовательного процесса (почвенного субстрата) опосредованно учитывается в уравнении состояния почв (13) через два масштабных фактора  $E^\alpha$  и  $E^\beta$ . После определения новых, структурно-функциональных переменных (с точки зрения теории

подобия они называются обобщенными переменными), феноменологическое уравнение состояния становится одинаковым (ковариантным) для всех почв с учётом граничных условий  $b$  и  $d$ , а также внутренних свойств почвенного субстрата  $\alpha$  и  $\beta$ .

2. Физический смысл новых переменных (11) заключается в том, что они представляют собой полноту использования конкретной почвой поступающих радиационной энергии и осадков. Разработанная модель, учитывая более полную, по сравнению с традиционными гидротермическими коэффициентами, связь испарения почвенной влаги  $E$  ( $R$ ,  $P$ ) с внешними факторами – радиационным балансом  $R$  и осадками  $P$ , устанавливает новые взаимосвязи между параметрами, характеризующими внешние климатические условия формирования почв и внутренние свойства почвенного субстрата. Коэффициенты корреляций этих взаимосвязей лежат в диапазоне от 0,7 до 0,8 (14).

3. Физико-теоретическая модель предсказывает новые результаты. Заменой переменных (5, 6) на (11) она переводит исходные почвенно-климатические ареалы, изображенные на рисунке 1, в результирующие ареалы, изображенные на рисунке 3. Видно, что в новом изображении каждый почвенный ареал не только стягивается в кривую, описываемую универсальным феноменологическим уравнением (13), но и все вместе они закономерно группируются, образуя новые структурно-функциональные закономерности – радиальные, тангенциальные и центр симметрии. Кроме этого, через коэффициент корреляции оказывается доступна определённая информация и о внутренней структуре каждого почвенно-климатического ареала.

4. Для современного периода развития генетического почвоведения существенно не просто найти эмпирические законы взаимосвязи почвенных феноменов в соответствии с «парадигмой» И.П. Герасимова – факторы → процессы → свойства, но крайне важно найти *законы перехода* от законов известных (синонимы – простых, физических) к законам более глубоким и общим (синоним – почвенным). Сделать это можно только развивая иерархию математических моделей на основе физико-теоретических методов и сопоставляя их с существующими эмпирическими методами.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Со времен работ В.В. Докучаева, потребность в *интеграции* знаний о факторах почвообразования, *взаимодействующих* как между собой, так и с почвенным покровом, считается основным мотивом развития генетического почвоведения как фундаментальной науки. Однако удовлетворение этой потребности во многих случаях ограничивают лишь чисто внешним перечислением различных результатов, которые при этом сохраняют свою внутреннюю концептуальную обособленность (традиционные гидротермические коэффициенты). Не ставя под сомнение методологическую и методическую оправданность такой формы интеграции знаний как промежуточной стадии развития почвоведения, подчеркнем, что при этом достигается лишь организационное, но не концептуальное единство. Вариант концептуальной интеграции знаний, представленный в настоящей работе, который можно определить как объединение физико-теоретического и системного (в форме теории аффинного подобия) подходов, более полно и последовательно реализует основную идею В.В. Докучаева о взаимодействующих факторах.

#### БЛАГОДАРНОСТИ

Автор признателен к.б.н. Чумбаеву А.С. и Филимоновой Д.А. за техническую помощь в подготовке статьи к печати.

#### ФИНАНСОВАЯ ПОДДЕРЖКА

Работа выполнена по государственному заданию Института почвоведения и агрохимии (ИПА) СО РАН при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (проект № 121031700316-9).

#### ЛИТЕРАТУРА

- Акчурин И.А. Единство естественно-научного знания. Москва: Наука, 1974. 208 с.
- Возможности современных и будущих фундаментальных исследований в почвоведении. Москва: ГЕОС, 2000. 138 с.
- Волобуев В.Р. Почвы и климат. Баку: Изд. Акад. Наук Азерб. ССР, 1953. 320 с.
- Волобуев В.Р. Система почв мира. Баку: ЭЛМ, 1973. 308 с.

