

УДК 631.43

ОСОБЕННОСТИ ЧЕРНОЗЕМНЫХ ПОЧВ РАЙОНА ХОПЕРСКОГО ГЛУБИННОГО РАЗЛОМА ЗЕМНОЙ КОРЫ¹

© 2020 г. Н. И. Суханова^{а, *}, С. Я. Трофимов^а, А. Л. Степанов^а, А. В. Кирюшин^а

^аМГУ им. М.В. Ломоносова, Ленинские горы, 1, Москва, 119991 Россия

*e-mail: vogudin@yandex.ru

Поступила в редакцию 30.01.2019 г.

После доработки 21.05.2019 г.

Принята к публикации 20.06.2019 г.

Исследованы химические свойства черноземных почвы, подвергающихся воздействию глубинного водородного флюида (Воронежская область, Россия). Показано, что черноземы обыкновенные в зонах локального выделения эндогенного водорода меняют свойства в результате формирования интенсивного восстановительного режима, обусловленного потоком водородного флюида. Резко увеличивается кислотность почвенного профиля, исчезают карбонатные новообразования, профиль становится полностью промытым от карбонатов, увеличивается содержание подвижного железа. При увеличении общего содержания гумуса происходит осветление гумусового горизонта из-за резкого изменения состава гумуса в сторону фульватности. Почвы теряют плодородие, урожай на таких территориях может снижаться на 30–40%. В западинах с временным переувлажнением восстановительные процессы в почвах усиливаются.

Ключевые слова: чернозем обыкновенный, дегазация, молекулярный водород, гумус

DOI: 10.31857/S0032180X20020124

ВВЕДЕНИЕ

Одним из малоизученных факторов, влияющих на экологическое состояние окружающей среды, является дегазация земли. Особое место занимает глубинный водород – наименее изученный, но определяющий компонент газового земного флюида. Дегазация осуществляется в зонах глубинных разломов и их узлов, которые являются каналами, через которые (из-за малого размера и очень высокой скорости диффузии) водород выходит на поверхность. Водородный флюид создает в зоне инфильтрации пористость в карбонатных толщах осадочных пород, перекрывающих разломы, и образует на поверхности особые западины и их скопления [17, 24, 29, 34, 35]. Они хорошо видны на космических снимках и отличаются от понижений, сформированных только водой, правильной круглой формой и необычными почвенными свойствами. По свидетельству геологов и результатам полевой водородометрии установлено, что поток водородного флюида непостоянен в пространстве и во времени и подчиняется космическим ритмам, связанным с характером движения Земли в околосолнечном пространстве. Известны сезонные периоды (май–июнь и октябрь–

декабрь), обусловленные внутригодовыми изменениями скорости вращения Земли, суточные и полусуточные (вращение Земли вокруг собственной оси) и периоды лунных фаз, связанные с гравитационным воздействием Луны на земное ядро [17, 21, 26, 27]. Со временем западины развиваются – от начальной стадии формирования, когда понижения поверхности практически нет, до “старения”, когда понижение существенное, и в западине при достаточном количестве осадков может сформироваться болото или озеро.

Такие участки встречаются практически на всех континентах. Они обнаружены в Германии, США, Канаде, Аргентине, Бразилии, Польше, Белоруссии, Украине, Казахстане, Австралии, Африке, Монголии. В России скопления водородных западин замечены в Воронежской, Липецкой, Волгоградской, Московской областях, на севере Западной Сибири и др. [17, 21, 26, 27, 29, 35, 38].

Территории с выходами водорода часто охватывают большие площади, а плотность водородных западин может составлять от 15 до 50% и более. Если выходы водорода осуществляются на мало используемых человеком территориях, то речь может идти об экологической безопасности (например, лесные пожары в труднодоступных местах часто связывают с дегазацией и др.). Но

¹ К статье имеются дополнительные материалы, доступные для авторизированных пользователей по doi: 10.1134/S0032180X20020124.

особо актуальным является изучение влияния водородного флюида на плодородные почвы пашни, например, в Воронежской, Липецкой, Волгоградской областях нашей страны. В процессе прохождения потоков водорода через почвенную толщу его содержание в почвенном воздухе значительно превышает обычные для почвенных условий концентрации образующегося биогенным путем водорода. На отдельных участках концентрация водорода в подпочвенном воздухе на глубине 120 см, измеренная методами полевой водородометрии, достигает 1.6 об. % и более [33, 34]. Это обстоятельство может кардинально менять условия почвообразования за счет влияния газообразного водорода на окислительно-восстановительный режим почв и почвообразующих пород, гумусообразование, микробиологические процессы, о чем имеются лишь фрагментарные данные. Урожай на таких территориях может снижаться на 30–40%.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

К территориям с большой плотностью выходов водорода относится участок в районе коленообразного поворота долины р. Хопер в северо-восточной части Воронежской области (Хоперский глубинный разлом, левобережье р. Хопер в окрестностях г. Поворино, Борисоглебск, Новохоперск) общей площадью около 3600 км². В почвенном отношении это зона распространения черноземов обыкновенных, которые интенсивно используются в сельском хозяйстве. Водораздельная часть слабоволнистая. На поверхности выходящие струи водородного флюида из недр земли формируют круглые понижения (западины) правильной формы диаметром от нескольких метров до 3 км и разной глубины [32, 36].

Во всех исследованных западинах (более двух десятков) отмечена значительная концентрация водорода на глубине 120 см, в период исследования она составляла в среднем 0.65 об. %, что намного превышает обычные концентрации в почвенном воздухе. Вне западины измеренная концентрация водорода была обычной, такой же, как в атмосферном воздухе (несколько ppm). Неглубокие западины (или осветленные пятна округлой формы при начальной стадии формирования западин) вовлечены в пахотные угодья. Имея такую необычно правильную форму и заметную осветленность верхнего гумусового горизонта, западины хорошо дешифрируются на космических снимках [25, 32]. Маленькие западины на полях на весенних снимках, когда почва распаханна и еще не засеяна, видны как сплошные светлые пятна круглой формы на фоне темной окружающей их пашни, более крупные формы выделяются как осветленные круги. Более глубокие формы исключены из сельскохозяйственного ис-

пользования и часто представляют собой сильно заросшие растительностью участки, обособленные от окружающей пашни.

На этой территории, на водораздельной части выбраны почвы двух водородных западин разного размера. Поскольку западины расположены на расстоянии друг от друга, разрезы закладывали в западине и на окружающем ее черноземе.

Первая западина (I) имеет правильную круглую форму размером около 100 м, глубиной 0.6 м. Западина исключена из сельскохозяйственного использования, но когда-то (около 15 лет назад) пахалась, в профиле наблюдается старый пахотный горизонт. В настоящее время это залежный участок, зарастающий лугово-степной растительностью с редким кустарником. Разрезы заложены на дне (разрез 1) и на периферии западины (разрез 2). Почва, окружающая западину (фоновая) — чернозем обыкновенный легкосуглинистый (разрез 3). Описание разрезов представлено в дополнительных материалах.

