



ПОЧВЕННЫЙ РАСТВОР И МЕТОДЫ ЕГО ИЗУЧЕНИЯ

© 2020 В.В. Попов

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

Рассмотрены основные категории почвенной влаги: плёночная, капиллярная, гравитационная; дана их краткая характеристика. Представлен обзор методов, применяемых для изучения жидкой фазы почв: водные вытяжки и почвенные пасты, вытеснение почвенного раствора замещающей жидкостью, отпрессовывание, центрифугирование, лизиметрия, измерения жидкой фазы почв in situ. Обсуждены их основные достоинства и недостатки.

Ключевые слова: жидкая фаза почвы; поровый раствор; пленочная вода; капиллярная вода; гравитационная вода

Цитирование: Попов В.В. Почвенный раствор и методы его изучения // Почвы и окружающая среда. 2020. Том 3. № 1. e103. doi: 10.31251/pos.v3i1.106

Среди природных вод почвенные растворы имеют огромное значение в почвенных процессах и в жизни растений. Являясь связующим звеном между твёрдыми частицами почвы и корнями, почвенные растворы снабжают растения питательными элементами. Вместе с тем по сей день существует неоднозначность в толковании термина «почвенный раствор» и под ним чаще всего понимают совокупность форм воды в почве. Учебник по почвоведению (Почвоведение, 1988) определяет почвенный раствор «как жидкую фазу почв, включающую почвенную воду, содержащую растворенные соли, органоминеральные и органические соединения, газы и тончайшие коллоидные золи». По Д.С. Орлову (1985), «почвенный раствор – это жидкая часть почвы в природных условиях». Подобного взгляда придерживается А.Е. Возбуждая (1968), которая считает термины «жидкая фаза почвы» и «почвенный раствор» синонимичными. Согласно словарю «Биосфера: загрязнение, деградация, охрана» (Орлов и др., 2005), «почвенный раствор – это раствор химических веществ в воде, находящийся в квазиравновесии с твёрдыми и газообразными фазами почвы и частично или полностью заполняющий ее поровое пространство».

Все эти определения нельзя считать строгими, поскольку остается неясным, какие формы воды могут быть отнесены к почвенному раствору. Относить ли прочносвязанную и гравитационную влагу к почвенному раствору? Данный вопрос весьма важен, так как от терминологического предпочтения зависит выбор исследователем метода изучения жидкой фазы почв и, соответственно, полученные данные, с которыми он будет работать.

Кроме того необходимо отметить, что как в почвоведении, так и в смежных науках о Земле есть близкий по значению термин «поровые растворы» («pore water» или «interstitial water»), их, как правило, подразделяют на почвенные и подпочвенные растворы¹ (Сухоробный, 2013). Поэтому термин «поровые растворы» в пределах почвенного профиля часто используется как синоним термина «почвенные растворы», что вносит дополнительную путаницу. Для ясности в данном вопросе ниже будет дано краткое описание жидкой фазы почвы и её составляющих.

В истории почвоведения много разработанных классификаций форм почвенной влаги. А.А. Роде (1965) выделил несколько основных её категорий, отмечая при этом условность границ между ними: твёрдая; парообразная; химически связанная; физически прочносвязанная (гигроскопическая) и рыхлосвязанная (плёночная); свободная (капиллярная и гравитационная). По мнению В.В. Снакина с соавторами (Снакин и др., 1997), к жидкой фазе почвы непосредственное отношение имеют только три из них: плёночная, капиллярная и гравитационная (рис. 1). М. Бонито (Bonito, 2005) предложил аналогичную классификацию, соотнеся эти формы почвенной воды с радиусом действия сил, которые их удерживают. Область плёночной (сорбированной) воды находится на расстоянии менее 0,2 мкм от твёрдых частиц; капиллярной – от 0,2 до 60 мкм; гравитационной – более 60 мкм.

¹Более дробную классификацию поровых растворов предложил П.А. Крюков (1971), разделив их на «горные», «почвенные» и «иловые растворы»

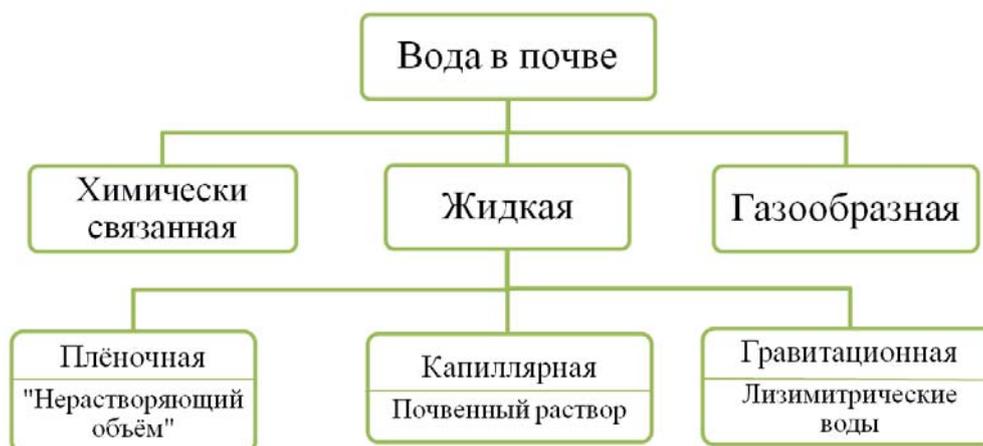


Рисунок 1. Формы почвенной влаги.

Плёночная вода, часто называемая физически связанной или адсорбированной влагой, малоподвижна, стабильна, недоступна растениям, обладает особыми физическими свойствами и, следовательно, имеет концентрацию и состав, отличные от таковых в почвенных растворах. Она заполняет поры малого диаметра и практически не участвует в капиллярном и гравитационном передвижении влаги (Трофимов, Караванова, 2009). Для отделения этой влаги от твёрдой фазы почвы необходимо очень высокое давление, доступное только методам центрифугирования и отпрессовывания. Но даже этими методами полностью выделить плёночную влагу не представляется возможным (Тимофеева, 2010). В частности, неотжимаемая влага (при 20000 атм.) для сфагнового мха составляет не менее 50 % (Крюков, 1947).

С адсорбированной водой часто связывают такие термины, как «нерастворяющийся объём» и «отрицательная адсорбция ионов», развитые в научных трудах Трофимова (Снакин и др., 1997). Основой этих терминов является представление о том, что вода вблизи поверхности твёрдых частиц подвержена непосредственному воздействию адсорбционных сил и поверхностного заряда, вследствие чего происходят существенные изменения свойств воды. В.В. Снакин с соавторами предполагают, что «правильнее объяснить явление нерастворяющегося объёма не столько электростатическим отталкиванием анионов от почвенных коллоидов (которое, несомненно, имеет место), сколько тем фактом, что вода вокруг твёрдых частиц обладает иной структурой, следовательно, и иными свойствами» (Снакин и др., 1997). Эти иные (аномальные) свойства относятся к таким характеристикам, как растворяющая способность, вязкость, плотность, температуропроводность, диэлектрическая проницаемость (Снакин и др., 1997; Трофимов, Караванова, 2009). Имеются сведения (Долгов, 1943; Полубесова, Понизовский, 1987; Снакин и др., 1997) о том, что плёночная влага является своеобразным почвенным буфером от воздействия внешних факторов. Например, при увеличении концентрации часть солей переходит в капиллярную форму влаги, что препятствует увеличению концентрации, и наоборот. При иссушении почвы часть связанной воды также переходит в капиллярную воду и наоборот.

Таким образом, плёночная вода, находясь в порах малого диаметра, малоподвижна, недоступна растениям и обладает особыми физическими свойствами, что делает эту категорию влаги менее информативной для изучения почвы.