- Волобуев В.Р. Введение в энергетику почвообразования. Москва: Наука, 1974. 128 с.
- Герасимов И.П. Учение В. В. Докучаева и современность. Москва: Мысль, 1986. 124 с.
- Гухман А.А. Введение в теорию подобия. Москва: Высшая школа, 1973. 296 с.
- Губарев Д.И., Левицкая Н.Г., Деревягин С.С. Влияние изменений климата на деградацию почв в аридных зонах Поволжья // Аридные экосистемы. 2022. Т. 28. № 1 (90). С. 20–27. DOI: <https://doi.org/10.24412/1993-3916-2022-1-20-27>.
- Добровольский Г.В., Урусевская И.С. География почв. Москва: Изд-во МГУ, 2004, 460 с.
- Добровольский Г.В. Философские аспекты генетического почвоведения. Избранные труды по почвоведению Т.1. Общие вопросы теории и развития почвоведения. Москва: Изд-во МГУ, 2005. С. 66–83.
- Дышлевый П.С. Эволюция «принципов описания» в физическом познании. Москва: Наука, 1976. С. 91–117.
- Иенни Г. Факторы почвообразования. Перевод с английского. Москва: Гос. изд-во иностранной литературы, 1948. 348 с.
- Илларионов С.В. Дискуссия Эйнштейна и Бора. Эйнштейн и философские проблемы физики XX века. Москва: Наука, 1979. С. 465–483.
- Казеев К.Ш., Козунь Ю.С., Самохвалова Л.С., Колесников С.И. Влияние аридности и континентальности климата на биологические свойства почв в трансекте Ростов-на-Дону – Астрахань // Известия Российской академии наук. Серия географическая. 2015. № 5. С. 46–53. DOI: <https://doi.org/10.15356/0373-2444-2015-5-46-53>.
- Овчинников Н.Ф. Тенденция к единству науки. Москва: Наука, 1988. 272 с.
- Пайс А. Научная деятельность и жизнь Альберта Эйнштейна. Москва: Наука, 1989. 568 с.
- Реймерс Н.Ф. Природопользование. Словарь-справочник. Москва: Мысль, 1990. 637 с.
- Соколов Д.А. Диверсификация почвообразования на отвалах угольных месторождений Сибири. Автореферат диссертации ... д-р биол. наук. Новосибирск, 2019. 45 с.
- Соколов И.А. Теоретические проблемы генетического почвоведения. Новосибирск: «Гуманитарные технологии», 2004. 288 с.
- Тейт Р.Л.Ш. Органическое вещество почвы. Биологические и экологические аспекты. Пер. с англ. Москва: Мир, 1991. 398 с.
- Фролов И. Т. Избранные труды. Т. 1: Жизнь и познание. Москва: Наука, 2002. 463 с.
- Чичулин А.В. Методологический анализ понятийного аппарата в экологии почв // Почвы и окружающая среда. 2019. Т. 2. № 3. е89. DOI: <https://doi.org/10.31251/pos.v2i3.89>.
- Чичулин А.В. Физико-теоретические основы мезоскопического подхода к изучению почвенно-климатических закономерностей // Почвы и окружающая среда. 2020. Т. 3. № 2. е116. DOI: <https://doi.org/10.31251/pos.v3i2.116>.
- Эйнштейн А., Инфельд Л. Эволюция физики. Развитие идей от первоначальных понятий до теории относительности и квантов. Перевод с английского. Москва: Наука, 1965. 328 с.