Поток молекулярного водорода измеряли непосредственно в поле переносным газоанализатором водорода ВГ-3В (Россия). Общее содержание гумуса определяли по методу Тюрина, рН — потенциометрически. Для оценки изменений в составе гумуса использовали однократную щелочную пирофосфатную вытяжку с разделением ее на щелочно- и кислотноразрушимые группы (ГК и ФК), но без последующего разделения этих групп на фракции. Выделение и очистку препаратов гуминовых кислот проводили по методу Международного гуминового общества (IHSS). Элементный состав гуминовых кислот определяли традиционным методом [20]. Содержание несиликатного железа — по Мера—Джексону, аморфного железа — методом Тамма. Светлоту почвенных проб (L) определяли по международной системе цветности на компьютеризированном спектроколориметре “Пульсар”.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Полевое морфологическое описание исследуемых западин свидетельствует о том, что эти почвы необычны.

Западина I

Западина I имеет некоторый водосбор и кратковременное весеннее переувлажнение. Обычно в таких условиях рельефа в западинах, сформированных водой без выхода эндогенного водорода, формируются почвы полугидроморфного ряда, свойства которых хорошо изучены в разных природных зонах [1, 5, 6, 16, 18, 19, 23].

В нашем случае по морфологическим показателям почвы дна западины (разр. 1) видно, что в ней сильно проявлены восстановительные про-

цессы. Почва имеет резко дифференцированный профиль, в котором хорошо сформированы элювиальный и иллювиальный горизонты, и четко видны морфохроматические признаки оподзоливания и оглеения. В цветовом профиле присутствуют и сизоватый оттенок (в горизонте АЕ) и светлые пятна кремнезема (в горизонте Е) и рыжие пятна аморфной гидроокиси железа (в горизонтах Е, В). В нижней части горизонта В присутствуют ортштейны. Однако в профиле почв нет карбонатных новообразований, что резко отличает их от хорошо изученных полугидроморфных почв степи, профиль полностью промыт от карбонатов. Верхний гумусный горизонт по сравнению с окружающим черноземом осветлен, что фиксируется даже невооруженным взглядом. Кроме того, обращают на себя внимание ярко выраженные мощные гумусовые кутаны по граням структурных отдельностей, прослеживаемые до большой глубины и свидетельствующие о значительной подвижности гумуса.

Почва на границе западины (разр. 2) по морфохроматическим показателям мало отличается от окружающего чернозема, за исключением того, что в профиле нет карбонатного горизонта. Почва также полностью промыта от карбонатов, по граням структурных отдельностей наблюдается слабая кремнеземистая присыпка, а в нижней части горизонта В встречаются одиночные железо-марганцевые примазки. Кутаны отсутствуют. То есть в почве присутствуют восстановительные процессы, но они проявлены не так сильно, как в почве дна западины. Почва, окружающая западину, — чернозем обыкновенный с типичным морфологическим профилем (разр. 3).

Западина II

Почва в западине (разр. 4) по морфохроматическим показателям отличается от окружающего чернозема (разр. 5) тем, что верхний гумусный горизонт осветлен, что видно даже невооруженным глазом, в профиле полностью отсутствуют карбонатные новообразования, нет вскипания по разрезу. В остальном почвенный профиль визуально неотличим от профиля окружающего западину чернозема обыкновенного легкосуглинистого. Западина столь мала, что вряд ли весенние воды могут собраться в ней количестве, значимо влияющем на почвенные свойства, в частности на промытость от карбонатов, а летние дожди в этой климатической обстановке и при отсутствии водоупора не приводят к вымочке посевов.

Химические свойства

Химические свойства почв западин необычны. По содержанию гумуса почвы большой западины I резко отличаются от почв окружающей пашни

(рис. 1). В верхних гумусных горизонтах почв дна западины его содержание вдвое больше, чем в соответствующих горизонтах чернозема. Причина этого понятна. Дно западины в настоящее время представляет собой залежь, в которой поступление растительных остатков значительно больше. Вероятно, и условия для гумусообразования лучше в результате дополнительного поступления влаги. Нельзя исключать и сток обогащенного гумусом мелкозема с тальными водами и, возможно, в результате воздушного переноса пыли.

В почвах границы большой западины I содержание гумуса меньше, чем в почвах дна, но значительно больше, чем в окружающем черноземе. Увеличение содержания гумуса не вызывает удивления, поскольку по классическим представлениям [2, 7, 10, 11, 28] в условиях кратковременного весеннего переувлажнения в степной зоне в формирующихся лугово-черноземных, черноземно-луговых почвах обычно увеличивается содержание гумуса в верхнем дневном горизонте. Однако величины рН в почвах западины не характерны для почв, сформированных действием только воды. Реакция среды в исследуемых западинах с выходом молекулярного водорода очень кислая по всему почвенному профилю и колеблется в профиле почвы дна западины от 4.17 до 5.03. В почвах границы западины величина рН несколько выше (6.14–6.23), но в нижней части профиля, что также необычно, снижается до 5.71. Это резко отличает их от почв окружающего чернозема и от почв, подвергающихся воздействию только временного избыточного переувлажнения в степной зоне. В последних величины рН могут несколько снижаться в верхнем горизонте, но не так значительно, и их динамика по профилю практически аналогична черноземам.

Почвы малой западины II по содержанию гумуса незначительно отличаются от почв окружающего чернозема, если и прослеживается некоторое увеличение гумуса, то на уровне ошибки (рис. 2). Западина очень маленькая, обусловленные в ней рельефом гидротермические условия, в которых формируется почва, в частности гумус, практически не отличаются от условий окружающего чернозема. Однако величины рН в почве западины в отличие от содержания гумуса очень низкие по всему почвенному профилю (4.87–5.37).

Несмотря на существенное увеличение содержания гумуса, как в почве большой западины или незначительное, как в малой западине, верхний горизонт почв значительно светлее, чем в фоновых аналогах (табл. 1). То есть осветленность верхних гумусовых горизонтов не определяется содержанием в них гумуса, а зависит от его состава.