Капиллярная, поровая или свободная (по терминологии разных авторов) вода в наибольшей степени доступна растениям и является основной частью жидкой фазы почв (Снакин и др., 1997; Тимофеева, 2010). Она более стабильна и близка к квазиравновесному состоянию, чем гравитационная вода, и, следовательно, более информативна для изучения специфических свойств соответствующих почвенных горизонтов. В капиллярной воде протекает большинство процессов растворения и преобразования химических веществ, откуда они поступают в растения. Она также представляет собой основную среду обитания почвенных бактерий и архей. Чаще всего исследователи именно с этой формой влаги связывают понятие почвенного раствора (Раудина, 2015). Для отделения капиллярной влаги от твёрдой фазы почвы подходит большинство известных методов.

Важно добавить, что капиллярная влага, заполняющая поры разного размера, отличается по составу и концентрации. В целом, влага более крупных пор имеет меньшую минерализацию, чем влага мелких пор (Платонова, Шмыглая, 1986, Зайцева и др., 1997). Однако в мелких порах

относительное содержание отдельных химических элементов может быть заметно ниже, чем в крупных (Зайцева и др., 1996, Тимофеева, 2010).

В известных работах П.А. Крюкова и Н.А. Комаровой (Крюков, Комарова, 1954; Крюков, Комарова, 1956) проведены подробные исследования данных свойств и установлено, что естественная неоднородность раствора находится в зависимости от свойств поверхности твёрдых частиц, главным образом, от их гидрофильности, а так же от концентрации электролита. Чем ниже гидрофильность твёрдых частиц и выше минерализация почвенного раствора, тем менее выражена его неоднородность. Так для монтмориллонитовых глин неоднородность состава раствора практически не наблюдалась.

Гравитационная вода перемещается в почвенном профиле под действием силы тяжести и менее всего подвержена влиянию твёрдой фазы почвы. Она носит временный характер для почв нормального увлажнения (во время весеннего снеготаяния, осадков или полива). С гравитационной влагой часто связывают лизиметрические воды, изучение которых весьма интересно с точки зрения перемещения веществ в почвенной толще (Снакин и др., 1997; Шеин, Девин, 2007; El-Farhane et al., 2000; Bunde et al., 2001). Известно, что до 73 % поступившей влаги передвигается по порам крупнее 1 мм и что большая часть воды (после дождя), перемещаясь по почве, не взаимодействует с почвенными частицами (Шеин, 2005).

Хотя капиллярные и гравитационные воды по составу генетически близки, тем не менее есть различия, обусловленные следующими причинами: во-первых, отсутствует некоторое равновесие между гравитационной влагой и твёрдой фазой почвы в силу их временного характера; во-вторых, лизиметрические воды весьма подвержены влиянию выпавших осадков (Снакин и др., 1997). В большинстве случаев эта форма влаги менее концентрирована, чем капиллярная, однако есть исключения. Исследователи отмечают в гравитационной влаге, в отличие от почвенных растворов, более высокое содержание гидрокарбонат-иона (Самойлова, Демкин, 1976), калия и углерода (Евдокимова, Первова, 1977), а также повышенный уровень pH, особенно в летне-осенний период (Снакин и др., 1997). На различия в химическом составе капиллярных и лизиметрических вод влияют погодно-климатические условия, сезон наблюдений, тип почвы (Тимофеева, 2010), потребность растений в определенных химических элементах (Белоусова, 1974), а также физическая и химическая гетерогенность порового пространства (Тимофеева, 2010). Так, в почвах лёгкого механического состава и низкой ёмкости поглощения наблюдается сходство в составе капиллярной и гравитационной влаги (Евдокимова, Первова, 1977).

Говоря о методах изучения почвенных растворов, необходимо отметить наличие немалых теоритических и методологических трудностей. И основная трудность, высказанная ещё К.К. Гедройцем, состоит в том, что «все попытки выделить неизменный почвенный раствор из почвы при сравнительно малом проценте её влажности останутся бесплодными, так как без применения значительного усилия это невозможно: жидкость в почве удерживается молекулярными силами, достигающими значительной величины» (Гедройц, 1955, с. 11). Тем не менее в настоящее время эти трудности во многом преодолены и сочетание существующих методов дает возможность получить почвенный раствор из любой почвы.

Первая попытка прямого отделения почвенного раствора была осуществлена Соссюром ещё в 1804 году. Т. Шлезинг в 1866 году предложил вытеснить почвенный раствор жидкостью и в качестве вытеснителя использовал воду (Комарова, 1956). Недостаточная полнота вытеснения, а так же невозможность точного определения границ вытекающего почвенного раствора способствовали поиску другого вытеснителя, в роли которого В.И. Ищерековым был рекомендован этиловый спирт. В дальнейшем методика вытеснения почвенного раствора этиловым спиртом была модифицирована Н.А. Комаровой (1956).

На сегодняшний день для изучения жидкой фазы почв применяют различные методы, которые условно можно поделить на четыре группы и классифицировать следующим образом:

- 1) методы имитации почвенного раствора (приготовление водных вытяжек и почвенных паст);
- 2) выделение раствора из почв в сравнительно неизменном виде (вытеснение жидкостью, центрифугирование, опрессовывание, вытеснение давлением инертного газа);
- 3) лизиметрические методы;
- 4) непосредственные полевые измерения жидкой фазы почв (ионометрия, кондуктометрия).

Методы первой группы являются исторически самыми ранними. Метод водной вытяжки был описан И.И. Комовым ещё в 1788 году (цит. по: Аринушкина, 1970). Его широко стали

применять в почвенных исследованиях с конца XIX века и практически в неизменном виде применяют по сей день. Метод основан на извлечении раствора путем добавления к почве большого количества воды. Традиционно в России применяется соотношение почва:вода, равное 1:5. Данные, полученные таким путем, не дают представления об истинной концентрации солей в жидких фазах реальных почв, а лишь помогают оценить общее содержание легкорастворимых солей (Теория ... , 2006), так как происходит растворение твёрдых солей, а также интенсивно протекают реакции ионного обмена между получающимся раствором солей и катионами поглощающего комплекса почвы. В результате этих процессов ионный состав водной вытяжки деформируется настолько, что становится фактически несравнимым с составом почвенного раствора (Ковда 1946, 1947; Шаврыгин, 1947; Сеньков, 1991; Breslere et al., 1982).

В ряде других стран (в первую очередь в США) широкое применение получил метод насыщенных водой почвенных паст (saturated soil paste). Сущность метода заключается в том, что к почве добавляют наименьшее количество воды, которое позволяет получить фильтрат с помощью обычной техники (Теория ... , 2006).

Нарушение сложения почвы при подготовке образцов, высушивание и повторное увлажнение, короткое время взаимодействия почвы и влаги не отвечает реальным условиям формирования почвенных растворов (Тимофеева, 2010). Поэтому на сегодняшний день водные вытяжки используют (с рядом допущений) в основном для характеристики содержания легкорастворимых солей в почве и оценки засоления, а метод насыщенных водой почвенных паст (также с рядом допущений) позволяет оценить концентрацию солей в почвенных растворах (Теория ... , 2006).

Вторая группа методов основана на применении внешней силы к почвенному образцу для отделения жидкой фазы от твёрдых частиц (положительное или отрицательное давление, вытесняющая способность различных жидкостей). Технологически эти методы считаются самыми сложными (Смирнова, 2009; Тимофеева, 2010), но несмотря на это, получили большую популярность, так как совокупность методов этой группы позволяет выделить почвенные растворы из любой почвы. К тому же установлено, что растворы, полученные опрессовыванием, замещением спиртом и центрифугированием при естественной влажности почв, в наибольшей степени соответствуют понятию почвенного раствора (Шоба, Сеньков, 2011). Далее дана краткая характеристика каждого из этих методов.

