

ISBN 978-5-94672-542-2
ISSN 2308-3875



ЭКОЛОГИЧЕСКИЙ ВЕСТНИК СЕВЕРНОГО КАВКАЗА

**Краснодар
2014**

**Том 10
№ 4**

Экологический Вестник Северного Кавказа

Выпуск

Т. 10, № 4, 2014

ISBN 978-5-94672-542-2

ISSN 2308-3875

Учредитель

Кубанский государственный аграрный университет

Председатель Редакционного Совета:

Ректор Кубанского ГАУ Трубилин А.И., д.э.н., профессор

Заместитель председателя Редакционного Совета:

Проректор по науке КубГАУ, д.б.н., профессор Кощаев А.Г.

Главный редактор: Белюченко И.С., д.б.н., профессор

Заместители главного редактора: Смагин А.В., д.б.н., профессор МГУ;

Касимов А.М., д.т.н., академик, Украина.

Редакционная коллегия:

Общая экология:

Акатов В.В., профессор, РФ, Майкоп; Корунчикова В.В., доцент, РФ, Краснодар;

Антропогенная экология:

Дзыбов Д.С., профессор, РФ, Ставрополь; Нуриев К.К., профессор, Узбекистан, Гулистан;

Биогеофизика и мониторинг экологических систем:

Смагин А.В., профессор, РФ, Москва; Титова В.И., профессор, РФ, Нижний Новгород;

Биологические ресурсы:

Онипченко В.Г., профессор, РФ, Москва; Еськов Е.К., профессор, РФ, Москва;

Экологическое состояние почв и водных систем:

Терпелец В.И., профессор, РФ, Краснодар;

Федоненко Е.В., профессор, Украина, Днепропетровск;

Загрязнение биотических и абиотических составляющих экосистем:

Чупрова В.В., профессор, РФ, Красноярск; Бозина Т.В., доцент, РФ, Краснодар;

Отходы быта, промышленного и сельскохозяйственного производства:

Белюченко И.С., профессор, РФ, Краснодар; Лысухо Н.А., доцент, Беларусь, Минск;

Касимов А.М., академик, Украина, Харьков;

Природные катастрофы:

Мустафаев Б.А., профессор, Казахстан, Павлодар;

Мельник О.А., доцент, РФ, Краснодар;

Системный анализ экологических исследований:

Попок Л.Б., доцент, РФ, Краснодар; Товасаров А.Д., ген. директор ТОО «Центрально-Азиатский институт экологических исследований», Казахстан, Алма-Ата.

Индекс журнала в каталоге подписных изданий Агентства «Роспечать» - 58361

Адрес редакции: 350044, г. Краснодар, ул. Калинина, 13, КГАУ,
кафедра общей биологии и экологии, ауд. 634, 639;
тел./факс 221-58-65; E-mail: bioeco@inbox.ru, www.ecokavkaz.ru

УДК 631.4

СТРУКТУРА ПОРОВОГО ПРОСТРАНСТВА СЛИТЫХ ЧЕРНОЗЕМНЫХ ПОЧВ ПРЕДКАВКАЗЬЯ***Смагин Андрей Валентинович***доктор биологических наук, профессор, Московский Государственный Университет им. М.В. Ломоносова, (Россия) 119992, Москва, ГСП-2, Ленинские горы, smagin@list.ru;***Быстрицкая Татьяна Львовна***кандидат биологических наук, заведующая лабораторией ИПФС АН СССР (г. Пушкино), с 1991 – пенсионер, (Россия);***Садовникова Надежда Борисовна***кандидат биологических наук, научный сотрудник, Московский Государственный Университет им. М.В. Ломоносова, (Россия) 119992, Москва, ГСП-2, Ленинские горы***Быстрицкая Надежда Петровна***выпускник ф-та почвоведения МГУ, сотрудник FARUS (Украина).*

Слитизация является широко распространенным процессом, приводящим к неблагоприятным физическим и технологическим свойствам черноземных почв. До сих пор нет единой точки зрения на генезис этого явления, хотя априори ясно, что в его основе лежат физико-химические механизмы взаимодействия тонкодисперсных частиц и почвенной влаги в циклах набухания и усадки. В работе на количественном уровне рассматриваются закономерности динамики основных категорий порового пространства в зависимости от содержания влаги в различных генетических горизонтах слитого предкавказского чернозема (Белореченск) в сравнении с обыкновенным неслитым черноземом. Используются оригинальные диаграммы структуры порового пространства как функции удельных объемов различных категорий пор от влажности почвы. В их основе лежит экспериментальный материал по текстурной пористости агрегатов в зависимости от содержания влаги, полученный оригинальным методом насыщения индивидуальных агрегатов неполярной жидкостью (толуолом) с увлажнением горячим паром. Для оценки степени слитизации применен подход и система критериев П.Н. Березина (МГУ им. М.В. Ломоносова). На фоне относительно небольших изменений по профилю выявлены существенные различия между значениями удельных объемов пор в слитом и неслитом черноземах и в первую очередь в их текстурной (агрегатной) пористости, которая снижается под действием слитизации более чем в два раза. В свою очередь это вызывает неблагоприятные технологические свойства слитых черноземов, глыбистую фрагментацию при иссушении с образованием крупных трещин, затрудняющую механическую обработку таких почв и земледелие в целом.

Ключевые слова: слитизация черноземов, набухающие почвы, тяжелый гранулометрический состав, структура и динамика порового пространства, текстурная пористость, влажность, почвосберегающие технологии.

*Статья поступила в редакцию 24.04.2014***PORE SPACE STRUCTURE of BLACK FUSED CISCAUCASIAN SOILS****Smagin Andrey Valentinovich***doctor of biological science, professor, Lomonosov Moscow State University, (Russia), 119992, Moscow, GSP-2, Leninskye gory, smagin@list.ru***Bystritskaya Tatiana L'vovna***PHD, Head labs IPFS ASUSSR (Pushchino), 1991 – retired (Russia);***Sadovnikova Nadezhda Borisovna***PHD, research associate, Lomonosov Moscow State University, (Russia) 119992, Moscow, GSP-2, Leninskye gory;***Bystritskaya Nadezhda Petrovna***Soil Sci Dept. Graduate Lomonosov Moscow St. University, staff member FARUS (Ukraine).*

* Финансовая поддержка РФФИ.

Fusion is a common process, resulting in adverse physical and technological properties of black soils. Until now, there is no single point of view on the genesis of this phenomenon, although a priori clear that it is based on the physico-chemical mechanisms of interaction between solid particles and soil moisture in the cycles of swelling and shrinkage. The paper quantitatively considers regularities of dynamics of main categories of the pore space, depending on the moisture content of the various genetic horizons of fused Ciscaucasian chernozem (Belorechensk) compared with the unfused ordinary chernozem. The research uses the original structure diagram of the pore space as the specific volumes of the various categories of pores function of soil moisture. They are based on experimental data on the texture porosity of aggregates depending on the moisture content obtained by the original method of saturation of individual aggregates of the nonpolar liquid (toluene) with hot steam humidification. To assess the fusion degree the original approach and criteria system of P.N. Berezin (Lomonosov MSU) is applied. On the background of relatively small changes in the profile, revealed significant differences between the values of pore volume in the fusion and unfused chernozems, and primarily in their texture (aggregate) porosity, which decreases under the fusion influence more than doubled. In turn, this causes adverse technological properties of fused chernozems, their blocky fragmentation during drying and large cracks formation complicating mechanical treatment such soils and agriculture in general.

Keywords: fusion of black soils, swelling soils, heavy granulometric composition, structure and dynamics of the pore space, textural porosity, moisture content, soil conservation technologies.

Received 24.04.2014

Введение. Природные черные слитые почвы (ЧСП) распространены преимущественно в условиях теплого и жаркого переменного климата с одним-двумя влажными сезонами в годовом цикле. Наиболее крупные их массивы расположены в Средиземноморье, на юге Сахары, в восточной и южной Африке, на полуострове Индостан, в восточной Австралии, южных районах США, Мексике, Парагвае, Аргентине при общей площади по оценке ФАО порядка 2,5 млн км² (Dudal, 65; Zech, Hintermaier-Erhard, 2002). В мировой почвенной литературе существует около 40 названий-синонимов ЧСП: вертисоли (ФАО, WRB), регеры (Индия), маргалит (Индонезия), тирсы (Марокко), адоб (США), смолницы (Балканы) и др. (Розанов, 74). В настоящее время для их обозначения принят термин «вертисоли», под которым подразумеваются темные, богатые глиной почвы с выраженной динамикой набухания и усадки (Zech, Hintermaier-Erhard, 2002). В отечественной классификации слитые почвы выделяются на уровне подтипов и родов черноземов и лугово-коричневых почв тяжелого гранулометрического состава (Классификация..., 77). На территории бывшего СССР такие почвы описаны в Молдавии, на Северном Кавказе, Поволжье и ряде других регионов (Быстрицкая, Тюрюканов, 71; Уваров, 86).

Существует несколько теорий генезиса ЧСП: палеогидроморфная, остаточной солонцеватости, геохимическая и др., но общепринятого взгляда на этот процесс до сих пор нет. Анализ имеющейся информации показывает, что природные ЧСП приурочены к территориям, которые можно отнести к транзитно-аккумулятивным ландшафтам, пережившим этап гидроморфизма и вовлеченным в активные тектонические движения альпийского орогене-

за; их почвообразующие породы имеют тяжелый гранулометрический состав, а основной особенностью современного почвообразования является режим переувлажнения-иссушения (Быстрицкая, Тюрюканов, 71; Уваров, 86; Zech, Hintermaier-Erhard, 2002). Вместе с тем весомый вклад в формирование характерных для ЧСП свойств, несомненно, вносит антропогенный фактор. Согласно Зонну (1986) следует различать первичный и вторичный слитогенез, причем последний вызывается сезонным переувлажнением, включая орошение щелочными водами, особенно содержащими кремнезем и магниевые соли. В таких условиях может происходить смектизация, а при чередовании влажных и сухих сезонов – последовательные смены пептизации и коагуляции илистых частиц с соответствующими циклами набухания и усадки. Наряду с орошением, слитизации, по всей видимости, может способствовать агрогенная потеря органического вещества, обеспечивающего водопропрочность агрегатов, механическое разрушение агрегатов и распыление почвы, а также переуплотнение при постоянной сельскохозяйственной обработке тяжелой техникой.