На данном этапе развития науки исчерпывающей теории формирования окраски гумусовых веществ не создано. Однако известно, что их тем-

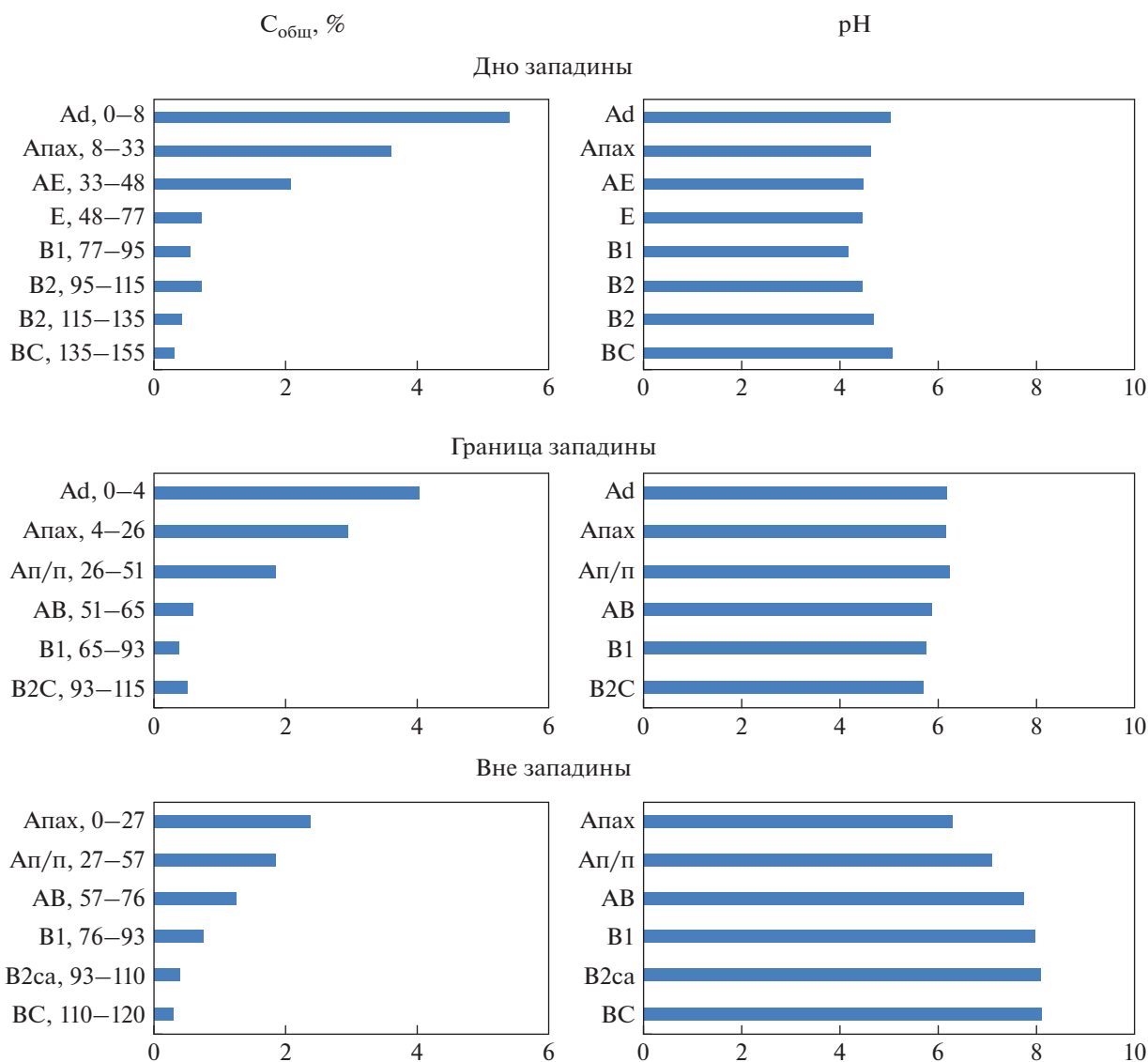


Рис. 1. Общее содержание органического углерода и величина pH в почвах большой западины I.

ная окраска определяется наличием сопряженных двойных углерод-углеродных связей, которые присутствуют не только в ароматическом блоке, но и в периферии, в алифатической части гумуса, которая также вносит некоторую долю в окраску гумусовых веществ.

Для выявления особенностей состава гумуса посчитали возможным использовать однократную щелочную пирофосфатную вытяжку, предложенную Кононовой и Бельчиковой, с разделением ее на щелочно- и кислоторастворимые группы (ГК и ФК), но без последующего разделения этих групп на фракции, которая позволяет оценить наиболее трансформируемую часть гумуса, включающую свободные и связанные гумусовые кислоты с несиликатными формами железа и алюминия, а также с кальцием [3]. Существу-

ют дискуссионные мнения, что в пирофосфатно-щелочную вытяжку могут частично переходить гумусовые вещества и из других фракций [31]. Учитывая, что есть теоретические и экспериментально подтвержденные представления о связи содержания групп гуминовых кислот (ГК) и фульвокислот (ФК) с условиями почвообразования, с подвижностью и устойчивостью гуминовых веществ и др., полагаем (с долей условности), что щелочная вытяжка это та их часть, которая наиболее подвержена изменениям при смене почвенных режимов. Следовательно, изменение окраски гумусового горизонта черноземов, вероятно, в большой степени зависит от ее количества и структурной организации.

В составе гумуса в верхнем горизонте почв западины I увеличивается его легкотрансформиру-