Получение раствора вытеснением замещающей жидкостью. Как отмечено выше, впервые данный метод был предложен Шлезенгом в середине XIX века. Опыты осуществляли в цилиндрических ёмкостях, наполненных песком и почвой, а в роли вытесняющей жидкости использовали воду. Для песка были получены удовлетворительные результаты, но из почвы основная часть раствора выделилась в смеси с вытеснителем (Комарова, 1968).

Воду в качестве вытеснителя почвенного раствора применяли и в США, начиная с работ Дж. Бэрда и Дж. Мартина (Burd, Martin, 1923). А их соотечественники Конрад, Пробстинг и Маккинн, а так же Вайт и Росс технически усовершенствовали этот метод тем, что замещение раствора водой осуществляли под давлением воздуха 3,5 атм. в специальных установках (цит. по: Крюков, 1971). Существенным недостатком этого метода являлась необходимость искусственно увлажнять почвенные образцы до 75 % от полной влагоёмкости почвы.

Значительно улучшил методику вытеснения почвенных растворов замещением в 1907 году русский исследователь В.И. Ищереков, предложив в качестве вытеснителя этиловый спирт. Вытеснение проводили в стеклянной трубке, куда поверх почвы наливали спирт, который при перемещении вниз производил замещение раствора. Однако метод В.И. Ищерекова рядом учёных был встречен отрицательно, поскольку они полагали, что метод применим лишь при сильном увлажнении (Крюков, 1971). Но впоследствии Н.А. Комарова модифицировала этот метод, что дало ей возможность выделения растворов из солонцов при их естественной влажности, то есть в одном из наиболее трудных случаев получения почвенных растворов. Результаты, полученные таким образом, сходны с результатами, полученными методом отпрессовывания почвенных растворов (Кизилова, 1955; Комарова, 1968), а также лизиметрическими исследованиями тех же почв (Первова, Евдокимова, 1984). Недостатком данного метода является вероятность искажения раствора в процессе замешивания почвы с песком.

Необходимо отметить, что были попытки использовать в качестве замещающей жидкости вазелиновое масло, эпоксидную жидкость, а так же ацетон, бензин, керосин и др., которые в целом не дали положительного результата. Н.А. Комарова установила, что только диоксан более

эффективен в вытеснении растворов, чем этиловый спирт, но различие между ними мало; кроме того, применение диоксиана нежелательно в силу его токсичности (Крюков, 1971).

Выделение почвенных растворов методом центрифугирования. Первая попытка использовать центрифугирование для получения почвенных растворов имела место в самых ранних работах по исследованию почвенной влаги (Briggs, McLane, 1903). Несмотря на это, очень долгое время этот метод практически не применяли, главным образом по причине отсутствия мощных и удобных в эксплуатации центрифуг. В настоящее время данный метод выделения почвенных растворов получил широкое распространение, особенно в зарубежной практике (Gloaguene et al., 2009; Souza et al., 2013; Somavillae et al., 2017). Применение мощных центрифуг существенно расширило возможности этого метода.

К достоинствам центрифугирования относится возможность быстрого (в течение 20 минут) выделения раствора из почвенного образца даже при естественной влажности. К недостаткам – неэффективность в работе с гидрофильными объектами, такими как солонцовый горизонт, силикагель, бентонит, в силу большого процента остаточной влажности. Для исследования таких объектов необходимо предварительно смешивать почвенные образцы с кварцевым песком и вести процесс центрифугирования в течение более продолжительного времени (Комарова, 1968), что может являться причиной изменения состава почвенного раствора, как и в предыдущем методе.

Выделение раствора методом отпрессовывания. Метод прямого давления для отделения почвенного раствора кажется наиболее простым. Впервые данный метод был описан в работе Сосюра в 1804 году. Более века спустя, в 1916 году Ван Циль, а так же Раманн, Мерц и Бауер получали почвенный раствор с помощью давления гидравлического пресса. В экспериментах Ван Цилия давление не превышало 30 кг/см^2 , а Раманн, Мерц и Бауер увеличили давление до 300 кг/см^2 . Чуть позже исследователь Липман, используя метод отпрессовывания достиг давления в 3729 кг/см^2 (цит. по: Комарова, 1968).

В 1922 году М.С. Кузьмин отжимал почвенные растворы, применяя одновременно давление пресса и отсасывание. Почвенные образец помещали в специальную установку, которая позволяла, с одной стороны, оказывать давление на почву, а с другой – осуществлять отсасывание раствора. Раствор отсасывался в пористую ёмкость, находившуюся внутри сосуда с почвой. В дальнейшем эту установку не применяли ввиду сложной конструкции. Не получил дальнейшего использования и метод отжимания почвенных растворов винтовым прессом, которым пользовался Н.С. Цыганок (1940) для изучения растворов солончаковых почв.

Все перечисленные выше варианты отпрессовывания почвенных растворов в дальнейшем при исследовании почв не использовали. Чтобы сделать метод отпрессовывания доступным и широко используемым потребовалась сложная и длительная работа. Большое влияние на разработку метода оказали работы П.А. Крюкова (1941; 1947). Предложенный им метод отпрессовывания почвенных растворов лишён недостатков, встречающихся в работах его предшественников. В процессе исследований были разработаны приборы простой конструкции, позволяющие выдавливать раствор из почв, илов и горных пород при их естественной влажности. Устройство приборов (рис. 2) обеспечивало условие полной герметичности и тем самым исключало потери раствора при выделении (цит. по: Комарова, 1968).

Крюковым П.А. предложено несколько разных модификаций приборов, позволяющих проводить исследования в широком диапазоне давления от 1 до 20000 кг/см^2 . Для отделения капиллярной влаги от почвенного образца нет необходимости прибегать к столь высокому давлению; для этого достаточно давления, создаваемого гидравлическим прессом невысокой мощности, позволяющим вести работы при давлении до 1000 кг/см^2 , а именно в интервале, который обычно используют для выделения почвенных растворов.

Несмотря на то, что метод отпрессовывания является технологически сложным, он незаменим в изучении растворов почв с низкой естественной влажностью, таких как солонцы и черноземы южные (Сеньков, 2004; Славный, 2005; Сеньков, Попов, 2017; Попов, 2019).

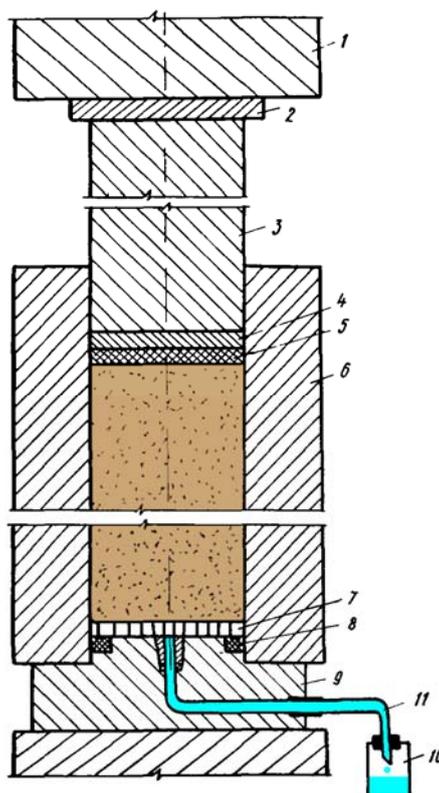


Рисунок 2. Схема для отпрессовывания почвенных растворов.