Результатом слитизации черноземных почв являются в первую очередь неблагоприятные агрофизические свойства, количественная оценка которых является предметом данной работы. В ней мы развиваем структурно-функциональный подход к исследованию физических свойств и процессов в почвах с переменным поровым пространством, предложенный сотрудником кафедры физики и мелиорации почв ф-та почвоведения МГУ, доктором биологических наук Петром Николаевичем Березиным (Березин, 87, 95). Преждевременная кончина оборвала яркий творческий путь этого иссле-

дователя, коллеги и товарища по работе для авторов настоящей статьи. Поэтому, продолжая интересную и актуальную научную тему, впервые поднятую на кафедре П.Н. Березиным, мы хотим посвятить данную работу его памяти.

Методика и объекты исследований.

Объектом экспериментальных исследований явились образцы слитого глинистого предкавказского чернозема из почвенного разреза на территории лесхоза «Белореченский» в окрестностях г. Белореченска Краснодарского края. Разрез был заложен на плантации грецких орехов посадки 1984 г на равнинном участке поперек насыпного вала. Приведем краткое морфологическое описание почвы.

А_{нас} 0-35 см. Темно-серый насыпной горизонт, комковато-порошисто-зернистый, тяжело-суглинистый, плотноватый, покрыт трещинами, свежий, новообразования отсутствуют, остатки корней, мощные стержневые корни древесной посадки, переход ясный с ровной границей по сложению.

А1 35-58 см. Темно-серый, гумусово-аккумулятивный горизонт, комки почвы (бусы) на корнях, тяжелый суглинок, плотный, трещиноватый, свежий, не вскипает от HCl, примазки окисного железа, хорошо развитые боковые корни, переход постепенный по сложению, структуре, цвету.

AB 58-90 см. Темно-серый, почти черный переходный горизонт, глыбисто-комковато-ореховатая структура, легкая глина, очень плотный, влажноватый, примазки железа, разветвленные корни практически отсутствуют, стержневой корень прекращает рост с 90 см глубины, переход постепенный по сложению, цвету.

B1 90-123 см. Темно-серый с ржавыми пятнами легкоглинистый горизонт, комковато-ореховатая структура, плотный, слитой, влажноватый, не вскипает, корней нет, переход постепенный по цвету, структуре.

B2 123-193 см. Темно-серый с металлическим блеском по граням структурных отдельностей, глыбистый, слитой, сыроватый, единичные Mn конкреции, вскипание на слух, переход ясный по цвету.

BC 193-230 см. Оливково-бурый с затеками гумуса, комковато-глыбистый, глинистый, слитой, пластилинообразный, сыроватый, вскипает, железисто-марганцевые конкреции, журавчики, переход постепенный по цвету.

C >230 см. Бурый с охристыми пятнами, комковато-глыбистый, глинистый, слитой, сыроватый, обильно вскипает, частые карбонатные и железисто-марганцевые новообразования.

В лабораторных условиях на отобранных образцах были исследованы гранулометрический состав пирофосфатным методом (Теории и методы..., 2007), валовый состав минеральной части сплавлением с фтористоводородной кислотой, гумус (по Тюрину) и CO₂ карбонатов (ацидометрически) согласно классическому руководству (Аринюшкна, 60). Количество прочносвязанной влаги (W_a) рассчитывалось по максимальной гигроскопической влажности (МГ), определенной методом сорбционного равновесия с парами воды над насыщенным раствором сульфата калия с относительным давлением паров P/P₀ = 0,98 (Теории и методы..., 2007). Принималось, что W_a = 0,6 МГ (Березин, 87). Плотность твердой фазы (ρ_s) оценивалась пикнометрическим методом согласно (Вадюнина, Корчагина, 86). Потенциометрическим и кондуктометрическим методами на базе портативного прибора HI 98130 Combo (Смагин и др., 2006; Основы..., 2012) были определены pH водной суспензии и поверхностной проводимости почвенных паст с использованием в качестве тест-раствора хлористого калия для расчета потенциальной поверхностной энергии вододудерживания со стороны твердой фазы (E_s) по (Злочевская, Алексеенко, 77; Березин, 87).

Для определения базовой характеристики – зависимости текстурной (агрегатной) порозности от влажности был применен усовершенствованный метод насыщения агрегатов неполярной жидкостью. Модификация предложенного в работе (Воронин и др., 87) «керосинового» метода заключалась в использовании в качестве неполярной жидкости толуола (плотность ρ_t = 0,8685 г/см³), в увлажнении агрегатов горячим паром, а не жидкой влагой, и в ином способе определения массы. Согласно (Березин, 87) агрегаты в интервале от 2 до 5 мм характеризуются инвариантностью порозности, которая практически не зависит от их размеров. Поэтому для исследования использовались полученные после просеивания агрегаты фракции 3-5 мм. Воздушно-сухие агрегаты поштучно взвешивались на торсионных весах (m₀), помещались пинцетом в ячейки (лунки) основания лабораторного штатива для пробирок и капиллярно пропитывались толуолом. Жидкость аккуратно вносилась пипеткой в лунку с агрегатом. Заметим, что все операции с толуолом следует производить под тягой и с использованием респиратора для защиты дыхательных путей от летучих токсичных паров этой жидкости. После капиллярной пропитки (выхода толуола со дна на поверхность агрегата) в лунку добавлялось ос-

новное количество этой неполярной жидкости до полного погружения в нее агрегата, и штатив помещался на 15–30 мин в вакуумный эксикатор для удаления возможного заземленного воздуха и полного насыщения агрегатов. После вакуумирования предварительно обкатанные на фильтровальной бумаге до появления матового оттенка агрегаты повторно взвешивались (m_a). Параллельно в отдельной навеске агрегатов определялась гигроскопическая влажность (W_r) в воздушно-сухом состоянии стандартным методом высушивания при 105°C (Вадонина, Корчагина, 86). Предельная текстурная (агрегатная) порозность в виде соответствующего удельного объема определялась по формуле:

$$D_{\text{тп}} = \frac{(m_a - m_0)(100 + W_r)}{100\rho_r m_0} + \frac{W_r}{100} \quad (1)$$

Разность ($m_a - m_0$) дает массу толуола, заполнившего все поровое пространство агрегата. При делении этой массы на плотность толуола находим объем неполярной жидкости, равный объему пор агрегата. Для получения искомого характеристики удельного объема ($D_{\text{тп}}$), нормированного массой твердой фазы почвы, эта величина делится на отношение $m_0 100 / (100 + W_r)$ (массу абсолютно сухой почвы). К измеренному объему необходимо добавить объем пор, занятых гигроскопической влагой, который при плотности воды 1 г/см³ равен $W_r / 100$. Поскольку по формуле (1) удельный объем получается в см³/г, для перевода в систему СИ (м³/кг) требуется умножить результат на 1000 (г в кг) и разделить на 10⁶ (см³ в м³). Тогда, умножая (1) на 100, получаем окончательно следующее выражение для расчета удельного объема текстурного порового пространства в предельном состоянии по экспериментальным данным:

$$D_{\text{тп}} = \frac{(m_a - m_0)(100 + W_r)}{\rho_r m_0} + W_r, \quad (2)$$

где $[D_{\text{тп}}] = 10^{-5}$ м³/кг.

Поскольку при набухании (усадке) порозность агрегатов меняется, для изучения зависимости этой характеристики от влажности агрегаты с известной массой в воздушно-сухом состоянии (m_0) увлажнялись горячим паром для формирования того или иного содержания влаги. Капиллярное насыщение жидкой водой (полярной жидкостью) лиофильных агрегатов, использующееся в исходной методике (Воронин и др., 87), на наш взгляд, не исключает заземления воздуха и возможных изменений объема под действием внутреннего пневматического давления вплоть до разрывов агрегата, тогда как постепенная конденсация пересыщенного (горячего) пара позволяет избежать этих неблагопри-

ятных эффектов. Технически подобное насыщение осуществляется очень легко и быстро (в отличие от подпитки на керамических пластинах). Для этого агрегаты надо лишь на время поместить в струю горячего пара (например, из носика кипящего чайника) и подержать некоторое время, в зависимости от которого можно получить различные величины влажности. Сразу же после операции увлажнения агрегаты поштучно взвешиваются на торсионных весах (m_a), после чего их помещают в лунки штатива для насыщения толуолом (m_r) и определения оставшегося не занятым водой порового пространства по вышеизложенной методике.

Для расчета влажности агрегата (W) необходимо количество имеющейся в нем воды разделить на массу абсолютно сухой почвы ($m_0 100 / (100 + W_r)$) и умножить на 100 (перевод в %). Но количество воды – это разность массы влажного агрегата и абсолютно сухой почвы. Поэтому выражение для расчета приобретает вид:

$$W = 100 \frac{(m_a - m_0 100 / (100 + W_r))(100 + W_r)}{m_0 100} \quad (3)$$

Упрощая (3), после несложных алгебраических преобразований получаем окончательную формулу:

$$W = \frac{m_a}{m_0} (100 + W_r) - 100. \quad (4)$$

Размерность влажности – проценты (%) от массы почвы, или, если речь идет об удельном объеме пор, занятых влагой, это 10⁻⁵ м³/кг, поскольку плотность воды 1000 кг/м³.