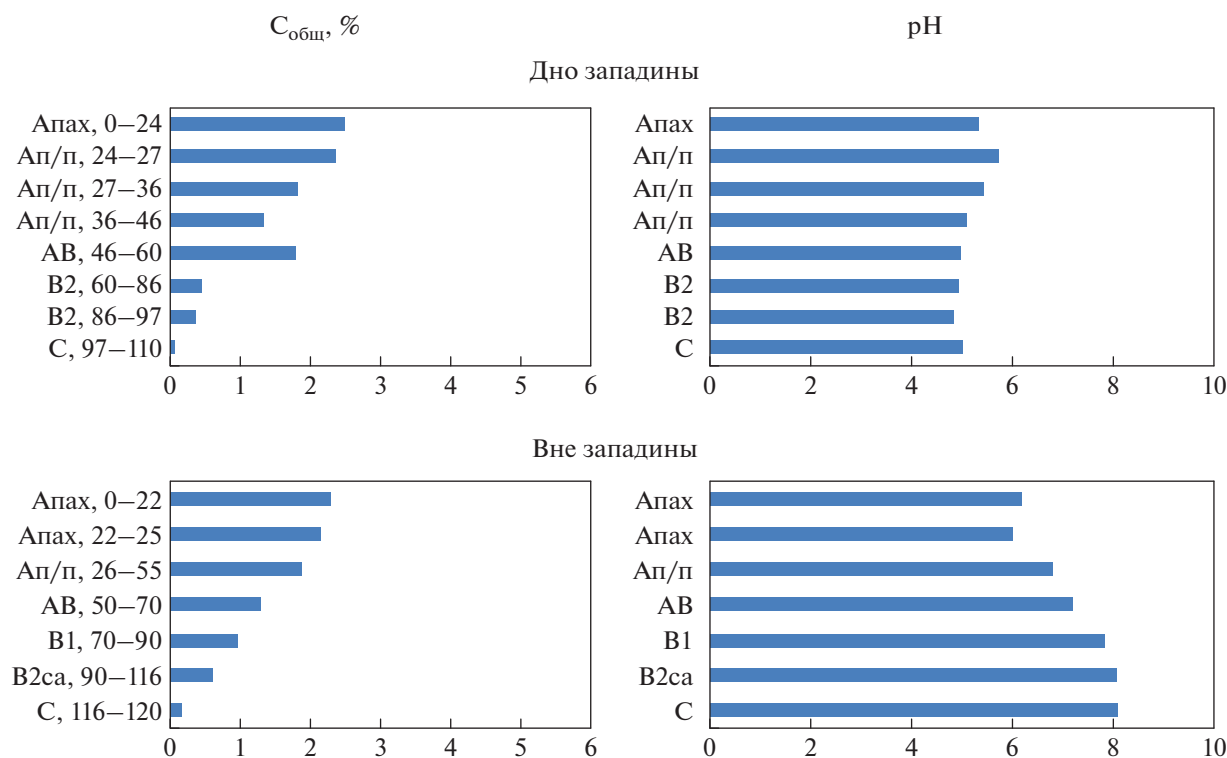


Рис. 2. Общее содержание органического углерода и величины рН в почвах малой западины II.

емая часть (ГК + ФК пирофосфатной вытяжки – 37–40% от $C_{\text{общ}}$), причем в основном за счет существенного преобладания (втрое и более) в ней группы ФК (30–34% от $C_{\text{общ}}$). В то время как в верхнем горизонте окружающего чернозема содержание (ГК + ФК) вдвое меньше – 18%, и соотношение ГК и ФК в этой части гумуса характеризуется примерно равными долями (рис. 3). В малой западине, где практически нет переувлажнения, наблюдаются примерно те же закономерности (рис. 4) – значения трансформируемой части гумуса в целом много выше, чем в черноземе, а в ее составе содержится значительно больше фульвокислот. Известно, что в зональных черноземных почвах оптическая плотность выделенных фульвокислот в 10 раз меньше оптической плотности гуминовых кислот, а, следовательно, окраска их значительно светлее. Кроме того, следует отметить, что интенсивность светопоглощения фульвокислот снижается при уменьшении величины рН в почве. В верхнем горизонте почв водородных западин величина рН резко снижена до 4.5–5.0 против 6.2–7.0 в окружающем черноземе. В таких условиях фульвокислоты будут менее окрашены. То есть в водородных западинах может повышаться содержание гумуса, но за счет более светлых компонентов типа фульвокислот.

Величины содержания гуминовых кислот пирофосфатной вытяжки (характеризующихся обычно

очень темной окраской в зональных черноземах) верхних гумусовых горизонтов почв западин и в окружающем черноземе близки – либо чуть больше, либо чуть меньше. Для выявления особенностей изменения гуминовых кислот в условиях воздействия водорода из гумусового горизонта почв малой западины II, где нет переувлажнения, и окружающего чернозема выделены препараты ГК и определен их элементный состав (табл. 2).

Элементный состав выделенных препаратов ГК показал, что происходит обуглероживание и увеличение степени ароматичности, вероятно, осуществляется трансформация гумуса путем отщепления алифатических фрагментов ГК, поскольку энергия связи там меньше, чем в арома-

Таблица 1. Общее содержание органического углерода и светлота верхних горизонтов почв западин

Местоположение	$C_{\text{общ}}, \%$	Светлота, L
Западина I		
Центр западины	5.38 ± 0.54	42.7 ± 0.19
Граница западины	4.00 ± 0.41	35.91 ± 0.17
Вне западины	2.37 ± 0.03	32.42 ± 0.18
Западина II		
Центр западины	2.47 ± 0.12	35.33 ± 0.12
Вне западины	2.28 ± 0.11	30.42 ± 0.11

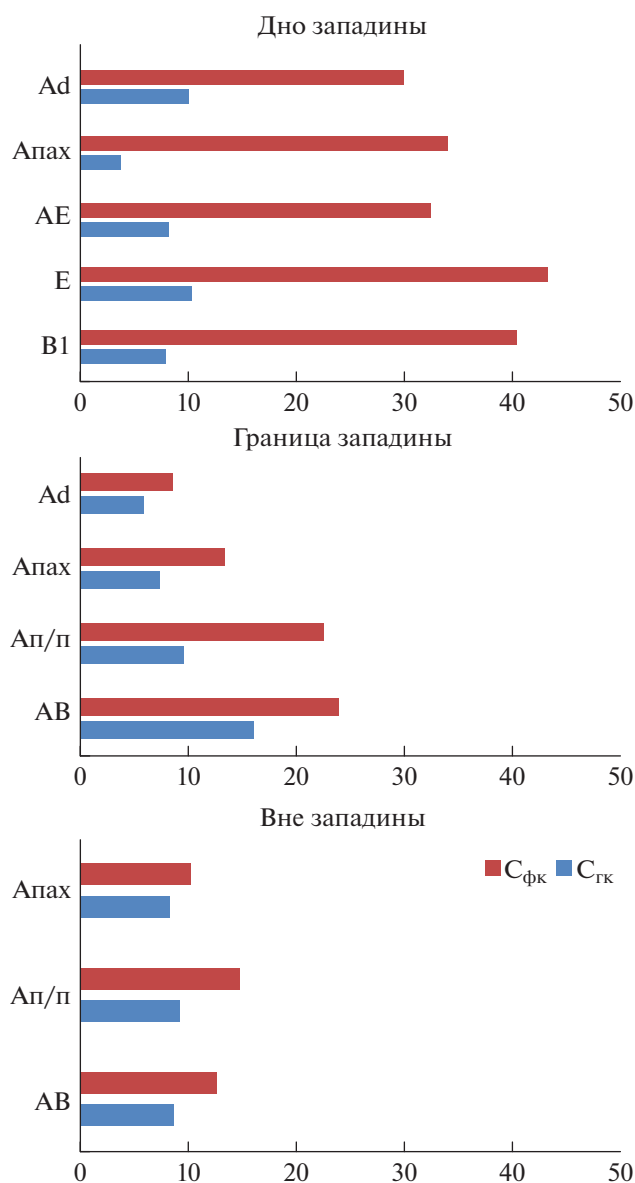


Рис. 3. Содержание гуминовых кислот и фульвокислот (% от $C_{общ}$) в почвах большой западины I.

тических. В фоновом черноземе вне западин окраска гуминовых кислот складывается из сопряженных двойных углерод-углеродных связей не только ароматических, но и алифатических фрагментов. Лишение части последних может привести к осветлению гумуса в целом, что наблюдается в местах выхода водорода.