*Поступила в редакцию 13.11.2023*

*Принята 30.12.2023*

*Опубликована 30.12.2023*

#### **Сведения об авторе:**

**Чичулин Александр Валентинович** – кандидат биологических наук, старший научный сотрудник лаборатории почвенно-физических процессов ФГБУН Институт почвоведения и агрохимии СО РАН (г. 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/)

## THE POSSIBILITY OF PHYSICO-THEORETICAL METHODS IN SOIL ECOLOGY (USING THE MODELLING OF SOIL-CLIMATIC AREAS STRUCTURE)

© 2023 A. V. Chichulin 

*Institute of Soil Science and Agrochemistry, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,  
Lavrentieva 8/2, Novosibirsk, Russia. E-mail: [chichulin@issa-siberia.ru](mailto:chichulin@issa-siberia.ru)*

**The aim of the study** was to consider the possibilities of up-to-date physical and theoretical methods for solving problems of soil ecology related to the mathematical description of the regularities of the systemic organization of soil-climatic areas according to hydrothermal factors of the environment.

**Methods.** Methodological analysis of the idealizations, hypotheses and concepts was used alongside with mathematical modeling.

**Results.** Methodological analysis of the assumptions underlying the quantitative determination of the two traditional hydrothermal coefficients (the radiation index of dryness,  $R/LP$ , and the moisture coefficient,  $P/E_0$ ) justifies their attribution to the marginal (boundary) soil conditions, determined mainly by climatic characteristics. From the physico-theoretical (quantitative) point of view, this is one of the reasons for their limited applicability when considering soil and ecological problems related to the quantitative description of the relationship between the types of soil thermal and water regimes and the general climatic patterns of their distribution on the earth's surface.

Based on the fundamental principle of affine similarity (a variety of the general principle of symmetry), the article suggests the new generalized variables  $R/E^\alpha$  and  $P/E^\beta$ . In these variables soil moisture evaporation  $E(R,P)$ , determined for the entire range of the average long-term climatic characteristics of  $R$  (radiation balance) and  $P$  (precipitation), acts as a general reference system. The specificity of the hydrothermal response of the soil substrate is determined by the corresponding structural and functional indices of similarity  $\alpha$  and  $\beta$ . The physical meaning of the new variables is that they characterize the totality of radiation energy ( $\alpha$ ) and precipitation ( $\beta$ ) use by specific soil-forming process.

**Conclusions.** A mathematical model, based on the functional association between the generalized variables, enables predicting new structural and functional regularities (radial and tangential) in the system of soil-climatic areas. In comparison with the climatic hydro- and thermoserries proposed by V. R. Volobuev, these regularities better describe the experimental data.

**Key words:** symmetry; system organization of areas; soil similarity indices; discrete soil spectrum; arid-humid dualism of soils.

**How to cite:** Chichulin A. V. The possibility of physico-theoretical methods in soil ecology (the case of modeling soil-climatic areas structure) // *Journal of Soils and Environment*. 2023. 6(4). e229. DOI: [10.31251/pos.v6i4.229](https://doi.org/10.31251/pos.v6i4.229). (in Russian with English abstract).

### ACKNOWLEDGEMENTS

The author is grateful to Ph.D. Chumbaev A.S. and Filimonova D.A. for technical assistance in preparing the article for publication

### FUNDING

The study was financially supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, project No. 121031700316-9.

### REFERENCES

- Akchurin I.A. Unity of Natural Science Knowledge. Moscow, Nauka Publ., 1974. 208 p. (in Russian).  
Possibilities of current and future fundamental research in soil science. Moscow: GEOS Publ., 2000. 138 p. (in Russian).  
Volobuev V.R. Soils and Climate. Baku: Acad. Sci. Azeri. SSR, 1953. 320 p. (in Russian).  
Volobuev V.R. Soil system of the world. Baku: ELM, 1973. 308 p. (in Russian).  
Volobuev V.R. Introduction to the Energy of Soil Formation. Moscow: Nauka Publ., 1974. 128 p. (in Russian).  
Gerasimov I.P. Teaching of V.V. Dokuchaev and modernity. Moscow: Mysl Publ., 1986. 124 p. (in Russian).  
Gukhman A.A. Introduction to the Similarity Theory. Moscow: Vysshaya shkola Publ., 1973. 296 p. (in Russian).