Расчет удельного порового пространства агрегата, занятого воздухом (D_a), очевидно, по аналогии с (2) производится по формуле:

$$D_a = \frac{(m_r - m_a)(100 + W_r)}{\rho_r m_0}, \quad (5)$$

где $[D_a] = 10^{-5}$ м³/кг. Здесь разница ($m_r - m_a$) дает массу толуола, заполнившего оставшееся поровое пространство агрегата, не занятого водой. Гигроскопическую воду в эту характеристику, естественно, не включаем.

Искомая величина удельного объема всего текстурного порового пространства, как сумма объемов пор, занятых водой и воздухом, рассчитывается как:

$$D = D_a + W = \frac{(m_r - m_a)(100 + W_r)}{\rho_r m_0} + \frac{m_a}{m_0} (100 + W_r) - 100 \quad (6)$$

Это выражение, правильное с алгебраической точки зрения, является проблемным в связи с физическими размерностями, поскольку ранее мы делили влажность на плотность воды, чтобы получить удельный объем вместо процентного содержания (массовой доли влаги).

Учитывая это и проводя дополнительные преобразования, получаем окончательную формулу для расчета удельных объемов текстурного порового пространства по экспериментально определяемым параметрам m_t , m_b , m_0 , ρ_t и W_r :

$$D = \frac{m_t}{\rho_t m_0} - \frac{m_b}{m_0} \left(\frac{1}{\rho_t} - \frac{1}{\rho_l} \right) (100 + W_r) - \frac{100}{\rho_l}, \quad (7)$$

где ρ_l – плотность воды, равная 1 г/см³. При постановке измеряемых параметров масс в формулу (7) в граммах, а плотностей толуола и воды в г/см³, получаем необходимую размерность удельных объемов $[D]=10^{-5}$ м³/кг.

Результаты исследований и обсуждение. Обратимся к анализу полученных результатов. В таблицах 1 и 2 приводятся данные по гранулометрии и элементный (валовой) состав исследуемой черноземной почвы. Как видно, тяжелый гранулометрический состав по всему профилю, выявленный при морфологическом описании разреза, полностью подтвердился аналитически. Содержание физической глины (час-

тиц менее 0,01 мм) варьировало от 59% в верхнем насынном горизонте, до 67-74% в основной двухметровой толще разреза, что по классификации Качинского (Вадюнина, Корчагина, 86) соответствовало тяжелому суглинку для слоя $A_{нас}$ и легкой глине для всех остальных горизонтов. Также обращает внимание доминирование по всему профилю илистой фракции среди других компонентов механического состава. Наименьшее количество ила наблюдалось в насынном слое (36%), а далее его содержание было стабильно высоким и составляло порядка 50% от всех элементарных частиц почвы. Тяжелый гранулометрический состав, как уже отмечалось во Введении, является обязательным условием слитогенеза. В целом исследуемая почвенная толща, за исключением верхнего насынного горизонта, весьма однородна по гранулометрическому составу, что свидетельствует о ее генетической целостности (одночленности материнской породы).

Табл. 1. Гранулометрический состав слитого чернозема предкавказского в % от массы абсолютно сухой почвы

Горизонт	Фракции, мм					
	0,25-1	0,05-0,25	0,01-0,05	0,005-0,01	0,001-0,005	<0,001
$A_{нас}$	0,78	15,63	25,03	4,80	17,68	36,08
A1	0,61	5,23	26,88	5,76	20,04	41,48
AB	0,40	6,04	24,40	5,16	16,88	47,12
B1	0,46	5,02	22,24	3,36	14,56	54,36
B2	1,13	2,99	21,88	4,36	12,44	57,20
BC	1,86	4,26	25,08	4,32	16,36	48,12
C	1,88	4,52	22,84	7,80	14,08	48,88

Табл. 2. Элементный состав слитого чернозема предкавказского в % от массы абсолютно сухой почвы

Горизонт	ПП	Si	Fe	Al	Ca	Mg	P	S	K	Na
$A_{нас}$	13,84	31,76	3,28	11,91	0,22	0,80	0,07	0,14	1,68	0,52
A1	13,84	30,20	3,06	13,80	0,34	0,86	0,07	0,06	1,73	0,64
AB	12,98	32,45	3,38	11,15	0,22	0,88	0,06	0,10	1,72	0,45
B1	12,55	28,16	3,43	15,54	0,22	0,73	0,04	0,12	1,64	0,71
B2	12,32	31,97	2,23	11,79	0,34	0,90	0,03	0,05	1,59	0,50
BC	11,37	28,95	3,40	13,84	1,39	1,28	0,05	0,06	1,74	0,62
C	11,65	30,08	3,40	12,13	1,78	1,28	0,04	0,05	1,74	0,62

ПП – потери при прокаливании.

Исследованные макроэлементы по данным валового анализа можно распределить на четыре группы по массовой доле: 1) кремний и алюминий – более 10%, 2) железо, калий и магний – 1-3%, натрий кальций и сера – 0,1-1% и фосфор в количестве менее 0,1%. Расчет коэффициентов дифференциации почвенного профиля (отношение содержания элемента в почвенном горизонте к содержанию в почвообразующей породе) показал, что почвенный профиль практически отмыт от кальция и магния.

Вместе с тем во всей почвенной толще вплоть до переходного к породе горизонта BC отмечается стабильное превышение содержания магния над кальцием, что также характерно для слитых почв. Биогенные элементы (S, P) накапливаются в поверхностных горизонтах в пределах первого метра, где их содержание в 1,5-2 (3) раза выше, чем в породе. Содержание остальных элементов относительно стабильное и мало меняется с глубиной. Однако сравнительная оценка по молекулярным отношениям

кремнезема и оксида алюминия, а также кремнезема и полуторных окислов (алюминия и железа) выявляет процесс оглинения (сиаллитизации) в горизонтах А1, В1 и ВС. Максимальная степень оглинения приурочена к горизонту В1, причем этот результат валового анализа хорошо коррелирует с данными гранулометрии (максимум ила и физической глины). В целом в указанных горизонтах можно ожидать более интенсивное проявление слитогенеза.

Чернозем характеризуется довольно низким содержанием органического вещества (гумуса), что также характерно для слитых почв. Его распределение по профилю носит явно выраженный ступенчатый характер с максимальным содержанием в верхнем 50 см слое (4,5%), средней концентрацией (2,2-2,7%) в мощной толще от 50 до 200 см и резким спадом до 0,3-0,4% в материнской породе (рис. 1). Карбонатный профиль, напротив, характеризуется стабильно низким содержанием CaCO_3 (1,3-1,7%) в основной почвенной толще и резким повы-

шением до 6,5-7,5% в переходном ВС горизонте и материнской породе. В полном соответствии с содержанием карбонатов (буферная система) изменяется и активная реакция почвы (рН водной суспензии) от слабокислой 5,8-6,4 в горизонтах А, АВ, В1 и В2 до слабощелочной (8,2-8,3) в горизонтах ВС и С. Поскольку гидрофобное органическое вещество гумуса, карбонатная цементация и кислая среда лимитируют набухание, как и по полученным ранее результатам, можно ожидать наибольшее проявление слитости для горизонта В1 в средней части профиля. Вместе с тем следует помнить, что на удалении от поверхности циклы набухания и усадки с соответствующими изменениями объемов текстурного порового пространства и образованием трещин ограничены факторами веса (давления) вышележащих слоев и, возможно, недостатком влаги. Поэтому прогнозируемая в лабораторных условиях картина потенциального слитогенеза в природе может видоизменяться.

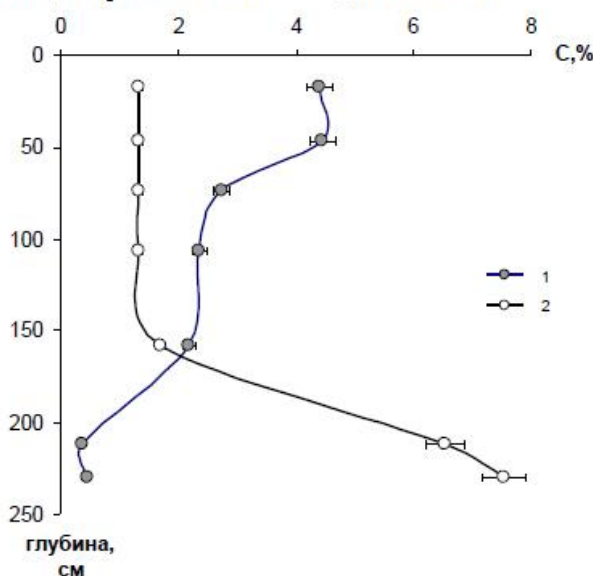


Рис. 1. Профильное распределение гумуса (1) и карбонатов кальция (2) в черноземе слитом предкавказком. С, % — процентное содержание от массы абсолютно сухой почвы.