Следует предполагать, что в потоке водорода возможно деструктивное гидрирование органического вещества почв, сопровождающееся расщеплением углерод-углеродных связей, подобно механизмам технологий переработки угля, сланцев, нефти, древесины в жидкое топливо в токе молекулярного водорода в присутствии катализа-

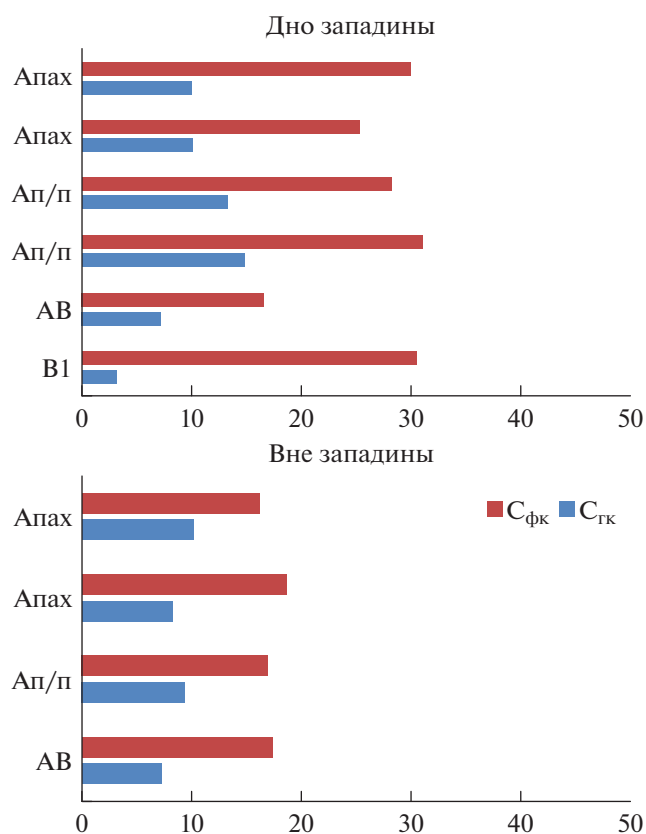


Рис. 4. Содержание гуминовых кислот и фульвокислот (% от $C_{общ}$) в почвах малой западины II.

торов — металлов переменной валентности (например, железа), их сульфидов и оксидов. В результате гуминовые вещества распадаются на более мелкие фрагменты, окраска гумусового горизонта светлеет, несмотря на повышенное общее содержание гумуса.

Кроме того, известно, что поток молекулярного водорода снижает окислительно-восстановительный потенциал воды, водных растворов и почв до крайне низких значений, что может существенно сказаться на состоянии гумуса [14, 22].

Таким образом, в условиях западин с выходом водорода в почвах наблюдается значительное повышение общей концентрации агрессивных фульвокислот, что, вероятно, является основной причиной существенного подкисления почвенного профиля.

Примерно также действует временное избыточное переувлажнение, которое формирует восстановительные условия в западинах. Однако глубоких изменений состава гумуса в почвах понижений, сформированных только водой, не наблюдается [10, 13, 23]. Кроме того, если в почве дна большой западины это можно было бы отнести за счет кратковременного анаэробизиса в результате весеннего переувлажнения почвы, то в

малой западине, где переувлажнения практически нет, это можно связать только с потоком такого восстановителя, как газообразный водород.

Если западина с выходом водорода выражена в рельефе, то сформированные в ней почвы попадают в разряд полугидроморфных, испытывающих временное переувлажнение. Степень гидроморфизма полугидроморфных почв традиционно диагностируется по содержанию в них подвижного железа [4]. В работах Ф.Р. Зайдельмана при моделировании переувлажнения разных почвообразующих пород (карбонатные и бескарбонатные суглинки) убедительно показано, что в условиях застойного режима увеличивается содержание аморфного неокристаллизованного железа, извлекаемого вытяжкой Тамма, при одновременном уменьшении доли несиликатного (вытяжка по Мера–Джексону). В условиях застойно-промывного режима уменьшается содержание и несиликатного, и аморфного железа в результате перемещения последнего по профилю. Принято считать, что такое соотношение указывает на интенсивное глееобразование. Это справедливо, если ведущим фактором выступает только переувлажнение, особенно в идеальных условиях модельного опыта [13].

В нашем случае (рис. 5) в условиях пульсирующего сезонного переувлажнения и пульсирующего потока водорода картина сложнее. В почвах большой западины I по сравнению с фоновым черноземом резко увеличивается содержание свободного железа, извлекаемого как дитионит-цитрат-бикарбонатной вытяжкой (по Мера–Джексону), так и более мягкой оксалатной вытяжкой (по Тамму). В почве границы этой западины в нижней части профиля вытяжка по Мера–Джексону извлекает железа в 4 раза больше. Отнести это к действию гидрологического фактора нельзя, так как на границе западины переувлажнение не выражено, а поток водорода существенный (как известно из литературы и полевых наблюдений, водородный флюид импульсный, и более интенсивный он регистрируется чаще на периферии западин). Содержание железа, извлекаемого вытяжкой Тамма, по профилю почвы также больше (многократно в верхних горизонтах), чем в фоновой почве. В почве дна западины I, где влияют оба фактора: поток водорода и временное переувлажнение – наблюдается иная картина, не укладывающаяся в принятую парадигму группового состава железа (по Зонну). Содержание железа в вытяжке по Мера–Джексону в нижней части профиля остается таким же, как в черноземе, а в пахотном горизонте увеличивается вдвое. Но в почвах многократно увеличивается содержание железа в вытяжке Тамма по всему профилю, значительно превышая в подпахотных горизонтах величину содержания железа по Мера–Джексону.

Таблица 2. Элементный состав ГК чернозема и почвы малой западины II, % от сухого беззольного вещества

Параметр	Вне западины	Западина
Массовая доля, %		
С	53.0	54.2
Н	4.3	3.9
О	39.6	37.4
N	3.2	4.5
At. %		
С	38.9	40.7
Н	37.2	35.3
О	21.8	21.1
N	2.0	2.9
H : C	0.96	0.87
O : C	0.56	0.52
C : N	19.45	14.03
Степень окисленности	0.17	0.17
Степень ароматичности	62.8	68.1
C _{ал}	0.82	0.73
C _{ар}	38.1	40.0

Последние литературные данные свидетельствуют о том, что указанные, широко используемые, вытяжки по отношению к формам железа не вполне селективны [4]. Можно подозревать, что в нижних горизонтах почв границы западины I, где нет переувлажнения, завышено содержание несиликатного железа, поскольку дитионит-цитрат-бикарбонатная вытяжка (по Мера–Джексону) в ходе анализа частично может разрушать железосодержащие алюмосиликаты [4, 30]. В таком случае можно полагать, что последние в условиях потока водорода находятся в ином, более неустойчивом состоянии. В почвах дна западины, где реализуется действие двух факторов: временного переувлажнения и потока водорода – содержание оксалаторастворимого железа (по Тамму) в нижних горизонтах может быть завышено, в то время как содержание цитраторастворимого железа занижено. Это может быть связано с тем, что реактив Мера–Джексона мало извлекает железа в почвах с высоким содержанием гематита, в то время как реактив Тамма в сильно восстановительных условиях в присутствии Fe(II) растворяет гетит и гематит почти полностью [4].