1 – площадка пресса; 2 – стальная прокладка; 3 – поршень; 4 – эбонитовый диск; 5 – резиновая прокладка; 6 – цилиндр; 7 – поршень; 8 – резиновое кольцо; 9 – поддонник; 10 – приёмник; 11 – трубка для стока раствора.

Составлено по: (Крюков, 1947).

Третья группа, так называемые лизиметрические методы, довольно широко распространена в практике почвенных и геохимических исследований (Prunieretal., 2015; Pierret et al., 2018; Chabaux et al., 2019). Лизиметры устанавливают непосредственно под каждый из генетических горизонтов почвы в естественных условиях. Существует множество конструкций, но по принципу действия лизиметры делят на два вида: гравитационные и вакуумные. Гравитационные лизиметры (рис. 3) собирают влагу, которая фильтруется сквозь почвенную толщу под действием гравитационных сил и не удерживается капиллярными силами. Однако гравитационная вода, как было сказано выше, не достигает состояния равновесия с твёрдой фазой. Поэтому исследование таких растворов представляет интерес не столько с точки зрения свойств и генетических особенностей почвы, сколько при изучении миграции веществ по почвенному профилю. Помимо этого выделяют следующие недостатки: невозможность сбора раствора при влажности почвы меньше предельно-полевой влагоёмкости; изменение водного баланса почвы вследствие установки лизиметра; возможное изменение химического состава растворов по причине длительного нахождения в пробоотборнике (Скрынникова, 1977; Тимофеева, 2010).

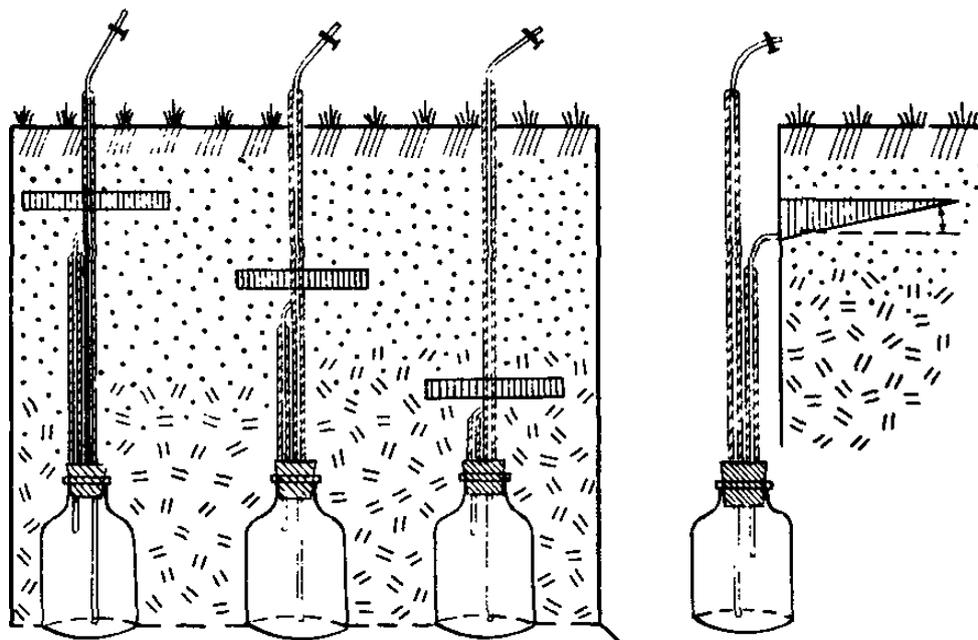


Рисунок 3. Схема устройства лизиметров конструкции Е.И. Шиловой (Почвоведение, 1988).

Вакуумный лизиметр (рис. 4) представляет собой пробоотборник в виде симметричного цилиндра, состоящий из пористого материала. В цилиндре создают отрицательное давление, и просочившийся через поры стенок почвенный раствор откачивают по силиконовым трубкам в сборник. Такие лизиметры позволяют собирать не только гравитационную, но и капиллярную влагу, которая наиболее информативна для изучения свойств почвы. Основными недостатками вакуумных лизиметров являются невозможность получения растворов в сухие летние периоды, забивание пор в процессе отбора, возможное влияние материала пробоотборника на химический состав почвенного раствора (Nagpal, 1982; Малинина, Мотузова, 1994), захват малого объема почвы и, как следствие, вероятность получить нерепрезентативные результаты (Grossmann, Udluft, 1991).

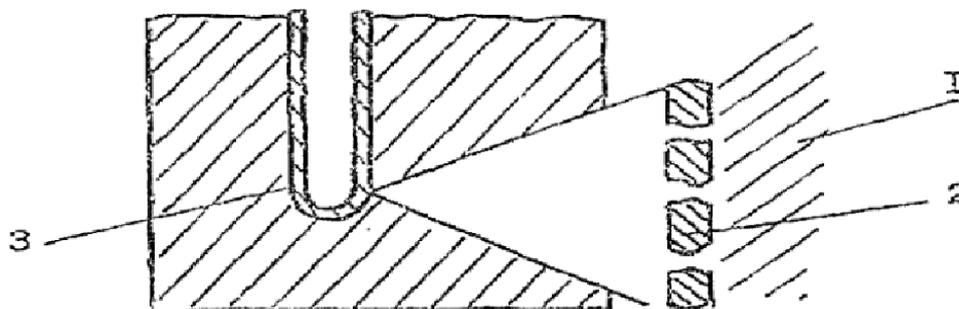


Рисунок 4. Схема отбора почвенного раствора вакуумным лизиметром: 1 – почва; 2 – стенка лизиметра; 3 – лизиметр из пористого материала (Скрынникова, 1977).

Значительный вклад в исследование жидкой фазы почв с помощью лизиметров внесли такие учёные, как Е.И. Шилова, И.Н. Скрынникова, И.С. Кауричев, И.М. Гаджиев, В.В. Пономаренко и др.

К четвёртой группе методов относятся полевые измерения жидкой фазы почв *in situ* с помощью ионоселективных электродов (рис. 5). Несмотря на то, что перед измерением *in situ* почвенный раствор, как правило, необходимо отделить от твёрдой фазы (чаще всего методами лизиметрии), данная группа методов имеет свои теоретические и методические особенности. Впервые анализ жидкой фазы почв с применением электродов для определения легкорастворимых солей в почве был описан ещё в 1897 году исследователями Whitney M. и Means T.H. (цит. по: Снакин, 1997). Однако данный метод не завоевал популярности у современников, как и метод прямого определения концентрации солей по температуре замерзания почвы, предложенный учёными Вонуносос и McCool в 1915 году (цит. по: Снакин, 1997).