Рассмотрим результаты анализа *структуры порового пространства* исследуемого чернозема в зависимости от содержания в нем влаги. На рис. 2 приведены экспериментальные данные по текстурной (агрегатной) порозности в зависимости от влажности. Для их аппроксимации была использована эмпирическая функция, предложенная в работе (Березин, 95):

$$D = \sqrt{D_{\text{тп}}^2 + K_a W^2}, \quad (8)$$

где K_a — безразмерный коэффициент текстурной усадки. Высокие коэффициенты детерминации ($R^2 = 0,990-0,998$) на фоне не-

больших стандартных ошибок (0,2-0,5%) подтверждают адекватность модели (8). Аппроксимационные кривые представлены на рисунке в виде сплошных черных линий. При статистической обработке данных оказалось возможным сгруппировать образцы изучаемых горизонтов разреза. Верхняя кривая с коэффициентом текстурной усадки $K_a = 0,85 \pm 0,01$ и предельным объемом текстурного порового пространства $D_{\text{тп}} = 16,3 \pm 0,2 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3/\text{кг}$ объединила данные по горизонтам $A_{\text{вас}}$ и АВ. Линия, занимающая нижнее положение на рисунке 2, аппроксимировала зависимость для горизон-

тов А1 и В1 с параметрами $K_a=0,85\pm0,01$ и $D_{\text{пр}}=13,6\pm0,1 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3/\text{кг}$. Между этими кривыми располагался график с $K_a=0,83\pm0,02$ и $D_{\text{пр}}=14,8\pm0,2 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3/\text{кг}$, объединяющий нижние горизонты профиля (В2, ВС) и материнскую породу (С).

В целях сравнительной характеристики данных на рисунок 2 была нанесена линия текстурной усадки агрегатов неслитой почвы (одесского чернозема обыкновенного окультуренного, гор. А_{нзс}) с параметрами текстурной усадки $K_a=0,68$ и предельного объема порового пространства $D_{\text{пр}}=31 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3/\text{кг}$, взятыми из работы (Березин, 95). Пунктирная прямая из начала координат, направленная под углом 45° , является асимптотой для кривых текстурной усадки, поскольку набухшая дезаг-

регированная (раздельно-частичная) тонкодисперсная почва при усадке до определенного предела уменьшает свой объем ровно настолько, насколько теряет влагу (так называемая «линейная» усадка глин и глинистых минералов), то есть $D=W$. Упомянутый предел П.Н. Березин вслед за рядом грунтоведов ассоциирует с пределом текучести W_t (Березин, 87). Хотя на наш взгляд более правильное объяснение прекращения линейной пропорциональной усадки – вход воздуха (состояние барботирования) в крупные поры почвенной массы, которая из двухфазной системы (тонкодисперсные частицы – вода) превращается в трехфазную (частицы – вода – воздух) с появлением капиллярных сил.

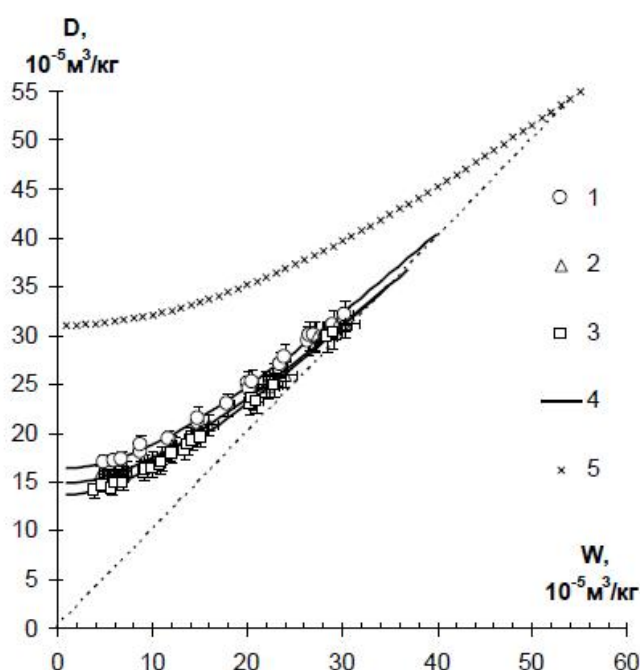


Рис. 2. Зависимость текстурной пористости от влажности. Горизонты слитого предкавказского чернозема 1 – А_{нзс}, АВ, 2 – А1, В1, 3 – В2, ВС, С; 4 – расчет по уравнению (8); 5 – аналогичный расчет для неслитого чернозема обыкновенного по данным (Березин, 95).

Оставляя за этим состоянием прежнее обозначение (W_t), отметим, что его вовсе не обязательно определять экспериментально, поскольку и сама методика определения предела текучести (Вадюнина, Корчагина, 86) носит весьма субъективный характер, да и физическая трактовка данного предела, как только что упоминалось, может быть разной. Вместе с тем, очевидно, что имея кривую текстурной усадки, легко аналитически определить данный предел по пересечению с пунктирной линией $D=W$ (рис. 2). Условие пересечения, следует из урав-

нения (8), если приравнять его к указанной прямой с тангенсом наклона = 1:

$$W_t = \frac{D_{\text{пр}}}{\sqrt{1-K_a}} \quad (9)$$

Полученные таким образом значения W_t ($\text{м}^3/\text{кг}$) составили для горизонтов А_{нзс}, АВ: $42,5 \cdot 10^{-5}$, для А1, В1: $35,4 \cdot 10^{-5}$ и для В2, ВС, С: $35,1 \cdot 10^{-5}$. В сравнении с этим для неслитого обыкновенного чернозема предел W_t был в 1,3-1,6 раз больше ($54,9 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3/\text{кг}$). То же можно сказать и о нижнем пределе усадки в виде

удельного объема текстурной порозности в воздушно-сухом состоянии агрегатов, который для неслитого чернозема составил $D_{\text{тп}} = 31 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3/\text{кг}$, или в 2-2,3 раза большую величину по сравнению с исследуемой в работе почвой.

Наличие базовой характеристики в виде зависимости текстурной порозности от влажности позволяет перейти к анализу динамики всего порового пространства в виде так называемых диаграмм структуры порового пространства (ДСП). Отметим сразу, что в данной работе мы не будем следовать термодинамическому подходу для получения ДСП, который был предложен П.Н. Березиным (1987). Есть основания считать его некорректным, и рассчитанные по уравнениям для «всасывающего» давления рF-кривые (функции термодинамического потенциала от влажности) не адекватными действительности. Вслед за Р.И. Злочевской с соавт. (Злочевская, Алексеев, 77; Злочевская, Дивисилова, 77) П.Н. Березин использовал «осмотическую» теорию набухания, связывающую это явление с гидратацией противоионов двойного электрического слоя (ДЭС). Не критикуя саму эту теорию, что должно быть предметом отдельной статьи, обратим внимание лишь на уравнение для расчета соответствующего «осмотического» давления (потенциала) у обоих упомянутых авторов:

$$P_s = \frac{E_s}{W} \quad (\text{Злочевская и др., 77}); \quad P_s = \frac{E_s}{(W - W_a)}$$

(Березин, 87, 95), (10)

где P_s – «осмотическое» давление, E_s – «потенциальная энергия взаимодействия твердой фазы с жидкой мицеллярной водой или энергия диффузного слоя ДЭС» по (Березин, 87). Последняя величина рассчитывается по значению активной концентрации (C_s) ионов ДЭС, оцениваемой по экспериментальным данным о поверхностной проводимости почвенной пасты при данной температуре (T), согласно закону Вант-Гоффа: $E_s = C_s RT$. В работах П.Н. Березина (87, 95) $E_s = Q_s RT$, где Q_s – «удельный заряд диффузной части ДЭС», но это выглядит некорректно с точки зрения физической размерности, поскольку подстановка в уравнение Вант-Гоффа заряда в Кулонах вместо концентрации в моль/м³ не даст единиц потенциала или удельной энергии E_s (Дж/м³).

Однако уравнения (10) описывают не расклинивающее давление, которое действительно является одной из причин набухания, а скорее осмотический потенциал почвенного раствора, согласно простому закону разбавления (уменьшение влажности увеличивает кон-

центрацию при фиксированном количестве ионов). Сам закон разбавления применительно к почвам весьма проблематичен, поскольку реальный ход зависимости концентрации растворимых веществ-электролитов от влажности – не монотонное увеличение по мере снижения содержания влаги, согласно (10), а кривая с экстремумом (Смагин, 2006). Ведь по прошествии критических значений влажности (область максимальной молекулярной влагоемкости) концентрация, наоборот, начинает падать (явление нерастворяющегося объема). Но главное – другое. «Осмотическое» набухание реализуется в растворах при наличии полупроницаемой мембраны, удерживающей ионы и пропускающей воду. В почве таких мембран нет, поэтому при соединении с чистым растворителем (водой) ионы будут гидратироваться, частично переходить в раствор, но никакого набухания при этом происходить не будет, хотя осмотическая компонента полного термодинамического потенциала влаги при этом может достигать больших значений при практически насыщенной почве (100 Дж/кг и выше или $rF \geq 3$). Ошибка видна из рисунка 4 в работе (Березин, 95), где автор приводит данные по «осмотическому давлению почвенной влаги», определенному «криоскопическим методом», якобы подтверждающие уравнение (10). Но криоскопия дает полный потенциал с действительно высокими значениями рF при почти насыщенной почве тем выше, чем больше засоление почвенного раствора. А это не причина набухания, ведь засоленные почвы, как известно, наоборот, теряют способность к набуханию из-за подавления ДЭС.

