

## ГРАВИТАЦИОННЫЙ ПОТОК ВЛАГИ И ЕГО РОЛЬ В ЭВОЛЮЦИИ ПОЧВ: ПРЯМЫЕ ЛИЗИМЕТРИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Рассмотрены вопросы формирования потоков гравитационной влаги в структурных текстурно-дифференцированных серых лесных и дерново-подзолистых почвах. Оценивается вклад быстрых потоков влаги в массоперенос. В длительном лизиметрическом эксперименте исследована скорость формирования влагопроводящей структуры почвы и эволюция свойств твердой фазы почвы – гранулометрического состава, структуры.

### Введение

Движение гравитационной влаги в почвенной толще связывают с формированием преимущественных путей переноса влаги (preferential flow), характерных для почв, как для насыщенных, так и для не насыщенных влагой. Это весьма важный момент функционирования почв и выполнения защитной экологической функции в ландшафте, т.к. возможен быстрый перенос воды и питательных или загрязняющих веществ в нижние слои почвенного профиля или за его границы. В итоге гравитационная влага может оказывать значительное влияние на распределение влаги и веществ в ландшафте, на развитие и эволюцию почв, а также на другие функции почв в биосфере.

### Постановка проблемы

Механизмы формирования гравитационной влаги связывают с различными свойствами почв [12]: с величиной межагрегатной порозности, формированием водных каналов и пальчатых структур, формированием стабильных путей фильтрации. Дмитриевым [4] были выделены несколько типов движения влаги в почвах. В частности: 1) Фильтрационный тип, когда от источника увлажнения вода продвигается сплошным фронтом, последовательно впитывающемся в почву порции воды распределяются по зонам, концентрически вложенными одна в другую. Подобный тип характерен для однородного порового пространства. В природе чаще наблюдается лишь некоторое приближение к данному типу увлажнения почвы. 2) Инфилюкционный, когда вода мигрирует по крупным порам, трещинам и карманам разного

происхождения, образуя языковатый фронт промачивания. Основой стабильности путей миграции служит пространственная неоднородность почвенной толщи. Многие исследователи указывали на доминантное значение макропор в переносе веществ в почвах [1, 3]. Возможность существования такого типа миграции воды была показана в модельных лабораторных опытах [8, 5] и полевых экспериментах [13, 4, 11, 9].

Формирующиеся преимущественные пути движения влаги представляют собой перемещение воды по «отдельным локализованным каналам». Данный тип движения влаги может выступать как характерно свойство структурных почв и формировать в течение длительного времени. Как правило, в большинстве почв, присутствуют оба типа перемещения гравитационной влаги: фильтрационный и инфилюкционный, с преобладанием в годовом цикле того или иного типа в зависимости от свойств почвенной толщи. Представляет интерес время формирования влагопроводящих путей в почвах и вклад преимущественных потоков воды в массоперенос.

Движение гравитационной влаги происходит и в мелких порах, поэтому, как правило, после быстрого движения по преимущественным путям, наблюдается ее медленное стекание. Однако, вероятно, именно инфилюкционные потоки влаги способны переносить большие объемы воды и растворенных веществ на значительные расстояния, увлекать за собой коллоидные частицы, создавая новые градиенты концентраций и увеличивая неоднородность почвенной толщи. Медленные потоки наоборот выравни-

вают и стабилизируют ситуацию. Можно предположить, что такое повторяющееся воздействие на почвенный покров находит свое отражение в структурной организации почв, в ее эволюции.

### Объекты и методы исследований

В качестве объектов исследования были выбраны почвы, характеризующиеся выраженной структурой и дифференцированностью почвенного профиля: серые лесные почвы Владимирского ополья и модельные дерново-подзолистые почвы стационарных лизиметров МГУ.