- Gubarev D.I., Levitskaya N.G., Derevyagin S.S. Influence of climate changes on soil degradation in arid zones of the Volga region. *Arid Ecosystems*. 2022. Vol. 12. No. 1. P. 15–21. DOI: <https://doi.org/10.1134/S2079096122010061>.
- Dobrovolskiy G.V., Urusevskaya I.S. *Geography of Soils*. Moscow: MSU Publ., 2004. 460 p. (in Russian).
- Dobrovolskii G.V. Philosophical aspects of genetic soil science. *Selected Works on Soil Science Vol.1. General Issues of Theory and Development of Soil Science*. Moscow: Moscow University Publ., 2005. P. 66–83. (in Russian).
- Dyshlevoy P.S. Evolution of "Principles of Description" in Physical Cognition. Moscow: Nauka Publ., 1976. P. 91–117. (in Russian).
- Jenny G. Factors of soil formation. Translated from English. Moscow: Gos. Foreign Literature Publishing House, 1948. 348 p. (in Russian).
- Illarionov S.V. Discussion of Einstein and Bohr. *Einstein and the Philosophical Problems of Physics in the Twentieth Century*. Moscow: Nauka Publ., 1979. P. 465–483. (in Russian).
- Kazeev K.Sh., Kozun Yu.S., Samokhvalova L.S., Kolesnikov S.I. Influence of Aridity and Continentality of Climate on Soil Biological Properties in Transect of Rostov-on-Don – Astrakhan. *Izvestiya Rossiiskoi Akademii Nauk. Seriya Geograficheskaya*. 2015. No. 5. P. 46–53. DOI: <https://doi.org/10.15356/0373-2444-2015-5-46-53>. (in Russian).
- Ovchinnikov N.F. *Tendency to the Unity of Science*. Moscow: Nauka Publ., 1988. 272 p. (in Russian).
- Pais A. *Scientific Activity and Life of Albert Einstein*. Moscow: Nauka Publ., 1989. 568 p. (in Russian).
- Reimers N.F. *Natural Resource Management*. Dictionary-reference book. Moscow: Mysl Publ., 1990. 637 p. (in Russian).
- Sokolov D.A. Diversification of Soil Formation on Dumps of Coal Deposits in Siberia. *Abstract of Dissertation ... Dr. of Biol. Sci.* Novosibirsk, 2019. 45 p. (in Russian).
- Sokolov I.A. *Theoretical Problems of Genetic Soil Science*. Novosibirsk: Humanitarian Technologies, 2004. 288 p. (in Russian).
- Tate R.L.III. *Soil organic matter. Biological and ecological effects*. N.Y. Chichester: John Wiley & Sons, 1987. 291 p.
- Frolov I.T. *Selected works. Vol.1: Life and Knowledge*. Moscow: Nauka Publ., 2002. 463 p. (in Russian).
- Chichulin A.V. Methodological analysis of the conceptual apparatus in the ecology of soils. *The Journal of Soils and Environment*. 2019. Vol. 2. No. 3. e89. DOI: <https://doi.org/10.31251/pos.v2i3.89>. (in Russian).
- Chichulin A. V. Physical and theoretical foundations of mezosopic approach to the study of soil and climatic patterns. *The Journal of Soils and Environment*. 2020. Vol. 3. No. 2. e116. DOI: <https://doi.org/10.31251/pos.v3i2.116>. (in Russian).
- Einstein A., Infeld L. *Evolution of Physics. The development of ideas from initial concepts to the theory of relativity and quanta*. Translated from English. Moscow: Nauka Publ., 1965. 328 p. (in Russian).

*Received 13 November 2023*

*Accepted 30 December 2023*

*Published 30 December 2023*

#### **About the author:**

**Chichulin Alexander Valentinovich** – 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/)