Одна из наиболее вероятных причин набухания – ионно-электростатическая составляющая расклинивающего давления. Удерживаемые в ДЭС ионы, наряду с гидратацией самой заряженной поверхности, ориентацией полярных молекул воды в электростатическом поле поверхности и ионов ДЭС, силы отталкивания при перекрытии оболочек ДЭС – все вместе будут способствовать вхождению воды в тонкодисперсную систему и расширению ее объема. И связь зарядов с поверхностью твердой фазы, включая ионы ДЭС, как раз служит той самой полупроницаемой «мембраной», которая отсутствует для свободных ионов порового раствора. В этом Р.И. Злочевская и П.Н. Березин исходно правы. Но это давление нельзя оценивать криоскопией, особенно в области насыщенности почвы влагой, где доминирует осмотическое давление от гидратации свободных ионов. А главное, уравнения для ионно-

электростатической компоненты расклинивающего давления совершенно иные, отличные от (10). Это экспоненциальная зависимость от влажности, а точнее, от расстояния до поверхности тонкодисперсной частицы, впервые обоснованная теоретически в работах великого русского ученого акад. Б.В. Дерягина – автора самого понятия «расклинивающее давление», теории ДЛФО устойчивости дисперсных систем, одного из основателей коллоидной и физической химии в СССР. Его многогранное творчество за долгую (92 года) жизнь составило порядка 1500 научных работ! (Ролдугин, 2006). В грунтоведении эта зависимость носит название закона Терцаги, а в отечественном почвоведении – уравнения Судницына, первым предложившего такую зависимость для описания основной гидрофизической характеристики почв и давшего собственную (упрощенную) теоретическую трактовку, исходя из экспоненциального распределения Больцмана для ионов ДЭС и закона Вант-Гоффа (Судницын, 79, Судницын и др., 2012). Автор этих строк полемизирует с проф. И.И. Судницыным по вопросам механизма водоудерживания и набухания в тонкодисперсных почвах и, в частности, по значению гидратации катионов, предлагая концепцию конкурентных молекулярных взаимодействий, рассматривающую не только связывание влаги твердой фазой почв, но и взаимодействия самих тонкодисперсных частиц и их агрегативную устойчивость согласно теории ДЛФО (Смагин, 2003, 2008, Смагин и др., 2004, 2011). Но в одном мы придерживаемся общего мнения – в универсальности экспоненциального закона водоудерживания в тонкодисперсных набухающих системах, отражающего ведущую роль сил электрической природы в данном явлении (Судницын и др., 2012).

Итак, приведенные выше рассуждения дают основания отвергнуть вариант термодинамического подхода для расчета ДСП, предложенный в работах (Березин, 87, 95). Вместе с тем это не исключает применения отдельных экспериментально оцениваемых критериев, например величины E_s , в качестве самостоятельных характеристик слитости почвы, тем более что для этого автором разработана нормативная база (Березин, 95). Построение ДСП в термодинамических rF координатах возможно на основе использования не теоретических, а реальных rF -кривых, определенных экспериментально, например методом равновесного центрифугирования (Смагин, 2012). Но в данной статье мы предлагаем еще более простой подход – использовать не rF -координату (по-

тенциал почвенной влаги), а просто влажность в качестве абсциссы ДСП. Это удобно и с практической точки зрения, когда почвовед-агроном может, имея характерные значения влажности для данной почвы (например, наименьшую полевую влагемкость) и нанеся ее на диаграмму структуры порового пространства, сразу оценить соответствующие категории пористости и степень их заполнения водой или воздухом. В случае же rF -координат пользователю надо проводить экспериментальные измерения давления (потенциала) почвенной влаги, что без специальных приборов и навыков для агронома затруднительно.

Для нахождения удельных объемов всех компонентов структуры порового пространства по кривым текстурной порозности воспользуемся методом, предложенным П.Н. Березиным (87; 95). Рассмотрим процесс иссушения однородной тонкодисперсной массы. Согласно (Березин, 87), до формирования трещин все поровое пространство является текстурным. Можно добавить к этому, что система, по-видимому, здесь двухфазная (почва-вода), и поэтому уменьшение ее объема при усадке равно изменению объема вытекшей (испарившейся) воды ($D_w=W$ или $dD/dW=1$). Известный факт, что в ряде случаев на кривых усадки выделяется первоначальная область $dD/dW<1$ (структурная усадка по (Воронин, 84, Шеин, 2005), а потом линии нормальной (линейной) усадки не совпадают с прямой $W=W$, а смещаются относительно нее вверх на некоторую величину $\Delta D>0$, сохраняя параллельность ($dD/dW=1$), по-видимому, может иметь альтернативное объяснение. По (Воронин, 84, Шеин, 2005) этот факт считается следствием дренирования крупных межагрегатных пор, то есть по сути – входа воздуха в первоначально двухфазную систему «почва-вода», но это противоречит приведенному выше мнению П.Н. Березина о текстурном (внутриагрегатном) характере пористости в данном диапазоне влажности. На наш взгляд, наличие смещения $\Delta D>0$ можно объяснить как зашемленным воздухом, так и присутствием неизменного объема прочносвязанной влаги (W_a), который для текстурной пористости, по сути, является аналогом «твердой фазы».

Поскольку удельный объем текстурного порового пространства, согласно (Березин, 95), находится по разности между удельными объемами агрегатов и твердой фазы почв ($D=1/\rho_a - 1/\rho_s$, где ρ_a , ρ_s – плотности агрегатов и твердой фазы), при наличии «мертвого» удельного объ-

ема прочносвязанной влаги не равно нулю будет происходить положительный сдвиг кривой текстурной пористости (усадки агрегатов) $\Delta D = W_a > 0$ относительно линии $W = W_0$. Чтобы его не было, следует вычитать величину W_a из D , считая ее частью удельного объема твердой фазы ($D = 1/\rho_a - 1/\rho_s - W_a$). Косвенно выдвинутой нами гипотеза подтверждается зависимостью величины смещения ΔD на кривых усадки агрегатов от величин предельного объема текстурного порового пространства и максимальной гигроскопической влажности, с которыми коррелирует W_a , что следует из анализа экспериментальных данных (Березин, 87; 95). Поэтому мы все же считаем более правильным мнение П.Н. Березина (1987) о текстурном характере порового пространства до момента образования трещин, или, как нам представляется, до реального входа воздуха в исходно двухфазную систему «почва-вода».

В результате мы не будем дифференцировать нетекстурное (внешнее) поровое пространство на межагрегатную пористость и трещины, как это было сделано в более поздней работе П.Н. Березина (1995), и оставим первоначальный расчет согласно (Березин, 87). Отметим, что попытка выделить межагрегатную пористость с помощью так называемой формулы приведения по Качинскому (Вадюнина, Корчагина, 86; Шеин, 2005) на ДСП не имеет смысла, поскольку по Качинскому не определяется объем трещин и вся пористость за вычетом суммарной агрегатной ($P_{\Sigma a}$) относится к межагрегатной (P_{ma}). В этом нетрудно убедиться из следующих вычислений: $P_{ma} = P_{\text{общ}} - P_{\Sigma a}$, где $P_{\text{общ}}$ – общая пористость. По Качинскому $P_{\Sigma a} = P_a(1 - P_{\text{общ}})/(1 - P_a)$, где $P_a = (1 - \rho_a/\rho_s)$ – пористость агрегата. Если измерена плотность агрегата (ρ_a), удельный объем текстурного порового пространства по Березину (1987) – это $D = 1/\rho_a - 1/\rho_s$, откуда $1/\rho_a = D + 1/\rho_s$. Подставляя $1/\rho_a$ в выражение $P_{\Sigma a}$ по Качинскому, получаем $P_{\Sigma a} = \rho_s D(1 - P_{\text{общ}})$. По Березину (1987, 1995) удельный объем общего порового пространства (Φ) $\Phi = (1/\rho_b - 1/\rho_s) = P_{\text{общ}}/\rho_b$, где ρ_b – плотность сложения почвы в целом. Отсюда $P_{ma} = P_{\text{общ}} - P_{\Sigma a} = \Phi \rho_b - \rho_s D(1 - \Phi \rho_b)$. Тогда удельный объем межагрегатной пористости $MA = P_{ma}/\rho_b = \Phi - \rho_s D(1/\rho_b - \Phi)$. Но $(1/\rho_b - \Phi) = 1/\rho_s$, откуда $MA = \Phi - D$. То есть удельный объем межагрегатного порового пространства есть разность между объемом общего порового пространства и текстурной пористостью (что очевидно) и, значит, при отсутствии специальных экспериментов с усадкой больших фрагментов почвы нет воз-

можности дифференцировать трещины от межагрегатной пористости расчетным путем. Маловероятной с физической точки зрения представляется гипотеза П.Н. Березина (1995) о постоянстве величины MA на протяжении всего цикла «усадки-набухания» и, соответственно возможность ее расчета по разности общей и текстурной пористости в набухом состоянии ($MA = \Phi_n - D_n$). Поэтому, повторяем, на данном этапе исследований нам не представляется возможным дифференцировать «внешнее» поровое пространство на межагрегатную пористость и трещины, и в дальнейших расчетах, вслед за исходной работой (Березин, 87) будем оперировать показателем общего объема трещин, межагрегатных пустот, каналов, макропор. Предлагаем называть его скважностью ($СК$) в память о великом русском агрофизике Алексее Григорьевиче Дояренко, впервые указавшем на определяющую роль порового пространства почвы в ее функционировании (Шеин, 2005). Согласно (Березин, 87):

$$СК = \Phi - D. \quad (11)$$

Так как измеряемой экспериментально характеристикой является величина D , для расчета $СК$ осталось определить удельный объем общего порового пространства (Φ). Примем, что формирование скважности при усадке (уплотнении) исходно однородного текстурного порового пространства происходит фрагментарно и сопровождается входом воздуха в двухфазную систему «почва-вода». Тогда, вслед за П.Н. Березиным (1987), можно предположить, что из-за просадки фрагментов в поле силы тяжести, трещины и иные элементы $СК$ реализуются лишь в боковых направлениях, а по вертикали они элиминируются. Это обстоятельство позволяет выразить уменьшение общего порового пространства (Φ) в зависимости от хода текстурной усадки следующим простым уравнением (Березин, 87):

$$\Phi = (D + 2D_{\text{тр}})/3, \quad (12)$$

где $D_{\text{тр}}$ – удельный объем текстурного порового пространства в предельном состоянии, когда усадка прекращается. В работе он оценивается экспериментально, с расчетом по формуле (2).