Для изучения особенностей формирования потока гравитационной влаги и исследования его вклада в массоперенос была проведена серия заливочных фильтрационных экспериментов на почвах Владимирского ополья: серых лесных и серых лесных почвах со вторым гумусовым горизонтом на покровных суглинках. Фильтрационные эксперименты проводились как для отдельных горизонтов, так и для 50-см почвенной толщи. В работе подробно будут рассмотрены результаты эксперимента, проведенного на серой лесной слабооподзоленной остаточно-карбонатной тяжелосуглинистой со следующим строением почвенного профиля: A пах (0-20 см), EB (20-30), Bhfe 30-68 (72), Вприз 68-106(110), BC (110-160 и глубже). Поверхностный горизонт Апах характеризуется комковато-глыбистой структурой, содержание органического углерода составило 1,8 %, сумма агрономически ценных агрегатов – 39%, водоустойчивость агрегатов – 29%. Горизонты EB и Вfe трещиноваты и имеют мелко ореховато-зернистую структуру, переходящую в глубоких горизонтах в ореховато-призмовидную.

Для изучения преимущественных путей движения воды использовали встроенные секционные лизиметры, позволяющие детально исследовать неоднородность фильтрации и поступления растворенных веществ на нижней границе исследуемой толщи. Размер лизиметра 5600 см<sup>2</sup>, сектора 2,5x2,5 см. В качестве меток были взяты сорбирующий-

ся калий, отрицательно сорбирующийся хлор и водорастворимый крахмал. На поверхность почвы или на поверхность нижних горизонтов после снятия верхних слоев устанавливалась рама диаметром 16-50 см, на разных глубинах в почвенную толщу встраивали лизиметр. В раму подавалась вода для насыщения почвенной толщи, а после установления постоянной скорости потока хотя бы в один из секторов лизиметра, в раму подавали 1 М раствор KCl с растворенным в нем крахмалом (2%). Поддерживался постоянный напор. В секторах лизиметров фиксировали скорость фильтрации и изменение концентрации веществ-меток. После окончания фильтрации надлизиметрическая толща послойно срезалась с шагом 5-10 см, на срезах по сетке определяли влажность, плотность, отбирались образцы. Определялось содержание ионов калия, хлора, зарисовывались морфология и контура крахмальных пятен. Определение концентраций ионов калия и хлора проводилось в водных вытяжках, калий измеряли на пламенном фотометре, хлор потенциометрически. Коэффициент активности хлора определяли по зависимости активности хлорид-иона от концентрации, определенной титрованием для всех исследуемых горизонтов почв. Для расчета сорбированного калия проводили определение изотерм сорбции.

Исследование многолетней динамики гравитационного стока и ее отражение в эволюции почв проводилось на дерново-подзолистых среднесуглинистых почвах больших стационарных лизиметров МГУ. Почвы привезены в 1961 г из Подольского района Московской области и погоризонтно помещены в лизиметры. Площадь каждого лизиметра 8 м<sup>2</sup>, глубина 1,75 м, на дне располагается песчано-гравийная смесь для осуществления дренажа, в галерее под лизиметрами производится сбор и фильтрационных вод.. Почвенные профили мощностью 150 см имитируют различные способы мелиоративной обработки почв. В работе представлены результаты исследований двух вариантов модельных почв со следующими строениями

почвенного профиля: вариант 1 – глубокий плантаж по Бушинскому  $B2_{\text{пах}}$ (0-43),  $B1(43-65)$ ,  $A2(65-80)$ ,  $A_{\text{пах(погр.)}}(80-100)$ ,  $B2(100-120)$ ,  $B3(120-150)$ ; вариант 2 – вспашка по Мосолову:  $A_{\text{пах}}(0-20)$ ,  $B1(20-45)$ ,  $A2(45-60)$ ,  $B2(60-120)$ ,  $B3(120-150)$ . Подробное описание лизиметрических установок, почв лизиметров, методов и методик исследований приведено в статьях [6, 7].