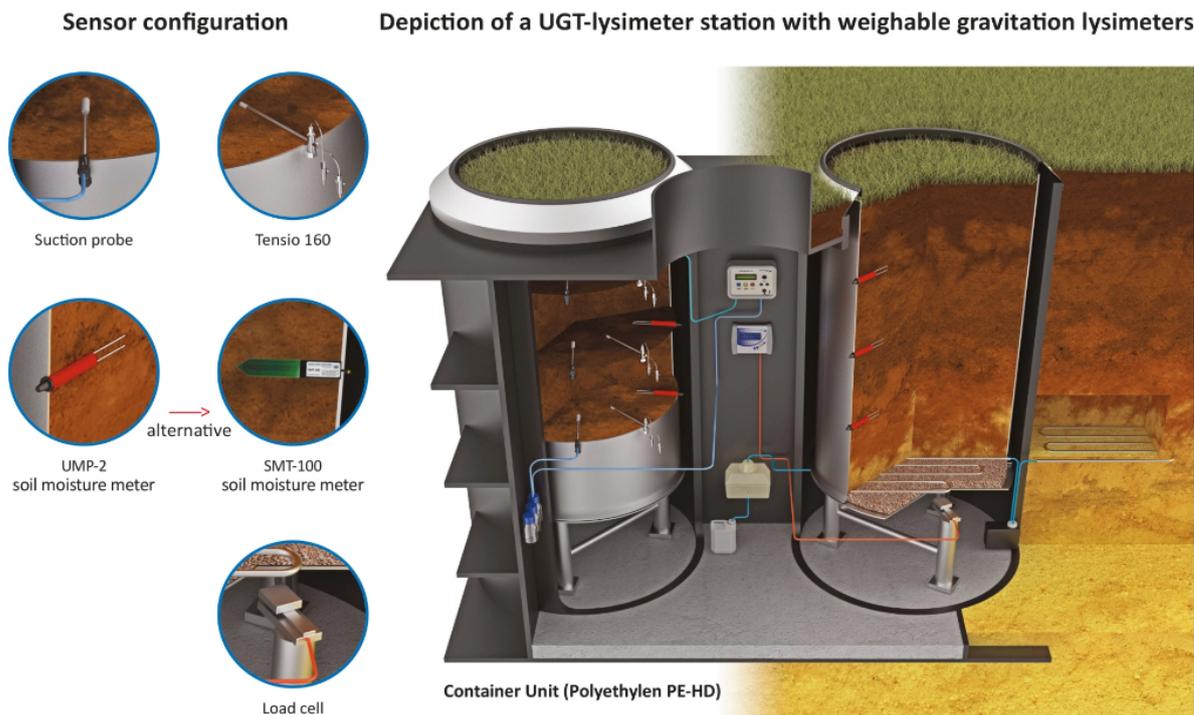


Рисунок 5. Схема лизиметрической станции с ионоселективными электродами (Источник: <https://memecosales.com/products/soil-science/lysimeters-station/>) .

Задолго до появления первого ионоселективного электрода уже определяли окислительно-восстановительный потенциал и активность ионов водорода непосредственно в почвенных суспензиях и пастах (Трофимов, 1931). С производством и развитием ионоселективных электродов стало расти число исследователей, прибегавших к ионометрии. Данный метод является самым перспективным в исследовании жидкой фазы почв. Он отличается простотой, экспрессностью, возможностью непосредственного определения ионных активностей. Вместе с тем до сих пор у метода ионометрии существует ряд недостатков, которые ещё только предстоит преодолеть. Теоритические трудности связывают (Понизовский, Киселёв, 1989) прежде всего с понятиями активности отдельных ионов, селективности ионоселективных электродов, суспензионным эффектом, а так же с влиянием влажности и газовой фазы (неполный контакт электрода с почвой) на ионометрические измерения. К методическим трудностям измерения жидкой фазы почв *in situ* в полевых условиях относят метеорологические условия, такие как низкая температура и осадки, которые могут оказаться неприемлемыми для исследований; микронеоднородность почвы, что искажает измерения; наличие в некоторых случаях существенного температурного градиента электродов, который сильно усложняет температурную компенсацию, и др. (Снакин и др., 1997).

Из краткой характеристики методов изучения почвенных растворов следует, что все имеющиеся на сегодняшний день способы имеют свои достоинства и недостатки. Выбор определенного метода обуславливается техническими возможностями и целями исследования. На наш взгляд, при учете засоленных почв и при определении общих запасов солей в почве целесообразнее использовать методы первой группы (водные вытяжки и почвенные пасты). Но в генетических и галогеохимических почвенных исследованиях, невзирая на большую трудоёмкость выделения и анализа, приоритет необходимо отдавать изучению почвенных растворов естественной влажности. При этом в почвах с низкой влажностью более подходят методы центрифугирования, отпрессовывания и вытеснения замещающей жидкостью, тогда как для остальных почв хорошо зарекомендовали себя методы лизиметрии.

При изучении почвенных растворов исследователь также должен понимать, с какой именно категорией почвенной влаги он работает. Каждая категория влаги в почве обладает специфическими особенностями, включая особенности химического состава и пространственную неоднородность почвенного раствора. Если пленочная влага является своеобразным почвенным

буфером от влияния внешних факторов, а гравитационная прежде всего отвечает за перераспределение веществ по почвенному профилю, то посредством капиллярной воды происходит большая часть процессов растворения и преобразования веществ, а так же осуществляется питание растений. По объёму, по содержанию солей и по информативности для изучения специфических свойств почвенного профиля ключевое место среди составляющих жидкой фазы почвы принадлежит капиллярной влаге.

ФИНАНСОВАЯ ПОДДЕРЖКА

Работа выполнена в рамках государственного задания ИПА СО РАН АААА-А17-117030110077-4.

ЛИТЕРАТУРА

1. Аринушкина Е.В. *Руководство по химическому анализу почв*. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1970. 487 с.
2. Белоусова Н.И. Роль миграции водорастворимых веществ, в формировании подзолистых Al-Fe-гумусовых почв (по данным лизиметрических исследований) // *Почвоведение*. 1974. № 12. С.54-70.
3. Возбуждая А.Е. *Химия почв*. М.: Высшая школа, 1968. 428 с.
4. Гедройц К.К. *Избранные труды*. М.: Наука, 1975. 650 с.
5. Долгов С.И. О связанной и капиллярной воде в почве // *Почвоведение*. 1943. № 9-10. С. 24-28.
6. Евдокимова Т.И., Первова Н.Е. Сезонная динамика состава лизиметрических вод и почвенных растворов под разными типами лесной растительности на территории Звенигородской биологической станции // *Тез. докл. V Делег. съезда Всесоюзного общества почвоведов*. Минск, 1977. Вып. 5. С. 5-6.
7. Зайцева Р.И., Минашина Н.Г., Судницын И.И. Изменение состава и концентрации растворов сульфата натрия в почвенных порах // *Почвоведение*. 1996. №7. С. 833-838.
8. Зайцева Р.И., Минашина Н.Г., Судницын И.И. Концентрация растворов хлористого натрия в порах различного размера // *Почвоведение* 1997. № 3. С. 330-335.
9. Кизилова А.А. Почвенные растворы солончаков Мугано-Сальянской степи и мелиорирование почв Северной Мугани // *Тр. Почвенного ин-та АН СССР*. 1955. Т. 43. С. 141-255.
10. Ковда В.А. *Происхождение и режим засоленных почв*. М.: Изд-во АН СССР. 1946. Т.1. 573 с.
11. Комарова Н.А. Вытеснение почвенных растворов методом замещения жидкостями и использование метода в почвенных исследованиях // *Тр. Почв. ин-та*. 1956. Т.51, вып. 5. С. 5-97.
12. Крюков П.А. *Горные, почвенные и иловые растворы*. Новосибирск: Наука. 1971. 220 с.
13. Крюков П.А. *Методы выделения почвенных растворов*. Руководство для полевых и лабораторных исследований почв. Т.4. Современные методы физико-химических исследований почв. Вып. 2. М.: Изд-во АН СССР, 1947. С. 3.
14. Крюков П.А., Комарова Н.А. Исследование растворов почв, илов и горных пород // *Докл. VI Междунар. конгр. почвоведов*. М.: Изд-во АН СССР, 1956. С. 151-169.
15. Малинина М.С., Мотузова Г.В. Методы получения почвенных растворов при почвенно-химическом мониторинге // *Физические и химические методы исследования почв*: Сб. науч. тр. / Под ред. А.Д. Воронина и Д.С. Орлова. М.: Изд-во МГУ, 1994. С. 101-129.
16. Орлов Д. С., Садовникова Л.К., Суханова Н.И., Трофимов С.Я. *Биосфера: загрязнение, деградация, охрана. Краткий толковый словарь*. Высшая школа, Москва, 2005. 125 с.
17. Орлов Д.С. *Химия почв*. М.: МГУ, 1985. 376 с.
18. Первова Н.Е., Евдокимова Т.И. Состав почвенных растворов в подзоне южной тайги // *Почвоведение*. 1984. № 1. С. 32-39.
19. Платонова. Т.К., Шмыглая Л.Н. Дифференциальная пористость и фракционный состав поровых растворов темно-каштановых почв низкой Сыртовой равнины // *Почвоведение*. 1986. № 6. С. 98-102.
20. Полубесова Т.А., Понизовский А.А. Режим и режимобразующие факторы содержания не растворяющей влаги в серой лесной почве сельскохозяйственного использования // *Комплексное изучение продуктивности агроценозов*. Пуцино: ОНТИ НЦБИ АН СССР, 1987. С. 77-85.
21. Понизовский А.А., Киселёв Г.Г. Об интерпретации результатов ионометрического анализа почв // *Почвоведение*. 1989. № 6. С. 25-38.
22. Попов В.В. *Зональные изменения почвенных растворов солонцовых почв Ишимской равнины*: диссертация на соискание учёной степени кандидата биологических наук. Новосибирск, 2019. 177 с.
23. *Почвоведение*. Учеб. для ун-тов. В 2 ч. /Под ред. В. А. Ковды, Б. Г. Розанова. Ч. 1. Почва и почвообразование / Г. Д. Белицина, В. Д. Васильевская, Л. А. Гришина и др. М.: Выш. шк., 1988. 400 с.: ил.
24. Раудина Т.В. Почвенный раствор: от классических представлений к современным понятиям // *Отражение био-, гео-, антропоферных взаимодействий в почвах и почвенном покрове*: сборник материалов V Международной научной конференции, посвященной 85-летию кафедры почвоведения и экологии почв ТГУ (7–11 сентября 2015 г., г. Томск, Россия). Томск: Издательский Дом ТГУ, 2015. С. 87-93.
25. Роде А.А. *Основы учения о почвенной влаге*. Т. 1. Водные свойства почв и передвижение почвенной влаги. М.: Наука. 1965. 664 с.