Имея экспериментальную зависимость текстурного порового пространства от влажности (8) и используя соответствующие формулы (11), (12), легко построить диаграммы структуры порового пространства (ДСП). На рис. 3 приведен пример ДСП для пахотного горизонта чернозема обыкновенного (Одесская обл.), построенная по экспериментальным данным (Березин, 95). По диаграмме видно, что текстурная (внутриагрегатная) пористость (I) для

неслитой окультуренной почвы превышает внешнее поровое пространство (скважность 3) в воздушно сухом состоянии почвы. Здесь и далее анализируется функциональное поровое пространство за вычетом «мертвого» объема прочносвязанной влаги W_a , показанного на диаграммах нижней пунктирной линией. При увлажнении почвы до величины наименьшей влагоемкости (полевой влагоемкости, или field water capacity в англоязычной агрофизической литературе), обозначенной на рисунке верти-

кальной пунктирной линией, это доминирование также сохраняется. Причем около 2/3 удельного объема агрегатных пор (4) будет занято водой (5). То есть пахотная окультуренная почва будет запасать значительную часть влаги в агрегатах, и вместе с тем будет хорошо аэрирована (30-35% воздуха). Очевидно, расчет удельного объема внутриагрегатных пор аэрации (ПА) легко осуществить по формуле:

$$ПА = D - W. \quad (13)$$

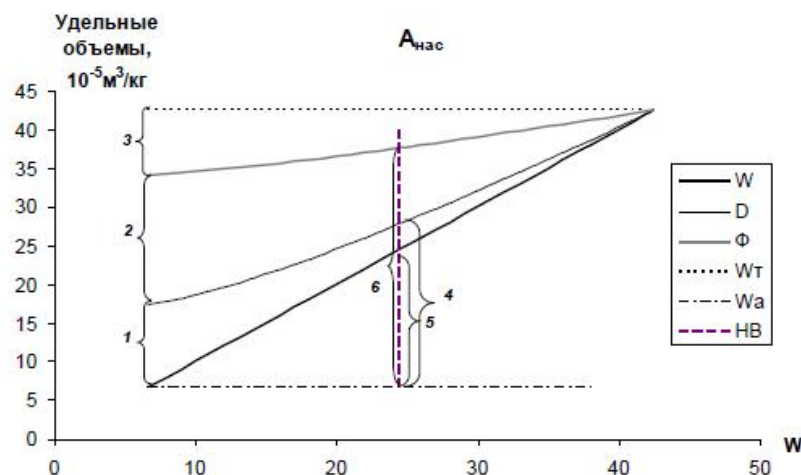


Рис. 3. Диаграмма структуры порового пространства горизонта $A_{\text{пах}}$ чернозема обыкновенного окультуренного. 1 — внутриагрегатные поры, 2 — скважность, 3 — просадка, 4 — общий объем пор агрегатов при HB, 5 — объем пор агрегатов, заполненных влагой при HB, 6 — общий объем пор в почве при HB.

Общий объем пор при HB (6) составляет порядка $50 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3/\text{кг}$, что соответствует плотности почвы равной $\rho_b = 1/(\Phi + 1/\rho_s) = 1131 \text{ кг}/\text{м}^3$, или $1,13 \text{ г}/\text{см}^3$, то есть нормальному неуплотненному состоянию. Общая пористость $P_{\text{общ}} = \Phi/\rho_b$ при HB будет равной 43,7%, в воздушно-сухом состоянии — 40,4%, а при насыщении влагой (максимальном набухании) — 50,2% или на границе удовлетворительного состояния по Качинскому (Вадюнина, Корчагина, 86). Это означает, что в такой почве механическая обработка может быть минимизирована, поскольку в процессе естественного цикла «набухания-усадки» почва приобретает приемлемые агрофизические свойства по уровню аэрации, проницаемости для корней и сохранения влаги.

Иная ситуация в исследуемом слитом предкавказском черноземе (рис. 4, табл. 3). Здесь во всех горизонтах скважность (2) в 1,3-1,6 раз превышала максимально возможное текстурное поровое пространство (3) в связи с сильной фрагментацией и растрескиванием почвы при высыхании. Значит, вместо агрономически-ценной рыхлой агрегатной структуры

в слитой черноземной почве будут формироваться прочные, не поддающиеся обработке глыбы с низкой внутренней (текстурной) пористостью и высокой, доминирующей скважностью в виде вертикальных трещин. Такая структура, очевидно, будет в сухом состоянии быстро проводить (сбрасывать) воду по трещинам и внешним каналам (макропорам), а при длительных осадках — сильно разбухать и лишать корней аэрации. Так, при влажности равной HB текстурное (внутриагрегатное) поровое пространство (4) будет на 85-88% насыщено влагой (5), а воздуха в нем будет всего 12-15%, что фактически означает условия анаэробности и угнетения роста корневых систем.

Общий объем порового пространства при влажности HB для всех генетических горизонтов, исключая насыпной, не превысил $30-32 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3/\text{кг}$, что соответствовало величинам плотности почвы $\rho_b = 1,47-1,50 \text{ г}/\text{см}^3$. В полярно противоположных состояниях — воздушно-сухом и максимально набухом — плотность была равной 1,53-1,56 и 1,39-1,40 $\text{г}/\text{см}^3$ соответственно. Согласно шкале А.Г. Бондарева (Шеин,

2005) для глинистых и суглинистых почв диапазон оптимальных значений плотности составляет $1,0-1,3 \text{ г/см}^3$, то есть исследуемая почва во всем диапазоне варьирования влажности является переуплотненной и без механической обработки ее нельзя вовлекать в сельскохозяйственное использование. Насыпной горизонт имеет несколько лучшие показатели: при НВ удельный общий объем порового пространства $\Phi=38 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3/\text{кг}$ с соответствующей равновесной плотностью $1,3 \text{ г/см}^3$, при размахе варьирования плотности от $1,23$ до $1,37 \text{ г/см}^3$ во всем диапазоне влажностей, то есть на границе начала переуплотнения по Бондареву. Однако другие показатели – низкое текстурное поровое пространство, высокая скважность и просадка (3) почвы (разница между Φ и объемом в текучем, предельно-набухшем состоянии W_p) указывают на неблагоприятные агрофизические свойства по причине развивающегося слитогенеза (рис. 4, табл. 3).

В диссертации (Березин, 95) разработаны бонитировочные шкалы для оценки потенциальной и актуальной слитости с использованием экспериментально определяемых физических характеристик (поверхностной энергии твердой фазы, E_s , количества прочносвязанной влаги – адсорбционной влагоемкости W_a , предела усадки по текстурной пористости, $D_{\text{тп}}$, коэффициента текстурной усадки K_a и иных показателей). Приведем эту разработку с небольшими нашими изменениями (дополнениями) в виде таблицы 4.

Сравнивая данные таблиц 3 и 4, можно установить, что исследуемый предкавказский чернозем является средне- ($A_{\text{нас}}$, $A1$, AB , $B2$, C) и слабоустойчивым ($B1$, BC) в отношении потенциальной слитости, что подтверждает ранее полученные морфологическую и химическую оценки слитогенеза. Вместе с тем анализ актуальной слитости показывает, что все исследованные горизонты предкавказского чернозема обладают сильной степенью слитости. По сравнению с ним обыкновенный окультуренный чернозем из Одесской обл. характеризуется отсутствием актуальной слитости, несмотря на близкую предрасположенность к слитогенезу (категория средней устойчивости). Это, скорее всего, означает, что исследуемый предкавказский чернозем приобрел высокую степень слитости вследствие антропогенной нагрузки в ходе интенсивной сельскохозяйственной эксплуатации без должной заботы об окультуривании. Наиболее вероятными причинами здесь

могли быть интенсивное орошение, частая междообработка и уплотнение техникой, использование только минеральных удобрений (электролитов) без органических веществ, на что, в частности, указывает невысокое содержание гумуса.

Возможно ли восстановление слитых черноземных почв и оптимизация их неблагоприятных физических свойств? В сложившейся системе «интенсивного земледелия», слепо перенесенной из зарубежных стран с малогумусными в былом лесными почвами достаточно легкого гранулометрического состава, и направленной лишь на получение высоких урожаев, – категорически нет. Готовых рецептов (технологий) по восстановлению и оптимизации таких почв фактически не существует, о чем свидетельствует их значительное распространение по всему миру (см. Введение). Простым внесением органических удобрений и почвоулучшителей, здесь, по-видимому, тоже ничего не добьешься, поскольку их просто невозможно будет равномерно смешать с глыбами, возникающими при механической обработке слитых почв. Да и тот факт, что слитогенез охватывает всю почвенную толщу, означает, что надеяться на скорый процесс восстановления здесь не приходится.

По-видимому, нужен комплекс технологий органического (почвосберегающего) земледелия с обязательным вовлечением слитых почв в стадии залежей (степных экологических коридоров) и пастбищ с травянистой растительностью с глубокой корневой системой (Смагин, 2011). На это время восстанавливаемая часть почв агрохозяйства не должна обрабатываться тяжелой техникой и орошаться, за исключением, быть может, специальных форм поливов с внесением ионов кальция и иных стабилизаторов структуры. Перспективным методом химической мелиорации, на наш взгляд, здесь может быть внесение фосфогипса, как коагулятора, содержащего ионы кальция. Патентованные разработки и рекомендации по использованию фосфогипса и сложных компостов на его основе в почвосберегающих технологиях для черноземов Краснодарского края осуществляются творческим коллективом КубГАУ под руководством проф. И.С. Белюченко (Муравьев, Белюченко 2008; Белюченко, 2009, 2012). При этом параллельно решается задача утилизации отходов Беплореченского химкомбината в виде залежей фосфогипса.