### Результаты исследований

#### Эксперименты на серых лесных почвах

Владимирского ополья показали высокую неоднородность формирующихся путей фильтрации, зависящую как от свойств отдельных горизонтов, так и от их сочетаний. Всего на поверхность почвы в представлен-

ном эксперименте было подано 12 л воды и 19 л раствора. На рис. 1 (а) представлены топоизолеты плотности, крахмальной метки и концентраций ионов хлора и калия на вертикальном срезе почвы, проведенном через середину 50-см заливочной рамы. Горизонт  $A_{\text{пах}}$  отличается низкими значениями плотности и влажности и их значительным варьированием. Наблюдается увеличение плотности с глубиной (рис. 1, а): на поверхности среднее значение плотности составляет 1,48 г/см<sup>3</sup>, а на глубине 40 см – 1,56 г/см<sup>3</sup>.

Повышенные значения плотности характерны для глубин 10 и 20 см, что, вероятно, связано с формированием подпружной подошвы в данных почвах, вовлеченных в сельскохозяйственное использование [11]. С глу-

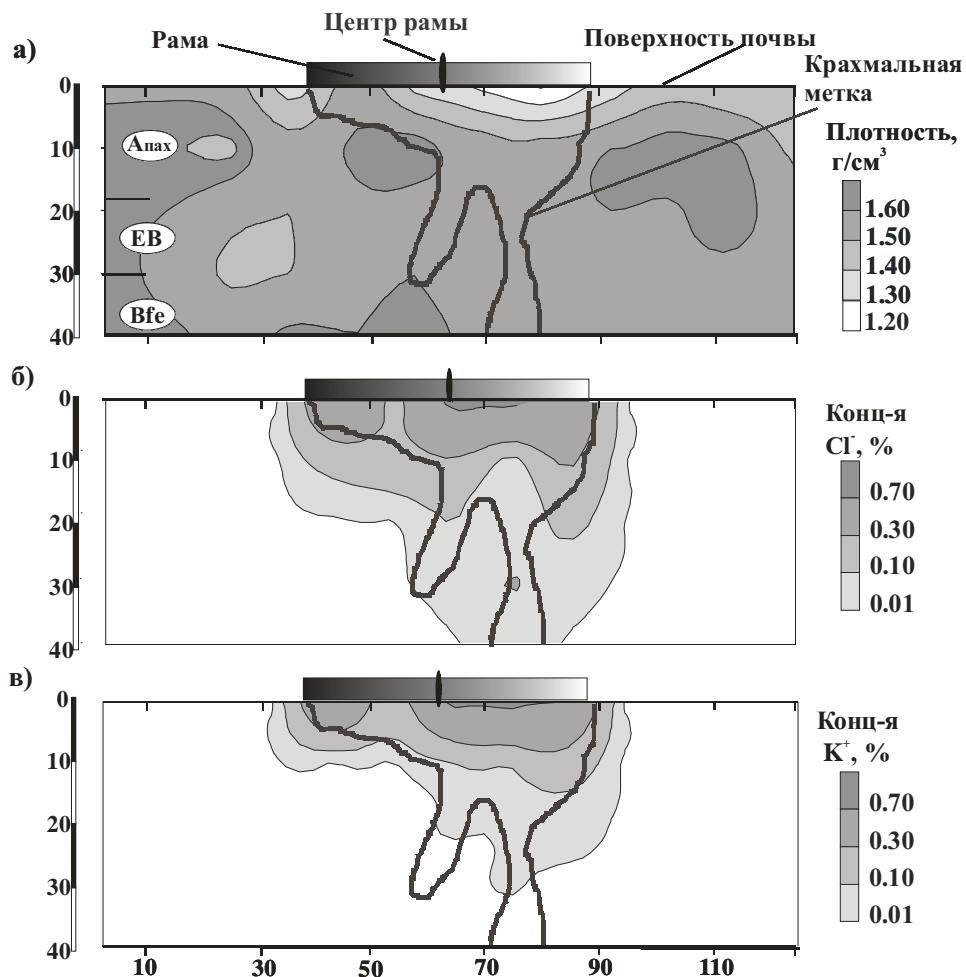


Рисунок 1. Топоизолеты плотности почвы, содержания ионов калия и распределения крахмала в серой лесной почве (вертикальный срез)

биной происходит выравнивание плотности, разброс значений снижается.