В почвах малой водородной западины II, как и в почвах границы большой западины I, отмечается повышение содержания свободного железа по сравнению с окружающим черноземом, особенно цитраторастворимого в горизонте В, хотя выраженность этого процесса меньше, поскольку западина маленькая и, вероятно, находится в начальной стадии формирования.

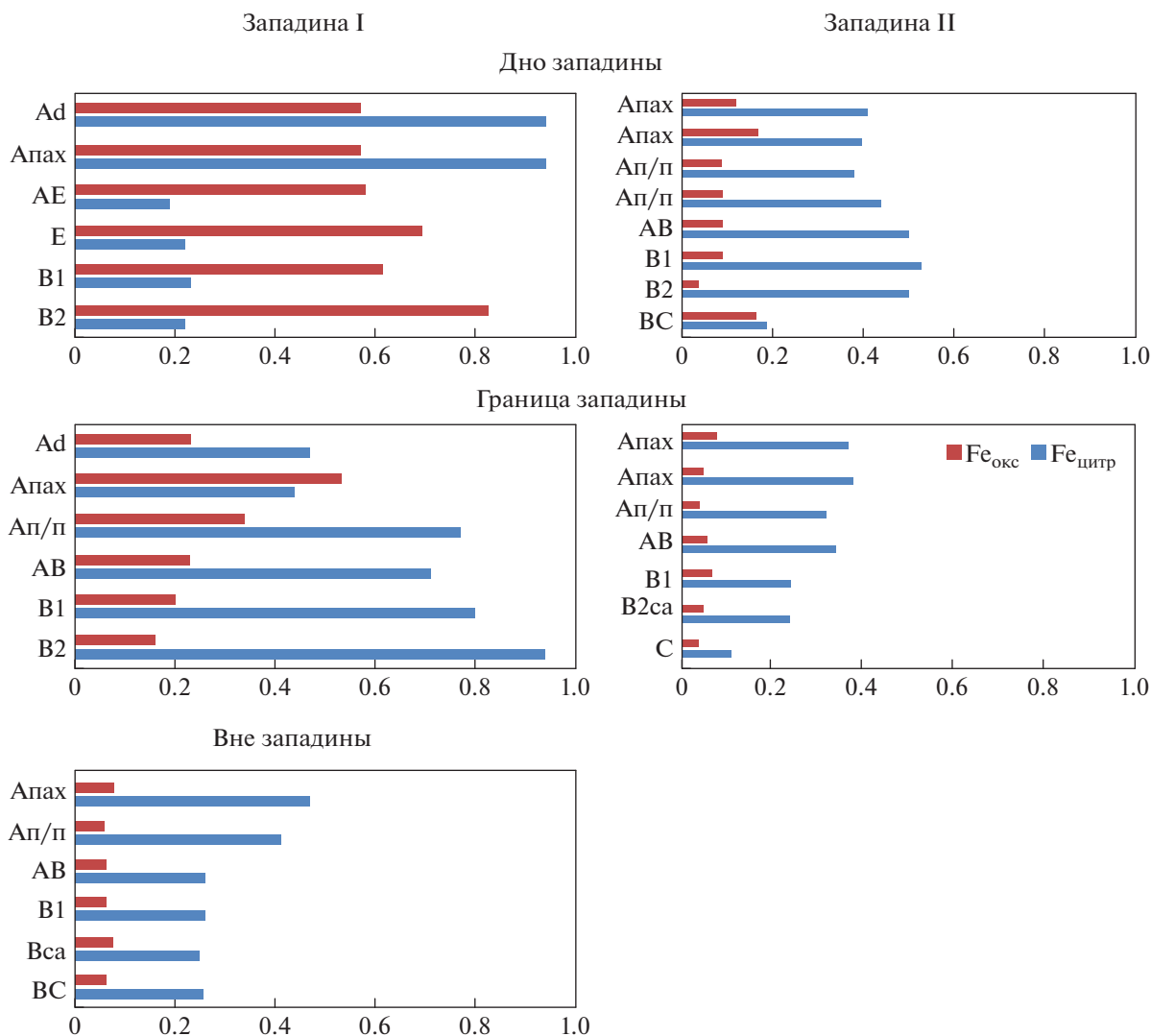


Рис. 5. Содержание цитрато- (вытяжка по Мера–Джексону) и оксалаторастворимого железа (вытяжка по Тамму) в почвах западин (% от почвы).

В целом, несмотря на нетрадиционное соотношение оксалато- и цитраторастворимого железа, наблюдаемого в большой западине I, в почвах, подвергающихся воздействию потока водорода, увеличивается содержание подвижного железа, следовательно, процесс химического выветривания породы происходит более интенсивно. Это отличает их от временно переувлажненных черноземов без воздействия глубинного водородного потока, где содержание подвижных оксидов железа почти такое же, как в зональных черноземах [2].

Нужно отметить, что встречаются работы, в которых описаны почвы со свойствами такими же, как и в нашем исследовании. Например, в работах Зайдельмана подробно изучены почвы в неглубоких округлых западинах на плоской равнине в районе распространения черноземов выше-

лоченных в 10 км от города Рязани [9, 12]. Почвообразующей породой являются лёссовидные карбонатные тяжелые суглинки, подстилаемые на глубине 3–4 м мощной толщей аллювиальных песков. По свойствам почвы этих западин близки к исследованным в настоящей работе. Они характеризуются повышенным содержанием гумуса по сравнению с окружающими черноземами. При этом верхний гумусовый горизонт осветлен – коэффициент отражения ρ_z верхнего горизонта фонового чернозема составляет 15.7, а в западине существенно повышается до 25.3%. Почвы западин промыты от карбонатов и имеют кислую реакцию по всему профилю, близкую по значениям, как и в нашем случае, к дерново-подзолистым почвам. Авторы считают временное избыточное переувлажнение единственной причиной формирования таких свойств.