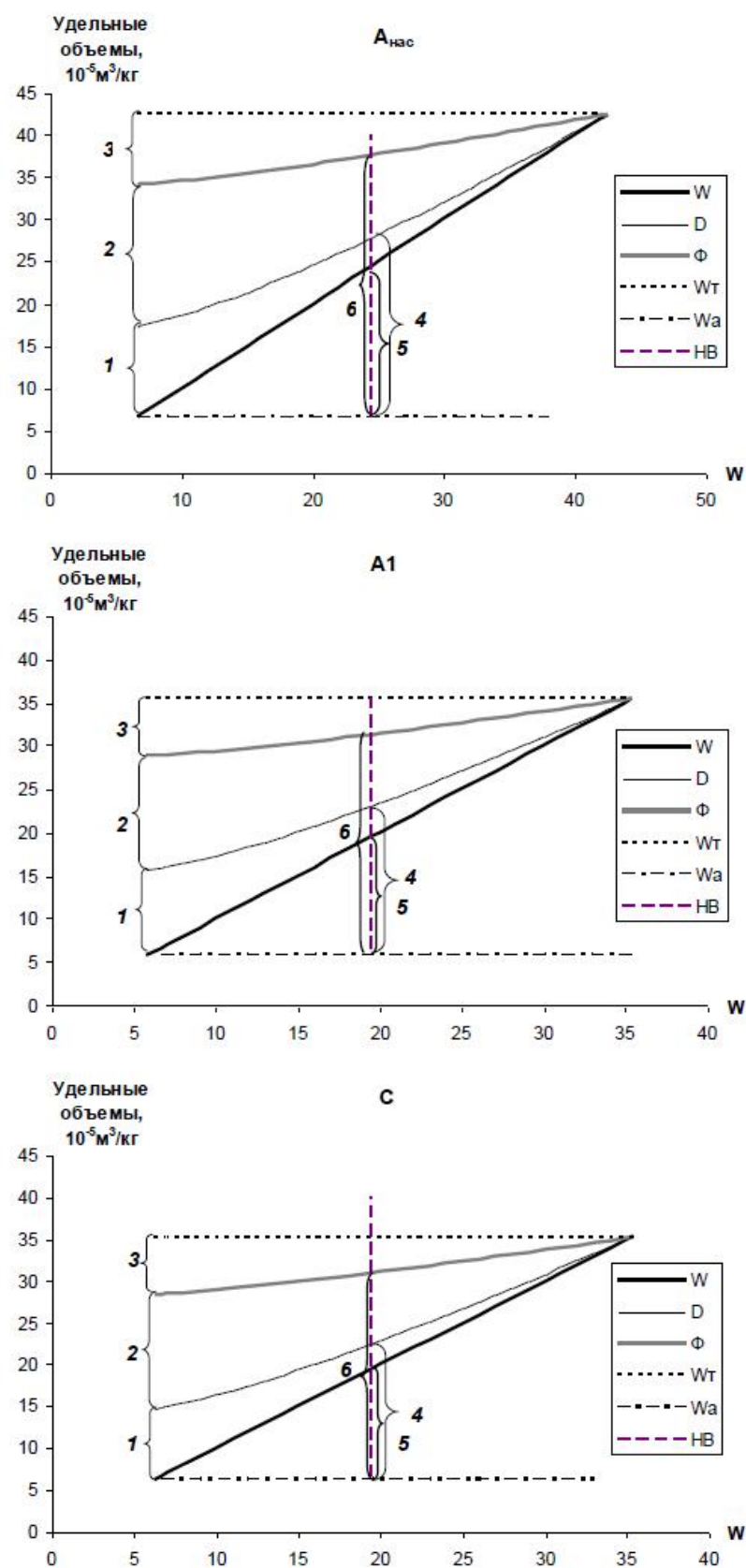


Рис. 4. Диаграммы структуры порового пространства горизонтов слитого предкавказского чернозема (усл. обозначения см., рис. 3).

Таблица 3. Характеристики структуры порового пространства почв.

Горизонт	ρ_s , г/см ³	E_s , Дж/кг	W_a , %	$D_{пр}$, 10 ⁻⁵ м ³ /кг	K_a	W_t , %	СК/Ф*
Чернозем обыкновенный (Одесская обл.)							
$A_{пах}$	2,57	79,6	7,02	31,0	0,68	54,9	33,4
Чернозем предкавказский слитой (Белореченск)							
$A_{нас}$	2,57	83,3	6,65	16,3	0,85	42,5	50,2
A1	2,74	102,4	5,74	14,8	0,83	35,4	45,7
AB	2,75	96,8	7,13	16,3	0,85	42,5	50,2
B1	2,85	151,3	5,56	14,8	0,83	35,4	45,0
B2	2,56	101,4	6,02	13,6	0,85	35,1	47,6
BC	2,75	122,4	6,15	13,6	0,85	35,1	47,6
C	2,80	94,2	6,21	13,6	0,85	35,1	47,6

*отношение скважности к общему объему порового пространства в воздушно-сухом состоянии почвы

Таблица 4 Оценка потенциальной и актуальной слитости тяжелых почв по (Березин, 95) с авторскими дополнениями.

Потенциальная слитость

E_s , Дж/кг	Балл	W_a , % или 10 ⁻⁵ м ³ /кг	Балл	Сумма баллов	Категория потенциальной слитости
<60	1	<4	1	≤4	устойчива
61–80	2	5–6	2		
81–100	3	7–8	3	5–6	среднеустойчива
101–120	4	9–10	4	7–8	слабоустойчива
>121	5	>10	5	>8	слитогенная

Актуальная слитость

$D_{пр}$, 10 ⁻⁵ м ³ /кг	Балл	K_a	Балл	СК/Ф*, %	Балл	Сумма баллов	Категория актуальной слитости
>30	1	<0,50	1	<30	1	≤6	отсутствие слитости
26–30	2	0,50–0,70	2	31–40	2		
20–25	3	0,71–0,80	3	40–45	3	7–10	слабая слитость
17–19	4	0,81–0,90	4	46–50	4	10–12	средняя слитость
<17	5	>0,90	5	>50	5	>12	сильная

* – см. примечание к табл. 3.

Отметим также, что почвосберегающие технологии возможны только для больших агрохозяйств, сочетающих зерноводство и животноводство с территорией, достаточной для периодического вывода из севооборота и, конечно, при условии государственной поддержки в первую очередь в виде блокирования конкуренции со стороны дешевой и некачественной зарубежной продукции, а также в виде организации сбыта на внутреннем рынке и пропаганды среди населения страны сельхозпродуктов отечественного производства. Высокое качество и экологическая безопасность последних гарантируется их получением на базе органического земледелия русских черноземов – уникальных почв с самым высоким уровнем естественного плодородия. И задача сохранения этих почв для наших потомков в настоящее время должна стать столь же актуальной государственной задачей, как прорыв в индустриальных, космических или военных технологиях современной России.

ЛИТЕРАТУРА

- Аринушкна Е.В. Руководство по химическому анализу почв. – М.: Изд-во Моск. Ун-та, 1961. – 492 с.
- Белюченко И.С. Использование фосфогипса для рекультивации чернозема обыкновенного в степной зоне Кубани // В сб. «Проблемы рекультивации отходов быта, промышленного и сельскохозяйственного производства». – Краснодар: КубГАУ, 2009. – С. 54–59.
- Белюченко И.С. Сложный компост и его роль в улучшении почв // Экологический Вестник Сев. Кавказа. – 2012. – Т. 8. – № 2. – С. 75–86.
- Березин П.Н. Структурно-функциональные и гидрофизические свойства набухающих почв // В сб. «Современные физические и химические методы исследования почв». – М.: Изд-во Моск. Ун-та, 1987. – С. 20–46.
- Березин П.Н. Структура и гидрофизика набухающих почв как систем с переменным

поровым пространством. Автореф. дисс. ... д-ра биол. наук. – М., 1995. – 51 с.

Быстрицкая Т.Л., Тюрюканов А.Н. Черные слитые почвы Евразии. – М.: Наука, 1971. – 256 с.

Вадюнина А.Ф., Корчагина З.Ф. Методы исследования физических свойств почвы. – М.: Агропромиздат, 1986. – 416 с.

Воронин А.Д. Структурно-функциональная гидрофизика почв. – М.: Изд-во Моск. Ун-та, 1984. – 204 с.

Воронин А.Д., Березин П.Н., Шеин Е.В., Гудима И.И. Методы и приборы для оценки структурных и гидрофизических свойств почв // В сб. «Современные физические и химические методы исследования почв». – М.: Изд-во Моск. Ун-та, 1987. – С.3-20.

Злочевская Р.И., Алексеенко Г.Л. Физико-химические процессы при уплотнении водонасыщенных глин // В сб. «Связанная вода в дисперсных системах». – М.: Изд-во Моск. Ун-та, 1977. – С.16-34.

Злочевская Р.И., Дивисилова В.И. Зависимость набухаемости глин от температуры // В сб. «Связанная вода в дисперсных системах». – М.: Изд-во Моск. Ун-та, 1977. – С.59-68.

Зонн С.В. Тропическое почвоведение. – М.: Изд-во Ун-та Дружбы народов, 1986. – 400 с.

Классификация и диагностика почв СССР. – М.: «Колос», 1977. – 225 с.

Муравьев Е.И., Белюченко И.С. Свойства фосфогипса и возможность его использования в сельском хозяйстве // Экологический вестник Сев. Кавказа. 2008, т. 4, № 2. С. 5-17.

Основы экологического мониторинга (практическое пособие для бакалавров) / пред. проф. И.С. Белюченко и проф. А.В. Смагина. – Краснодар.: КубГАУ, 2012. 252 с.

Розанов Б.Г. Почвенная номенклатура на русском и иностранном языках – М.: МГУ, 1974, 275 с.