Исследования содержания веществ проводились в первые сутки после прекращения фильтрации, поэтому картины их распределения в почве обусловлены быстрым перемещением гравитационной влаги. Наблюдается постепенное снижение площади крахмальной метки с глубиной. Максимальная площадь, занятая веществом, зафиксирована на глубине 10 см, в нижней части почвенной толщи он обнаружен отдельными пятнами. Максимальные концентрации хлора и калия наблюдались на поверхности в пределах рамы – более 1%. Средние значения концентрации ионов с глубиной постепенно снижаются, причем для ионов хлора снижение постепенное, а для калия резкое, что связано с его сорбцией верхней толщей.

Нужно отметить, что формы распределения веществ на срезе в целом идентичны, отличия связаны с особенностями веществ и возможностями их конвективного перемещения в почве. Миграция крахмала определяется самыми крупными порами и каналами. Поток влаги в горизонте  $A_{\text{пах}}$  был сплошным, огибающим переуплотненный участок, а с глубины 18-20 см, т. е. в горизонтах ЕВ и В, он разделился на отдельные рукава, т.е. в подпахотных горизонтах он обнаруживается отдельными пятнами.

Движение хлорид-иона происходит преимущественно в средней части пор вследствие явления отрицательной сорбции, где скорость движения влаги максимальна, поэтому он в большей степени мигрирует по профилю и подвержен латеральному перераспределению. Хорошо сорбирующийся ион калия задерживается верхней 10 см толщиной, где его содержание достигает 65% от поступившего на поверхность, против 25 % хлорид иона.

На нижней границе исследуемого профиля проводился порционный сбор фильтрационной влаги в сектора лизиметра (рис.2). Выявлен большой разброс интенсивности стока: в 70 % секторов поступления влаги не наблюдалось, во многих наблюдались незна-

чительные количества, в нескольких секторах объемы гравитационной влаги были значительны – 500-890 мл. Концентрации ионов калия и хлора (на рис 2 б, в представлены в виде отношения концентрации фильтрата к концентрации в подаваемом на поверхность растворе) оказались высокими и близкими в тех секторах лизиметра, где скорость движения влаги составила 200-600 см/сут. Такая высокая скорость миграции сорбирующего почвой иона калия свидетельствует об инфлюкционном характере движения почвенной влаги.

Всего профильтровалось 13% от поданного на поверхность количества влаги, с которым было вынесено около 10 % калия и 11 % хлора. Столь близкие значения количеств перемещенной влаги и веществ по путям быстрой миграции на глубину 50 см дифференцированной почвенной толщи свидетельствует о значительном масштабе быстрого гравитационного тока даже в насыщенной почвенной толще.

Наши эксперименты показали, что гравитационный ток влаги по преимущественным путям осуществляется в очень небольшом объеме порового пространства, зачастую не обнаруживаемом при исследовании послойного распределения веществ. Дальнейшее передвижение веществ будет осуществляться в соответствии с градиентом потенциала почвенной влаги и градиентом концентраций.

Быстрые инфлюкционные потоки воды с растворенными веществами привели к увеличению неоднородности почвы по влажности и содержанию веществ-меток. Проведенные ранее исследования показали устойчивость подобных путей миграции [9], а значит, периодическое стекание гравитационной влаги будет закреплять неоднородность почвенной массы, одновременно увеличивая отчетливость строения влагопроводящего порового пространства.

Различные почвенные горизонты обладают разной способностью к формированию быстрых гравитационных потоков влаги. В горизонте Апах наблюдалось относительно

равномерное движение влаги, поэтому потоки веществ образуют единый контур. В горизонте В во всех заливочных экспериментах и калий, и хлор, и крахмал наблюдались лишь отдельными пятнами, даже при установке рамы на его поверхность. Таким образом для гумусового горизонта характерен фильтрационный тип движения влаги, а для иллювиального – инфилюкционный.