26. Самойлова Е.М., Демкин В.А. О составе различных фракций почвенного раствора // *Почвоведение*. 1976. № 11. С. 24-27.
27. Сеньков А.А. *Галогенез степных почв (на примере Ишимской равнины)*. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2004. 152 с.
28. Сеньков А.А. Ионно-солевой состав почвенных растворов и водных вытяжек // *Почвообразование и антропогенез: структурно-функциональные аспекты*. Новосибирск: Наука, 1991. С. 156-167.
29. Сеньков, А.А., Попов В.В. Генезис солевого профиля солонцовых почв юга Ишимской равнины // *Вестник НГАУ*. 2017. №1. С. 107-115.
30. Скрынникова И.Н. Методы исследования химического состава жидкой фазы почв // *Методы стационарного изучения почв*. М.: Наука 1977. С. 3-40.
31. Славный Ю.А. Эоловое соленакопление в почвах автономных ландшафтов засушливых зон // *Почвоведение*. 2005. № 4. С. 389-397.
32. Снакин В.В., Присяжная А.А., Рухович О.В. *Состав жидкой фазы почвы*. М.: РЭФИА, 1997. 146 с.
33. Сухоробный А.А. Поровые растворы зоны аэрации южных степных районов Украины // *Геологический журнал*. 2013. №4. С. 63-72. doi: [10.30836/igs.1025-6814.2013.4.139166](https://doi.org/10.30836/igs.1025-6814.2013.4.139166)
34. Теория и практика химического анализа почв. Под редакцией Л.А. Воробьевой. М.: ГЕОС, 2006. 400 с.
35. Тимофеева Е.А. *Неоднородность химического состава жидкой фазы основных типов почв ЦЛГПБЗ: Центрально-лесного государственного природного биосферного заповедника*: диссертация на соискание учёной степени кандидата биологических наук. Москва, 2010. 184 с.
36. Трофимов А.В. Реакция почвы (рН) как функция влажности и концентрации почвенного раствора // *Почвоведение*. 1931. №21. С. 5-45.
37. Трофимов С.Я., Караванова Е.И. *Жидкая фаза почв: учебное пособие по некоторым главам курса химии почв*. Москва: «Университетская книга», 2009. 111 с.
38. Шаврыгин П.И. Соотношение между почвенными растворами и водными вытяжками в засоленных почвах // *Почвоведение* 1947. № 3. С. 172-177.
39. Шейн Е.В. *Курс физики почв*. М.: МГУ, 2005. 432 с.
40. Шейн Е.В., Девин Б.А. Современные проблемы изучения коллоидного транспорта в почве // *Почвоведение* 2007. № 4. С. 438-449.
41. Шоба В.Н., Сеньков А.А. Равновесный состав и свойства растворов почв // *Почвоведение*. 2011. № 10. С.1168-1177.
42. Bonito M.D. *Trace elements in soil pore water: a comparison of sampling methods*. Theses of PhD, University of Nottingham. England, 2005. 298 p.
43. Bresler E., McNeal B. L., Carter D. L. *Saline and Sodic Soils: Principles-Dynamics-Modeling*. Springer, Berlin, Heidelberg, 1982, 236 p. doi: [10.1007/978-3-642-68324-4](https://doi.org/10.1007/978-3-642-68324-4)
44. Briggs L., McLane J. The chemistry of the soil as related to crop production // *Bur. Soils U.S. Dep. of Agric. Bull.* 1903. №22, 16.
45. Bund M., Zimmermann S., Blaser P., Hagedorn F. Sorption and transport of metals in preferential flow paths and soil matrix after the addition of wood ash // *European Journal of Soil Science*. 2001. Vol.52. № 3. P. 423-431. doi: [10.1046/j.1365-2389.2001.00405.x](https://doi.org/10.1046/j.1365-2389.2001.00405.x)
46. Burd J. S., Martin J. C. Water displacement of soils and the soil solution // *J. Agr. Sci.* 1923. №13. P. 265-295.
47. Chabaux F., Stille P., Prunier J. et al. Plant-soil-water interactions: Implications from U-Th-Ra isotope analysis in soils, soil solutions and vegetation (Strengbach CZO, France) // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 2019. Vol. 259. P.188-210. doi: [10.1016/j.gca.2019.05.045](https://doi.org/10.1016/j.gca.2019.05.045)
48. El-Farhan Y.H., Novio de N.M., Herman J.S., Hornberger G.M. Mobilization and transport of soil particles during infiltration experiments in and agricultural field. Shenandoah Valley, Virginia // *Environ. Sci. Technol.*, 2000. Vol. 34. No17. P. 3555-3559. doi: [10.1021/es991099g](https://doi.org/10.1021/es991099g)
49. Gloaguen, T.V., Pereira F.A C., Gonçalves R.A.B., Paz V.S. Sistema de extração seqüencial da solução na macro e microporosidade do solo // *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*. 2009. Vol. 13. No5. P. 544-550. (in Portuguese). doi: [10.1590/S1415-43662009000500006](https://doi.org/10.1590/S1415-43662009000500006)
50. Grossmann J., Udluft P. The extraction of soil water by the suction cup method: a review // *European journal of Soil Science*. 1991. Vol.42. No1. P. 83-93. doi: [10.1111/j.1365-2389.1991.tb00093.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.1991.tb00093.x)
51. Nagpal N.K. Comparison among and evaluation of ceramic porous cup soil water sampler for nutrient transport studies // *Canadian Journal of Soil Science*. 1982. Vol. 62. No4. P. 685-694. doi: [10.4141/cjss82-075](https://doi.org/10.4141/cjss82-075)
52. Pierret M. C., Cotel S., Ackerer P. et al. The Strengbach Catchment: a multidisciplinary environmental sentry for 30 years // *Vadose Zone Journal*. 2018. Vol.17. No1. P.1-17. doi: [10.2136/vzj2018.04.0090](https://doi.org/10.2136/vzj2018.04.0090)
53. Prunier J., Chabaux F., Stille P. et al. Geochemical and isotopic (Sr, U) monitoring of soil solutions from the Strengbach catchment (Vosges mountains, France): Evidence for recent weathering evolution // *Chem. Geol.* 2015. Vol. 417. P. 289-305. doi: [10.1016/j.chemgeo.2015.10.012](https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2015.10.012)
54. Somavilla A., Dessbesell A., Santos D. Centrifugation methodology to extract soil solution // *Scientia Agraria*. 2017. Vol. 18. No3. P. 44-47. doi: [10.5380/rsa.v18i3.52805](https://doi.org/10.5380/rsa.v18i3.52805)