Ролдугин В.И. Борис Владимирович Дерягин (1902-1994) // Рос. хим. ж. (Ж. Рос. хим. об-ва им. Д.И. Менделеева), 2006, т. L, №5. С. 134-137.

Смагин А.В. Теория и методы оценки физического состояния почв. // Почвоведение, 2003, №3. С.328-341.

Смагин А.В., Манучаров А.С., Садовникова Н.Б., Харитонов Г.В., Костарев И.А. Влияние поглощенных катионов на термодинамическое состояние влаги в глинистых минералах // Почвоведение, 2004, № 5. С. 551-555.

Смагин А.В. Почвенно-гидрологические константы: физический смысл и количествен-

ная оценка на базе равновесного центрифугирования // Доклады по экологическому почвоведению, 2006, вып. 1, №1. С. 31-56.

Смагин А.В., Садовникова Н.Б., Глаголев М.В., Кириченко А.В. Новые инструментальные методы и портативные электронные средства контроля экологического состояния почв и сопредельных сред // Экологический вестник Сев. Кавказа, 2006, т.2, №1. С.5-16.

Смагин А.В. Экспериментальная оценка энергетических показателей молекулярных взаимодействий в почвах // Коллоидн. журн., 2008, т.70, №4. С. 515-519.

Смагин А.В., Кольцов И.Н., Пепелов И.Л., Кириченко А.В., Садовникова Н.Б., Кинжаев Р.Р. Физическое состояние почвоподобных тонкодисперсных систем на примере буровых шламов // Почвоведение, 2011, №2. С. 179-189.

Смагин А.В. Современные проблемы черноземной зоны и возможные пути их решения // Экологический вестник Сев. Кавказа, 2011, т.7, №4. С. 8-25.

Смагин А.В. Теория и практика конструирования почв. – М.: Изд-во Моск. Ун-та, 2012, 544 с.

Судницын И.И. Движение почвенной влаги и водопотребление растений. – М.: Изд-во Моск. Ун-та, 1979. 254 с.

Судницын И.И., Смагин А.В., Шваров А.П. Учение Максвелла-Больцмана-Гельмгольца-Гуи о двойном электрическом слое дисперсных систем и его использование в почвоведении (К 100-летию публикации работы Гуи) // Почвоведение, 2012, № 4. С. 507 – 512

Теории и методы физики почв. – М.: «Гриф и К», 2007. 616 с.

Уваров В.И. О происхождении слитых почв // Почвоведение, 1986, №3. С. 118-128.

Шеин Е.В. Курс физики почв. – М.: Изд-во Моск. Ун-та, 2005. 432 с.

Dudal R. Dark Glay Soils of Tropical and Sub-Tropical Regions. – FAO Agric. Dev. Pap. 83, 1965. 161 pp.

Zech W., Hintermaier-Erhard G. Böden der Welt. – Elsevier GmbH, Spektrum Akademischer Verlag Heidelberg, 2002. 120 pp.

LITERATURA

Arinushkna E.V. Rukovodstvo po himicheskomu analizu pochv. – М.: Изд-во Моск. Ун-та. 1961. 492 с.

Beljuchenko I.S. Ispol'zovanie fosfogipsa dlja rekul'tivacii chernozema obyknovennogo v stepnoj zone Kubani // – v sb. «Problemy rekul'ti-

vacii othodov byta, promyshlennogo i sel'skoho-zhajstvennogo proizvodstva» Krasnodar: KubGAU, 2009. S. 54-59.

Beljuchenko I.S. Slozhnyj kompost i ego rol' v uluchshenii pochv // *Jekologicheskij Vestnik Sev. Kavkaza*, 2012, t.8, № 2. S. 75-86.

Berezin P.N. Strukturno-funkcional'nye i gidrofizicheskie svojstva nabuhajushhih pochv. // v sb. «Sovremennye fizicheskie i himicheskie metody issledovanija pochv». – M.: Izd-vo Mosk. Un-ta. 1987. S. 20-46.

Berezin P.N. Struktura i gidrofizika nabuhajushhih pochv kak sistem s peremennym porovym prostranstvom. Avtoref. diss. d-ra biol. nauk. – M. 1995. 51 s.

Bystrickaja T.L., Tjurjukanov A.N. Chernye slitye pochvy Evrazii. – M.: Nauka, 1971. 256 s.

Vadjunina A.F. Korchagina Z.F. Metody issledovanija fizicheskikh svojstv pochvy. – M.: Agropromizdat, 1986. 416 s.

Voronin A.D. Strukturno-funkcional'naja gidrofizika pochv. – M.: Izd-vo Mosk. Un-ta. 1984. 204 s.

Voronin A.D., Berezin P.N., Shein E.V., Gudima I.I. Metody i pribory dlja ocenki struktury i gidrofizicheskikh svojstv pochv // v sb. «Sovremennye fizicheskie i himicheskie metody issledovanija pochv». – M.: Izd-vo Mosk. Un-ta. 1987. S.3-20.

Zlochevskaja R.I., Alekseenko G.L. Fizi-khimicheskie processy pri uplotnenii vodonasys-hennyh glin // v sb. «Svjazannaja voda v dispersnyh sistemah». – M.: Izd-vo Mosk. Un-ta, 1977. S.16-34.

Zlochevskaja R.I., Divisilova V.I. Zavisi-most' nabuhaemosti glin ot tem-peratury // v sb. «Svjazannaja voda v dispersnyh sistemah». – M.: Izd-vo Mosk. Un-ta, 1977. S.59-68.

Zonn S.V. Tropicheskoe pochvovedenie. – M.: Izd-vo Un-ta Druzhby narodov, 1986. 400 s.

Klassifikacija i diagnostika pochv SSSR. – M.: «Kolos», 1977. 225 s.

Murav'ev E.I., Beljuchenko I.S. Svojstva fosfogipsa i vozmozhnost' ego ispol'zovanija v sel'skom hozjajstve // *Jekologicheskij vestnik Sev. Kavkaza*, 2008, t. 4, № 2. S. 5-17.

Osnovy jekologicheskogo monitoringa (prakticheskoe posobie dlja bakalavrov) p/red prof. I.S. Beljuchenko i prof. A.V. Smagina. – Krasnodar.: KubGAU, 2012. 252 s.

Rozanov B.G. Pochvennaja no-menklatura na russkom i inostrannom jazykah – M.: MGU, 1974, 275 s.

Roldugin V.I. Boris Vladimirovich Derjagin (1902-1994) // *Ros. him. zh. (Zh. Ros. him. ob-va im. D.I. Mendeleeva)*, 2006, t.L, №5. S. 134-137.

Smagin A.V. Teorija i metody ocenki fizi-cheskogo sostojanija pochv. // *Pochvo-vedenie*, 2003, №3. S.328-341.

Smagin A.V., Manucharov A.S., Sadovnikova N.B., Haritonova G.V., Kostarev I.A. Vlijanie pogloshhennyh kationov na termodinamicheskoe sostojanie vlagi v glinistyh mineralah // *Pochvovedenie*, 2004, № 5. S. 551-555.

Smagin A.V. Pochvenno-gidrologicheskie konstanty: fizicheskij smysl i kolichestvennaja ocenka na baze ravnovesnogo centrifugirovanija // *Doklady po jekologicheskomu pochvovedeniju*, 2006, vyp. 1, №1. S. 31-56.

Smagin A.V., Sadovnikova N.B., Glagolev M.V., Kirichenko A.V. Novye instrumental'nye metody i portativnye jelektronnye sredstva kontrolja jekologicheskogo sostojanija pochv i sopredel'nyh sred // *Jekologicheskij vestnik Sev. Kavkaza*, 2006, t.2, №1. S.5-16.

Smagin A.V. Jeksperimental'naja ocenka je-nergeticheskikh pokazatelej mole-kuljarnyh vzai-modejstvij v pochvah // *Kollo-idn. zhurn.*, 2008, t.70, №4. S. 515-519.

Smagin A.V., Kol'cov I.N., Pepelov I.L., Kirichenko A.V., Sadovnikova N.B., Kinzhaev R.R. Fizicheskoe sostojanie pochvopodobnyh tonkodispersnyh sistem na primere burovnyh shlamov // *Pochvovedenie*, 2011, №2. S 179-189.

Smagin A.V. Sovremennye problemy chernozemnoj zony i vozmozhnye puti ih reshenija // *Jekologicheskij vestnik Sev. Kavkaza*, 2011, t.7. №4. S. 8-25.

Smagin A.V. Teorija i praktika konstruirovaniya pochv. – M.: Izd-vo Mosk. Un-ta, 2012, 544 s.

Sudnicyn I.I. Dvizhenie pochvennoj vlagi i vodopotreblenie rastenij. – M.: Izd-vo Mosk. Un-ta, 1979. 254s.

Sudnicyn I.I., Smagin A.V., Shvarov A.P. Uchenie Maksvella-Bol'cmana-Gel'mgol'ca-Gui o dvojnomo jelektricheskom sloe dispersnyh sistem i ego ispol'zovanie v pochvovedenii (K 100-letiju publikacii raboty Gui) // *Pochvovedenie*, 2012, № 4. S. 507 – 512

Teorii i metody fiziki pochv. – M.: «Grif i K», 2007. 616 s.

Uvarov V.I. O proishozhdenii slityh pochv // *Pochvovedenie*, 1986, №3. S 118-128.

Shein E.V. Kurs fiziki pochv. – M.: Izd-vo Mosk. Un-ta, 2005. 432 s.

Dudal R. Dark Glay Soils of Tropical and Sub-Tropical Regions. – FAO Agric. Dev. Pap. 83, 1965. 161 pp.

Zech W., Hintermaier-Erhard G. Böden der Welt. – Elsevier GmbH, Spektrum Akademischer Verlag Heidelberg, 2002. 120 pp.