Неясным остались вопросы динамики гравитационных потоков влаги в почвах, их влияние на трансформацию почвенных

свойств на протяжении длительного времени. Для этого нами проводились исследования формирования потока гравитационной влаги в дифференцированных дерново-подзолистых почвах в многолетнем лизиметрическом эксперименте.

Изучение фильтрационных свойств лизиметрических почв, проводимое более 40 лет, показало, что скорость вертикального стока находится в прямой зависимости с особенностями строения почвенного профиля и структурного состояния слагающих его горизонтов. Особое значение имеет верхний горизонт, являющийся граничным и формирующим внутриводный сток, т.е. переводящим свободную поверхностную влагу осадков или поливной воды в почвенный раствор связанный или свободный. Исследовались два варианта почв, сформированных в 1961 г из одних и тех же горизонтов, но имеющих различное строение почвенного профиля: вариант 1 – с горизонтом В2 на поверхности и запаханными на глубине 70-100 см горизонтами Е и Апах, и вариант 2, в котором подзолистый горизонт запахан под иллювиальный. Т.о. в представленных почвах имелась выраженная дифференцированность профилей: в первом варианте в нижней части, а во втором в верхней части профиля.

В начале опыта почвы лизиметров представляли собой насыпные варианты, была нарушена влагопроводящая структура межагрегатного порового пространства. По опытам с насыпными образцами известно [2], что количество профильтровавшейся воды в почвах нарушенного строения меньше, чем в монолитах. Действительно, чтобы начался процесс фильтрации в насыпных почвах, необходимо их насыщение до значений выше величины наименьшей влагоемкости. В почвах с естественным сложением сквозной перенос влаги может начаться при меньших значениях влажности по устоявшимся путям преимущественного движения влаги. Для восстановления структуры порового пространства потребовалось некоторое время, и равновесный с метеорологическими условиями сток сложился к 1971-1973 гг., когда по-

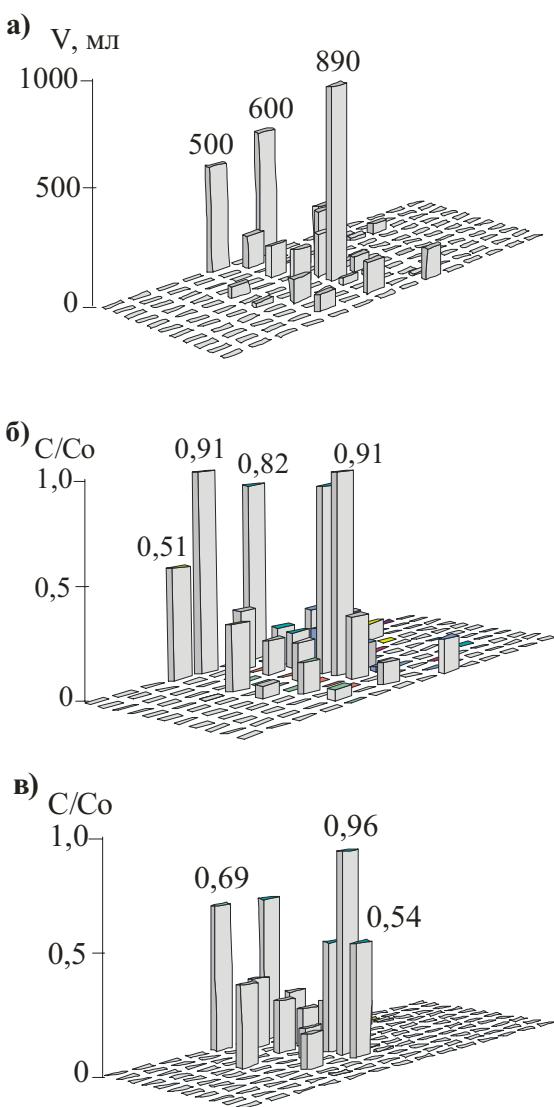


Рисунок 2. Распределение гравитационной влаги и растворенных веществ в секторах лизиметра.  
а) объемы лизиметрических вод;  
б) относительные концентрации хлорид-иона;  
в) относительные концентрации иона калия.