55. Souza E.R., Melo H.F., Almeida B.G., Melo D.V.M. Comparação de métodos de extração da solução do solo // *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*. 2013. Vol. 17. No5. P. 510-517. doi: [10.1590/S1415-43662013000500007](https://doi.org/10.1590/S1415-43662013000500007)

Поступила в редакцию 28.02.2020

Принята 03.06.2020

Опубликована 04.06.2020

Сведения об авторах:

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

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.



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

SOIL SOLUTION AND METHODS OF ITS INVESTIGATION

© 2020 V.V. Popov

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

The article describes main categories of soil moisture (hygroscopic, capillary, and gravitational, providing their brief characteristics, and discusses the main advantages and disadvantages of the methods that are currently used to study the liquid phase of soils, such as using water extracts and saturated pastes, displacing soil solution with a substitute liquid, pressing, centrifugation, lysimetry and studying soil liquid phase in situ.

Key words: soil liquid phase; pore solution; hygroscopic water; capillary water; gravitational water

How to cite: Popov V.V. Soil solution and methods of its investigation // *The Journal of Soils and Environment*. 2020. 3(1). e106. doi: [10.31251/pos.v3i1.106](https://doi.org/10.31251/pos.v3i1.106) (in Russian with English abstract).

REFERENCES

1. Arinushkina E.V. *Manual of methods for soil chemical analysis*. Moscow: Moscow University Publishing House, 1970, 487 p. (in Russian)
2. Belousova N. I. The role of water-soluble substance migration in the formation of podzolic Al-Fe-humus soils (according to lysimetric data). *Pochvovedenie*, 1974, No12, p. 54-70. (in Russian)
3. Orlov D.S., Sadovnikova L.K., Sukhanova N.I., Trofimov S.Ya. *Biosphere: pollution, degradation, protection. Brief Explanatory Dictionary*. Moscow: Higher School Publ., 2005, 125 p. (in Russian)
4. Vozbutskaya A.E. *Soil chemistry*. Moscow: Higher School Publ., 1968, 428 p. (in Russian)
5. Gedroits K. K. *Selected Works*. Moscow: Nauka Publ., 1975, 650 p. (in Russian)
6. Dolgov S.I. About bound and capillary water in the soil. *Pochvovedenie*, 1943, No 9-10, p. 24-28. (in Russian)
7. Evdokimova T.I. Pervova N.E. Seasonal dynamics of the composition of lysimetric waters and soil solutions under different types of forest vegetation on the territory of the Zvenigorod Biological Station. In book: *Abstracts of the Vth Congress of Society of Soil Scientists of the Soviet Union, Minsk, 1977, Issue. 5, p. 5-6*. (in Russian)
8. Zaitseva R.I., Minashina N.G., Sudnitsyn I.I. Changes in the Composition and Concentration of Sodium Sulphate Solutions in Voids. *Pochvovedenie*, 1996, No7, p. 833-838. (in Russian)
9. Zaitseva R.I., Minashina N.G., Sudnitsyn I.I. Concentration of Sodium Chloride Solutions in Pores of Various Size. *Pochvovedenie*, 1997, No3, p. 284-289. (in Russian)
10. Kizilova A.A. Soil solutions of solonchaks of the Mugan-Salyan steppe and soil amelioration of Northern Mugan. In book: *Transactions of Soil Institute of the USSR Academy of Sciences, 1955, Vol. 43, p. 141-255*. (in Russian)
11. Kovda V.A. *The origin and regime of saline soils*. Moscow: Publishing House of the USSR Academy of Sciences, 1946, Vol. 1, 573 p. (in Russian)
12. Komarova N.A. The displacement of soil solutions by the method of fluid replacement and the use of the method in soil research. In book: *Transactions of Soil Institute of the USSR Academy of Sciences, 1956, Vol. 51, No. 5, p. 5-97*. (in Russian)
13. Kryukov P.A. *Mountain, soil and silt solutions*. Novosibirsk: Nauka Publ., 1971, 220 p. (in Russian)