Необычные особенности почв округлых западин Рязанского стационара заставили нас внимательно изучить обстановку, в которой они формируются. Участки с этими западинами расположены на территории крупнейшего Пачелмского авлакогена (глубинного разлома, перекрытого толщей осадочных пород) в центральной части Русской плиты. В настоящее время он сейсмически активен и, следовательно, на этой территории можно было ожидать проявлений дегазации и потока эндогенного водорода [8]. Действительно, полевые измерения в июне 2017 г. на западинах Рязанского стационара, описанных в работах [9, 12], показали концентрацию водорода в западинах на глубине 120 см в 50 раз больше, чем за пределами западины в окружающем черноземе и в атмосферном воздухе.

Таким образом, понятно, что почвы в округлых западинах, расположенных на территории Пачелмского разлома, находятся не только под воздействием временного избыточного переувлажнения. Кроме гидрологического фактора почвы испытывают пульсирующее действие и водородного флюида.

В модельных опытах [11] по влиянию длительного и кратковременного переувлажнения чернозема пресными водами с добавлением и без добавления сахарозы окислительно-восстановительный потенциал снижается, но его значения не опускаются ниже -250 мВ. Авторами [11] показано, что соотношение ГК и ФК в этом модельном опыте в варианте без добавления сахарозы практически не меняется.

Молекулярный водород в ходе прохождения через почву снижает окислительно-восстановительный потенциал в почве до крайне низких значений (до -650 мВ) [14, 22]. А в таких условиях возможна трансформация органического вещества в сторону увеличения фульватности и подвижности [15]. Поэтому в составе гумуса почв переувлажненных западин Рязанского стационара наблюдается снижение количества ГК в горизонте А1А2 и увеличение содержания ФК, особенно в кутанах и педной массе горизонта В1_г, куда направлен сток подвижной части гумуса [9]. Такая же закономерность наблюдается и в наших водородных западинах на территории Хоперского разлома. Но степень проявления этого процесса здесь гораздо сильнее — содержание ФК в составе гумуса больше (в 2–5 раз и более) количества ГК. Судя по данным полевой водородометрии и анализу космических снимков, это связано с тем, что потоки водорода на этой территории гораздо интенсивнее, плотность западин очень высокая и выраженность их на пашне яркая, в то время как район отличается более засушливым климатом, чем Рязанская область.

Возникает проблема с названием исследованных в настоящей работе почв, подвергающихся воздействию эндогенного водорода. Такие почвы в ряду от автоморфных до полугидроморфных в силу своего генезиса и свойств не могут быть причислены к имеющимся в классификациях типам, поскольку в их образовании участвует новый фактор — поток водорода — сильный восстановитель. Возможно, они могут входить в ансамбль почв с названием, предложенным Зайдельманом с соавт. [12], — черноземовидные разной степени оподзоливания и оглеения, в которых на интенсивный дерновый процесс накладываются подзолистый процесс и глеевый. Однако в этом случае необходима дальнейшая дифференциация почв на более низкие иерархические классификационные уровни с учетом не только степени гидроморфизма, но и интенсивности водородного потока.

Следует отметить, что в отличие от черноземов обыкновенных исследуемые почвы отличаются неблагоприятными экологическими условиями. Это сказывается на прочностных свойствах агрегатной структуры, состоянии микробного сообщества [33, 36, 37]. Кроме того, воздействие водородного потока отрицательно влияет на состояние сельскохозяйственных культур — приводит к гибели посевов на автоморфных участках (неоднократно наблюдали в Воронежской и Рязанской областях) и в результате вымочки и воздействия водорода в полугидроморфных вариантах.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Причиной деградации чернозема обыкновенного в условиях эндогенного потока водорода является установление восстановительного режима, который приводит к трансформации гумуса, накоплению в почве агрессивных фульвокислот, сильному подкислению почвенного профиля, несвойственному ряду полугидроморфных почв степной зоны, удалению карбонатных новообразований, резкому осветлению гумусового горизонта, увеличению подвижного железа. Эти процессы могут происходить в аэробных условиях, исключая застои влаги в поверхностных горизонтах почв, как в западине II. В этом случае недостаточно агента переноса (воды, почвенных растворов) почвенного материала, и подвижные продукты трансформации почв остаются на месте. При выраженности западин в рельефе (западина I), когда в ансамбль факторов добавляется пульсирующее переувлажнение, то есть застойный режим чередуется с промывным, восстановительные условия усиливаются. В почве реализуется массоперенос подвижных компонентов, в результате которого происходит дифференциация почвенного профиля, наблюдаются яркие признаки оподзоливания и оглеения, вызванные

двумя факторами — временным избыточным переувлажнением и током водорода.

ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Описание разрезов.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ахтырцев А.Б., Самойлова Е.М.* Влияние гидроморфизма на распределение, накопление и состав гумуса в почвах лесостепи // Вестник Моск. ун-та. 1983. Сер. 17, почвоведение. С. 3–10.
2. *Безуглова О.С., Назаренко О.Г.* Генезис и свойства мочаристых почв Предкавказья // Почвоведение. 1998. № 12. С. 1423–1430.
3. *Бельчикова Н.П.* Некоторые закономерности содержания, состава гумуса и свойств гуминовых кислот в главнейших группах почв Союза ССР // Тр. Почв. ин. им. В.В. Докучаева. 1951. Т. XXXVIII. С. 33–58.
4. *Водяницкий Ю.Н.* Химия и минералогия почвенного железа. М., 2003. 238 с.
5. *Гришина Л.А.* Гумусообразование и гумусное состояние почв. М., 1986. 242 с.
6. *Джиндил А.Р.* О влиянии орошения на состав и содержание гумуса южных черноземов Одесской области // Агрохимия. 1974. № 10. С. 106–109.
7. *Дмитраков Л.М., Самойлова Е.М.* Гумус луговых почв лесостепи // Почвоведение. 1973. № 9. С. 56–62.
8. *Ефременко М.А.* Современные геодинамически активные зоны Воронежского кристаллического массива по геологическим, геофизическим и сейсмологическим данным. Автореф. дис. ... канд. геол.-минерал. н. М., 2011. 23 с.
9. *Зайдельман Ф.Р.* Генетические особенности и морфология черноземовидных подзолистых оглеенных почв северной лесостепи // Вестник Моск. ун-та. Сер. 17, почвоведение. 2005. № 2. С. 3–8.
10. *Зайдельман Ф.Р.* Морфоглеогенез. Его визуальная и аналитическая диагностика // Почвоведение. 2004. № 4. С. 389–398.
11. *Зайдельман Ф.Р., Давыдова И.Ю.* Причины ухудшения химических и физических свойств черноземов при орошении неминерализованными водами // Почвоведение. 1989. № 11. С. 101–108.
12. *Зайдельман Ф.Р., Степанцова Л.В., Никифорова А.С., Красин В.Н., Сафронов С.Б., Красина Т.В.* Генезис и деградация черноземов Европейской России под влиянием переувлажнения // Способы защиты и мелиорации. М., 2013. 350 с.
13. *Зайдельман Ф.Р., Тюльпанов В.И., Ангелов Е.Н., Давыдов А.И.* Почвы мочарных ландшафтов — формирование, агроэкология и мелиорация. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1998. 159 с.
14. *Канивец В.И.* Взаимодействие водорода, метана и сероводорода с минеральной частью почвы // Почвоведение. 1970. № 5. С. 52–59.
15. *Кауричев И.С., Орлов Д.С.* Окислительно-восстановительные процессы и их роль в генезисе и плодородии почв. М.: Колос, 1982. 247 с.
16. *Кононова М.М.* Органическое вещество почвы. М.: Изд-во АН СССР, 1963. 314 с.
17. *Ларин В.Н.* Наша Земля. М.: Агар, 2005. 247 с.
18. *Орлов Д.С.* Гумусовые кислоты почв и общая теория гумификации. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1990. 323 с.
19. *Орлов Д.С., Бирюкова О.Н., Суханова Н.И.* Органическое вещество почв Российской Федерации. М.: Наука, 1996. 254 с.
20. *Орлов Д.С., Гришина Л.А.* Практикум по химии гумуса. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1981. 271 с.
21. *Перевозчиков Г.В.* Поле водорода на месторождении ГАЗЛИ по данным геохимических исследований в нефтегазоносном регионе Средней Азии // Нефтегазовая геология. Теория и практика. 2012. Т. 7. С. 1–13.
22. *Пискарев И.М., Ушканов В.А., Аристова Н.А., Лихачев П.П., Мысливец Т.С.* Установление окислительно-восстановительного потенциала воды, насыщенной водородом // Биофизика. 2010. Т. 55. Вып. 1. С. 19–24.
23. *Самойлова Е.М.* Луговые почвы лесостепи. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1981. 283 с.
24. *Суханова Н.И., Кирюшин А.В.* Влияние потока глубинного водорода на химические свойства и гумусное состояние почв // Система Планета Земля. 2014. С. 195–200.
25. *Суханова Н.И., Ларин Н.В., Кирюшин А.В.* Влияние потока эндогенного водорода на химические свойства почв // Геополитика и экогеодинамика регионов. Периодическое издание Таврического национального университета им. В.И. Вернадского. 2014. Т. 10. № 1. С. 214–220.
26. *Сывороткин В.Л.* Глубинная дегазация земли и глобальные катастрофы. М.: Геоинформцентр, 2002. 250 с.
27. *Сывороткин В.Л.* Озоновые аномалии над Воронежем — индикаторы глубинной дегазации // Материалы к литолог. совещ. “Литология и полезные ископаемые Центральной России”, 3–8 июля 2000. С. 81–82.
28. *Тищенко С.А., Безуглова О.С.* Гумусовое состояние почв локально переувлажненных ландшафтов Нижнего Дона // Почвоведение. 2012. № 2. С. 156–165.
29. *Шестопалов В.М., Макаренко А.Н.* Поверхностные и приповерхностные проявления аномальной дегазации // Геологический журнал. 2013. № 3. С. 7–25.
30. *Cardile C.M., Childs C.M., Whitton J.S.* The effect of citrate/bicarbonate/ditionite treatment on standart and soil smectites by mossbauer spectroscopy // Austral. J. Soil Res. 1987. V. 25. № 2. P. 145–154.
31. *Hayes M.H.V.* Solvent systems for the isolation of organic component from soils // Soil Sci. Soc. Am. J. 2006. V. 70. № 3. P. 986–994.
32. *Larin N., Zgonnik V., Rodina S., Deville E., Prinzhofner A., Larin V.* Natural molecular hydrogen seepage associat-

- ed with surficial, rounded depressions on the European Craton in Russia // *Natural Resources Research*. 2014. № 5. P. 1–15.
33. *Polyanskaya L.M., Sukhanova N.I., Chakmazyan K.V.* Specific features of the structure of microbial biomass in soils of annular mesodepression in Lipetsk and Volgograd oblasts // *Eurasian Soil Science*. 2014. V. 47. № 9. P. 903–909.
34. *Polyanskaya L.M., Stepanov A.L., Chakmazyan K.V.* The impact of hydrogen emission on the structure of soil microbial biomass // *Eurasian Soil Science*. 2017. V. 50. P. 57–63.
35. *Prinzhofer A., Moretti, I., Françolin J. et al.* Natural hydrogen continuous emission from sedimentary basins: The example of a Brazilian H₂ – emitting structure // *Int. J. Hydrogen Energy*. 2019. V. 44. P. 5676–5685.
36. *Sukhanova N.I., Trofimov S.Y., Polyanskaya L.M., Larin N.V., Larin V.N.* Changes in the humus status and the structure of the microbial biomass // *Eurasian Soil Science*. 2013. V. 46. № 2. P. 135–144.
37. *Sukhanova N.I., Zubkova T.A.* State of organic matter and particularities of physicochemical properties of soils in the endogenous hydrogen seepage zones // *Open J. Soil Sci*. 2018. № 8. P. 186–196.
38. *Zgonnik V., Beaumont V., Deville E. et al.* Evidence for natural molecular hydrogen seepage associated with Carolina bays (surficial, ovoid depressions on the Atlantic Coastal Plain, Province of the USA) // *Progress in Earth and Planetary Science*. 2015. V. 2. P. 31.

Some Features of Chernozem Soils Formed in the Area of Khoper Deep Fault of the Terrestrial Crust

N. I. Sukhanova^{1, *}, S. Ya. Trofimov¹, A. L. Stepanov¹, and A. V. Kiryushin¹

¹*Lomonosov Moscow State University, Moscow, 119991 Russia*

**e-mail: vogudin@yandex.ru*

Endogenous hydrogen fluid in the deep fault zones passing through the thickness of sedimentary rocks, forms on the surface rounded depressions and their clusters. The upper soil horizons in such depressions are lighter in color. The objects of this study were chernozemic soils in depressions in the places with high density of hydrogen yields in the area of the Khopersky deep fault (Voronezh oblast, Russian Federation). It is shown that ordinary chernozems (Haplic Chernozems) in the zones of local release of endogenous hydrogen change their properties owing to the reducing regime caused by the flow of hydrogen fluid. Soil acidity sharply increases, carbonate pedofeatures disappear, and the profile becomes completely leached of carbonates, the content of mobile iron increases. Against the background of increasing humus content, the humus horizon becomes lighter in color due to a sudden change in the composition of humus towards domination of fulvates. Soils lose fertility; the harvest in such areas may be reduced by 30–40%. In depressions with a temporary excess of moisture, reducing processes in soils are enhanced.

Keywords: ordinary chernozem, degassing, molecular hydrogen, humus