чевые горизонты приобрели черты сложения, свойственные новым условиям.

Нужно отметить, что сток раньше сформировался в варианте с горизонтом В2 на поверхности (рис.3). Известно, что более тяжелые горизонты лучше удерживают влагу, и следовало бы ожидать меньшую фильтрацию именно в этом варианте. Однако на формирование стока в большей степени повлияла не водоудерживающая способность почвы, а особенности структуры данного горизонта – глыбистого и агрегированного. По всей видимости, аналогично экспериментам на почвах Владимирского ополья, в иллювиальных структурных горизонтах модельных дерново-подзолистых почв движение влаги происходит отдельными тяжами. Формирование новых влагопроводящих путей также произошло быстрее именно в этих горизонтах. В дальнейшем годовой лизиметрический сток в варианте с горизонтом В2 на поверхности имел более высокие значения, что связано с преимущественными формами движения влаги. Фильтрация носит инфлюкционный характер, поэтому в периоды поступления значительных количеств влаги (весеннего снеготаяния, выпадение осадков ливневого характера), происходит интенсивное сквозное промачивание почвенной толщи, фиксируемое резким возрастанием лизимет-

ического стока [10]. Такая ситуация характерна как при значительной увлажненности профиля, так и для иссушенных почв. Однако в периоды затяжных дождей второй вариант почв с гумусовым горизонтом на поверхности имеет большую интенсивность гравитационного стока. Поэтому разница стока между вариантами незначительна в годы с равномерным выпадением осадков (рис.3). Зачастую отмечались проскoki влаги в глубинные горизонты, и возрастание лизиметрического стока без фиксирования увлажнения вышележащих горизонтов методом нейтронной влагометрии.

Можно предположить, что превышение гравитационного стока в 1 варианте вследствие преимущественно инфлюкционного характера может найти свое отражение в степени варьирования свойств почв, в частности значений влажности. В 2004 году летом и осенью на площади лизиметров по сетке (16 точек) на глубине 20 см было проведено определение площадного распределения влажности. На рисунке 4 представлены статистики распределения объемной влажности обоих вариантов.

Однако необходимо отметить, что согласно данным метеорологической обсерватории МГУ происходит увеличение среднегодовых количеств осадков [14], но разница