14. Kryukov P.A. Methods for isolating soil solutions. Guide for field and laboratory soil studies. *Modern methods of physicochemical soil research*. Vol. 4. Moscow: Publishing House of the Academy of Sciences of the USSR, 1947, p. 3. (in Russian)
15. Kryukov P.A., Komarova N.A. Study of solutions of soils, silts and rocks. In book: *Reports of the VIth Intern. Congr. of Soil Scientists*. Moscow: The Academy of Sciences of the USSR Publ., 1956, p. 151-169. (in Russian)
16. Malinina M.S., Motuzova G.V. Methods of obtaining soil solutions in soil-chemical monitoring. Physical and chemical methods of soil research. In book: *Physical and chemical methods of soil research*. Collection of Scientific papers. Ed. A. D. Voronin and D. S. Orlova, Moscow: Moscow State University Publ., 1994, p. 101-129. (in Russian)
17. Orlov D. S. *Soil chemistry*. Moscow: Moscow State University Publ., 1985, 376 p. (in Russian)
18. Pervova N.E., Evdokimova T.I. The composition of soil solutions in the subzone of the southern taiga. *Pochvovedenie*, 1984, No1, P. 32-39. (in Russian)
19. Platonova T. K., Shmyglya L.N. Differential porosity and fractional composition of void solutions in the dark chestnut soils of the low Syrt plain. *Pochvovedenie*, 1986, No 6, P. 98-102. (in Russian)
20. Polubesova T.A., Ponizovsky A. A. Mode and regime-forming factors of the content of insoluble moisture in the gray forest soil of agricultural use. In book: *Comprehensive study of the productivity of agrocenoses*. Pushchino, Academy of Sciences of the USSR, 1987, p. 77-85. (in Russian)
21. Ponizovsky A.A., Kiselev G.G. On the interpretation of the results of ionometric analysis of soils. *Pochvovedenie*, 1989, No 6, P. 25-38. (in Russian)
22. Popov V.V. *Zonal changes in soil solutions of solonetz soils of the Ishim plain*. Dissertation ... Cand. of Biol. Sci. in Biology. Novosibirsk, 2019, 177 p. (in Russian)
23. *Soil Science*. Textbook for university students. Ed. V.A. Kovdy, B.G. Rozanova. Part 1. Soil and soil formation. Moscow: Higher school, 1988, 400 p. (in Russian)
24. Raudina T.V. Soil solution: from classical notions to modern concepts. // Reflection of Bio-, Geo-, and Anthropospheric interactions in soils and soil cover: a collection of materials of the Vth International Scientific Conference dedicated to the 85th anniversary of the Department of Soil Science and Soil Ecology of Tomsk State University (September 7–11, 2015, Tomsk, Russia). Tomsk: TSU Publishing House, 2015. p. 87-93. (in Russian)
25. Rode A.A. *Fundamentals of the doctrine of soil moisture. Vol. 1. Water properties of soils and soil moisture movement*. Moscow: Nauka Publ., 1965, 664 p. (in Russian)
26. Samoilova E.M., Demkin V.A. On the composition of various fractions of the soil solution. *Pochvovedenie*, 1976, No11, P. 24-27. (in Russian)
27. Senkov A.A. *Halogenesis of steppe soils (on the example of the Ishim plain)*. Novosibirsk, Publishing House of the SB RAS, 2004, 152 p. (in Russian)
28. Senkov A.A. Ion-salt composition of soil solutions and aqueous extracts. In book: *Soil formation and anthropogenesis: structural and functional aspects*. Novosibirsk, Nauka Publ., 1991, P. 156-167. (in Russian)
29. Senkov A.A., Popov V.V. Development of saline profile of solonetz soil in the south of Ishim plain. *Bulletin of NSAU (Novosibirsk State Agrarian University)*, 2017, No. 1, P. 107-115. (in Russian)
30. Skrynnikova I.N. Methods of studying the chemical composition of the liquid phase of soils. In book: *Methods of stationary study of soils*. Moscow: Nauka Publ., 1977, P. 3-40. (in Russian)
31. Slavnyi Yu. A. Eolian Accumulation of Salts in the Soils of Autonomous Landscapes of Arid Zones. *Pochvovedenie*, 2005, No4, p. 389-397. (in Russian)
32. Snakin V.V., Prisyazhnaya A.A., Rukhovich O.V. *The composition of the liquid phase of the soil*. Moscow: REFIA Publ., 1997, 146 p. (in Russian)
33. Sukhorebriy A.A. Poral aqueous solutions of the aeration zone in southern areas of the Steppe zone of Ukraine. *Geol. Journal*, 2013, No4, p. 63-72. (in Russian) doi: [10.30836/igs.1025-6814.2013.4.139166](https://doi.org/10.30836/igs.1025-6814.2013.4.139166)
34. *Theory and practice chemical analysis of soils* / Ed. Vorobyova L.F. Moscow: GEOS, 2006, 400 p. (in Russian)
35. Timofeeva E.A. *Inhomogeneity of the chemical composition of the liquid phase of the main soil types of the Central Forest State Natural Biosphere Reserve*. Dissertation ... Cand. of Biol. Sci. in Biology. Moscow, 2010, 184 p. (in Russian)
36. Trofimov A.V. Soil reaction (pH) as a function of moisture and soil solution concentration. *Pochvovedenie*, 1931, No21, p. 5-45. (in Russian)
37. Trofimov S.Ya., Karavanova E.I. *Soil Liquid Phase: A Study Guide for Some Chapters in Soil Chemistry*. Moscow: University Book Publ., 2009, 111 p. (in Russian)
38. Shavrygin P.I. The ratio between soil solutions and water extracts in saline soils. *Pochvovedenie*, 1947, No3, p. 172-177. (in Russian)
39. Shein E.V. *Soil physics course*. Moscow: Moscow State University Publ., 2005, 432 p. (in Russian)
40. Shein E.V., Devin B.A. Current Problems in the Study of Colloid Transport in Soil. *Pochvovedenie*, 2007, No4, p. 438-449. (in Russian)
41. Shoba B.N., Senkov A.A. The equilibrium composition and properties of soil solutions. *Pochvovedenie*, 2011, No10, p. 1168-1177. (in Russian)
42. Bonito M.D. *Trace elements in soil pore water: a comparison of sampling*. Methods. Theses of PhD, University of Nottingham, England 2005. 298 p.

43. Bresler E., McNeal B. L., Carter D. L. *Saline and Sodic Soils: Principles-Dynamics-Modeling*. Springer Berlin Heidelberg, 1982, 236 p. doi: [10.1007/978-3-642-68324-4](https://doi.org/10.1007/978-3-642-68324-4)
44. Briggs L., McLane J. The chemistry of the soil as related to crop production. *Bur. Soils U.S. Dep. of Agric. Bull.* 1903. No22, 16.
45. Bund M., Zimmermann S., Blaser P., Hagedorn F. Sorption and transport of metals in preferential flow paths and soil matrix after the addition of wood ash. *European Journal of Soil Science*, 2001, Vol.52, No3, p. 423-431. doi: [10.1046/j.1365-2389.2001.00405.x](https://doi.org/10.1046/j.1365-2389.2001.00405.x)
46. Burd J. S., Martin J. C. Water displacement of soils and the soil solution. *J. Agr. Sci.*, 1923, No13, p. 265-295.
47. Chabaux F., Stille P., Prunier J. et al. Plant-soil-water interactions: Implications from U-Th-Ra isotope analysis in soils, soil solutions and vegetation (Strengbach CZO, France). *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2019, Vol. 259, p.188-210. doi: [10.1016/j.gca.2019.05.045](https://doi.org/10.1016/j.gca.2019.05.045)
48. El-Farhan Y.H., Novio de N.M., Herman J.S., Hornberger G.M. Mobilization and transport of soil particles during infiltration experiments in and agricultural field. Shenandoah Valley, Virginia. *Environ. Sci. Technol.*, 2000, Vol. 34, No17, p. 3555-3559. doi: [10.1021/es991099g](https://doi.org/10.1021/es991099g)
49. Gloaguen, T.V., Pereira F.A C., Gonçalves R.A.B., Paz V.S. Sistema de extração seqüencial da solução na macro e microporosidade do solo. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 2009, Vol. 13, No5, p. 544-550 (in Portuguese). doi: [10.1590/S1415-43662009000500006](https://doi.org/10.1590/S1415-43662009000500006)
50. Grossmann J., Udluft P. The extraction of soil water by the suction cup method: a review. *European journal of Soil Science*, 1991, Vol.42, No1, p. 83-93. doi: [10.1111/j.1365-2389.1991.tb00093.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.1991.tb00093.x)
51. Nagpal N.K. Comparison among and evaluation of ceramic porous cup soil water sampler for nutrient transport studies. *Canadian Journal of Soil Science*, 1982, Vol. 62, No4, p. 685-694. doi: [10.4141/cjss82-075](https://doi.org/10.4141/cjss82-075)
52. Pierret M. C., Cotel S., Ackerer P. et al. The Strengbach Catchment: a multidisciplinary environmental sentry for 30 years. *Vadose Zone Journal*, 2018, Vol.17, No1, p.1-17. doi: [10.2136/vzj2018.04.0090](https://doi.org/10.2136/vzj2018.04.0090)
53. Prunier J., Chabaux F., Stille P. et al. Geochemical and isotopic (Sr, U) monitoring of soil solutions from the Strengbach catchment (Vosges mountains, France): Evidence for recent weathering evolution. *Chem. Geol.* 2015. Vol. 417. P. 289-305. doi: [10.1016/j.chemgeo.2015.10.012](https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2015.10.012)
54. Somavilla A., Dessbesell A., Santos D. Centrifugation methodology to extract soil solution. *Scientia Agraria*, 2017, Vol. 18, No3., p. 44-47. doi: [10.5380/rsa.v18i3.52805](https://doi.org/10.5380/rsa.v18i3.52805)
55. Souza E.R., Melo H.F., Almeida B.G., Melo D.V.M. Comparação de métodos de extração da solução do solo. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 2013, Vol. 17, No5, p. 510-517. (in Portuguese). doi: [10.1590/S1415-43662013000500007](https://doi.org/10.1590/S1415-43662013000500007)

Received 28 February 2020

Accepted 03 June 2020

Published 04 June 2020

About the author:

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

The author read and approved the final manuscript



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