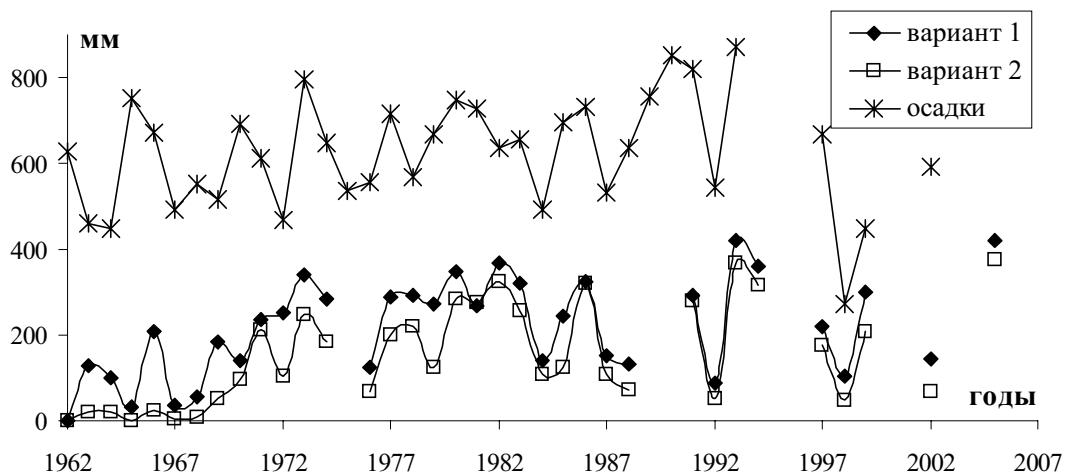


Рисунок 3. Динамика осадков и гравитационного стока влаги почв лизиметров

стока между вариантами снижается (рис.3.): в первые годы исследования она составляла в среднем около 80 мм/год, а в последние – 45-50 мм/год. Можно предположить, что такая направленная динамика лизиметрического стока имела отражение в эволюции структуры почв. При загрузке почв в лизиметры произошло разрушение структуры, что отразилось на распределении агрегатов по размерам. В обоих вариантах преобладала фракция агрономически ценных агрегатов, диаметром 0,25-10 мм, однако остальные фракции были представлены в 1 варианте – глыбистыми частицами (19%), а во втором – мелкими агрегатами (32%). Именно поэтому в варианте глубокого плантажа лизиметрический сток был сформирован уже в первый год. В дальнейшем в исследуемых вариантах изменения агрегатного состава носили одинаковую направленность – увеличение диаметра агрегатов. Происходил постепенный рост содержание глыбистой фракции, особенно в 1 варианте, и в настоящее время ее содержание составило 51 %, а во втором варианте – 32 %.

Заметное изменение обнаружено и для гранулометрического состава почв [14]. В обоих вариантах произошло снижение или-

стой фракции и увеличение песчаной во всех горизонтах, за исключением погребенных пахотного и подзолистого. Весьма интересно изменение гранулометрического состава дневных горизонтов. В верхней части пахотного горизонта В2 наблюдается снижение илистой фракции на 7%, в результате почва варианта перешла по классификации Качинского из глины легкой в тяжелый суглинок. А на глубине 20-30 см таких изменений не обнаружено. Снижение илистой фракции на 10% произошли и в горизонте В1 варианта 2, который подстилается легким по гранулометрическому составу горизонтом Е. Нужно отметить, что горизонты, которые оказались в условиях несвойственных природным, имеют направленность изменений гранулометрического состава, соответствующую его расположению в профиле. Так, например, горизонт В2 на поверхности варианта глубокого плантажа постепенно приобретает признаки пахотного горизонта – происходит снижение илистой фракции, увеличение доли песчаных частиц, хотя морфологически отличается от пахотных горизонтов подзолистых почв. Но на глубине 30 см изменения в распределении элементарных почвенных частиц данного горизонта практически незаметны. Изменения не коснулись и пахотного горизонта на поверхности варианта вспашки по Мосолову. В случае же помещения его на глубину 100 см в варианте глубокого плантажа происходит некоторое возрастание илистой и снижение песчаной фракций.

### Заключение

Проведенные исследования формирования гравитационного потока влаги показали значительный вклад быстрых потоков влаги в массоперенос даже хорошо сорбирующихся ионов в структурных текстурно-дифференцированных почвах, осуществляемый на значительные (более 50 см) расстояния. Обнаружены различия в движении гравитационной влаги различных генетических горизонтов, свя-

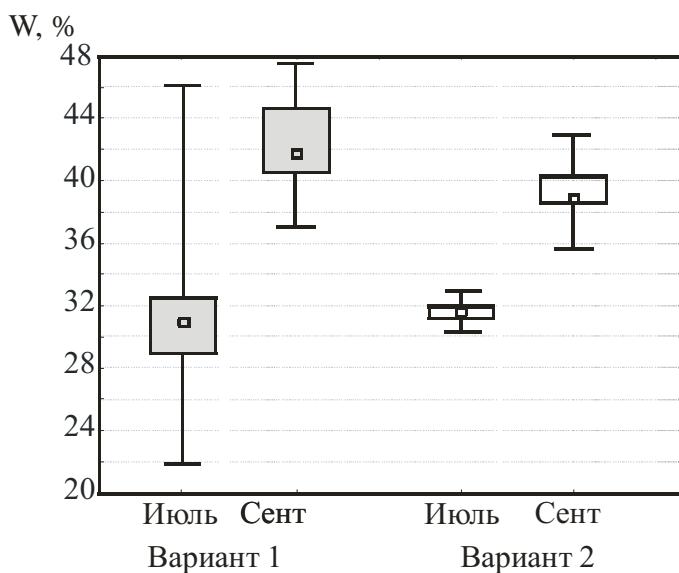


Рисунок 4. Статистики объемной влаги в июле и сентябре 2004 г.: медианы, квартили, максимальные и минимальные значения

занные с особенностями структуры порового пространства. В комковато-зернистых пахотных горизонтах серых лесных почв поток влаги носит преимущественно фильтрационный характер, преобразуясь в иллювиальных ореховатых и ореховато-глыбистых в преимущественно инфлюкционный тип.

При разрушении влагопроводящей структуры порового пространства (например, при агротехническом, мелиоративном воздействии) требуется значительное время

для ее восстановления. Причем в иллювиальных горизонтах этот период короче, чем в гумусовых горизонтах.

Эволюция физических свойств почв под влиянием гравитационных потоков влаги ведет к формированию преимущественных потоков влаги, что отражается в выносе тонких илистых гранулометрических фракций, увеличении размеров почвенных агрегатов, и в конечном счете в увеличении степени неоднородности почвенных свойств.

#### Список использованной литературы:

1. Антипов-Каратаев И.Н., Цюрупа И.Г. О формах миграции веществ в почвенном профиле // Почвоведение. 1961, № 8, с. 1-11.
2. Вельбель Б.М. Данные лизиметрических исследований Плотянской сельскохозяйственной опытной станции. // Журнал опытной агрономии, 1905, №4.
3. Зайдельман Ф.Р. Подзоло- и глеообразование. М.: Наука, 1974, 207 с.
4. Дмитриев Е.А., Хохрина Т.К. о путях передвижения впитывающейся в почву влаги. Сб. Проблемы сельскохозяйственной науки в МГУ. М.: Изд. МГУ, 1975
5. Дмитриев Е.А., Щеглов В.Н. Напорное впитывание влаги в вертикальные слоистые песчаные колонки (модельный опыт).// Биологические науки, 1981, №11, с. 91.
6. Иванова Т.В., Умарова А.Б., Самойлов О.А., Егоров Ю.В., Бекецкая Т.В. Сбор экспериментальной информации в многолетнем лизиметрическом эксперименте // Тр. Всерос. Конф. «Экспериментальная информация в почвоведении: теория, методы получения и пути стандартизации» МГУ, 2005. С. 3-5.
7. Карпачевский Л.О., Умарова А.Б. Большие лизиметры Почвенного стационара МГУ Агрономический вестник, 2003, №2, С. 5-6.
8. Рачинский В.В., Фокин А.Д., Талдыкин С.А. Радиоиндикаторное определение переноса влаги по профилю почвы // Почвоведение. 1981, № 3, с.65-69.
9. Умарова А.Б., Шеин Е.В. Применение метода крахмальной метки Дмитриева для исследований переноса воды и растворенных веществ. // «Масштабные эффекты при исследовании почв» Сб.ст., М., Изд-во МГУ им. М.В.Ломоносова. 2001, С. 217-222
10. Умарова А.Б., Шеин Е.В., Архангельская Т.А.. Особенности формирования элементов водного режима дерново-подзолистых почв в годовой, сезонной и суточной динамике. Вестник МГУ, Сер 17. Почвоведение. 2002. с.36-42
11. Шеин Е.В., Марченко К.А Преимущественные пути миграции влаги // «Вестник Московского университета. Серия 17 «Почвоведение» 2002, № 1, с. 45-49
12. Шеин Е.В., Карпачевский Л.О. Толковый словарь по физике почв. М., ГЕОС, 2003, 126 с.
13. Bouma J.A., Jongerius A., Schoonderbeek D. Calculations of saturated hydraulic conductivity of some pedal clay soil using micromorphometric data // Soil. Soc. Amer. J. 1979. V.43. P. 261-264.
14. Shein E.V., Umarova A.B. Changes in physical properties of soils and soil processes as derived from data of a long-term lizimetric experiment (1961-2002). Eurasian Soil Science. Vol.35. 2002, pp. S100-S106.

**Работа выполнена при поддержке РФФИ.**

**Проекты: 06-04-48298, 04-04-49606.**