



ОСОБЕННОСТИ ГУМУСНОГО СОСТОЯНИЯ ЧЕРНОЗЕМНЫХ ПОЧВ, ФОРМИРУЮЩИХСЯ В УСЛОВИЯХ ВЫХОДА ГЛУБИННОГО ВОДОРОДА В РАЗЛИЧНЫХ УСЛОВИЯХ УВЛАЖНЕНИЯ

© 2022 Н. И. Суханова , А. В. Кирюшин 

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Ленинские горы, 1, Москва, 119991, Россия. E-mail: vogudin@yandex.ru

Цель исследования: выявить изменение ряда характеристик гумуса черноземов в условиях действия двух факторов - увлажнения и потока эндогенного водорода.

Место и время проведения. Водородометрия с отбором почвенных проб проведена на территории Грязинского района Липецкой области (Кривоборгско-Салтыковский прогиб, зона распространения черноземов выщелоченных) и Октябрьского района Воронежской области (Хоперский глубинный разлом, зона распространения черноземов обыкновенных) в июне 2017 года.

Методы. Содержание молекулярного водорода измеряли непосредственно в поле переносным газоанализатором водорода ВГ-3В. Общее содержание органического углерода определяли по методу Тюрина, рН водной суспензии – потенциометрически. Для оценки состава гумуса использовали однократную щелочную пирофосфатную вытяжку. Показатели светлоты почвенных проб определяли по международной системе цветности CIELAB и по системе LRV на спектроколориметре Nix Color Sensor.

Основные результаты. Показано, что в условиях влияния потока водорода в различных по увлажнению регионах результат воздействия этих двух факторов будет разным. Общим для почв исследуемых регионов является установление восстановительного режима, в морфологическом профиле проявляются признаки оподзоливания и оглеения, наблюдается подкисление почвенной массы и осветление верхнего гумусового горизонта. Однако результаты воздействия такого активного восстановителя как водород на гумусированность и качественный состав гумуса почв этих регионов, сильно разнятся. В более сухом регионе распространения черноземов обыкновенных в водородных западинах идет накопление гумуса (от 2,4 до 5,4%), причем за счет резкого преобладания (второе, иногда четвертое) в его составе фульвокислот; присутствие последних в профиле определяет в нем резкое повышение кислотности. В более влажных черноземах выщелоченных, наоборот, происходит значительная потеря гумуса (от 3,9 до 2,2%), а в составе гумуса преобладают гуминовые кислоты. Этот эффект связан с выносом более подвижных компонентов гумуса за пределы почвенного профиля в условиях более влажного климата Липецкой области.

Ключевые слова: глубинный водород; гумус; гуминовые кислоты; фульвокислоты

Цитирование: Суханова Н.И., Кирюшин А.В. Особенности гумусного состояния черноземных почв, формирующихся в условиях выхода глубинного водорода в различных условиях увлажнения // Почвы и окружающая среда. 2022. Том 5. № 3. e184. DOI: [10.31251/pos.v5i3.184](https://doi.org/10.31251/pos.v5i3.184)

ВВЕДЕНИЕ

Многочисленные исследования показали, что интенсивность дегазации Земли за последнее десятилетие усилилась многократно. Основным газом при холодной дегазации земли является молекулярный водород или, в отдельных случаях, примешиваются его газообразные соединения. Водород просачивается к поверхности Земли по постоянно существующим и действующим путям вертикальной проницаемости, связанных с такими геологическими структурами как рифты, авлакогены, глубинные разломы и узлы их пересечения, кольцевые магматические массивы и др. (Перевозчиков, 2012; Рогожин и др., 2010; Сывороткин, 2000, 2002, 2005; Фирстов, Широков, 2005; Щербаков, Козлова, 1986; Larin et al., 2014; Sugisaki et al., 1983; Wakita et al., 1980; Ware et al., 1985; Zgonnik et al., 2015). На Евразийском континенте их достаточно много – от больших субмеридиональных до разломов более низкого порядка и разной географической ориентации. В их пределах разными авторами, в разное время и разными методами были зафиксированы повышенные потоки глубинных газов: водорода, метана, гелия, радона и др. Поток водородного флюида связан с сейсмическими процессами в глубинах Земли (Гумен, Гусев, 1997; Гумен и др.,

1998; Гуфельд, Матвеева, 2011; Ефременко, 2011; Панина и др., 2016). На поверхности земной коры он формирует западины с размерностью ранга микро- и мезоформ рельефа. Эти западинные структуры представляют собой особого рода геодинамические и геохимические системы, которые являются проводниками глубинной энергии и вещества. Площади их развития характеризуются усиленными экзогенными геодинамическими процессами (повышенная сейсмическая активность, глубинные тепловые потоки и пр.), химической деградацией почвенного покрова, загрязнением подземных водоносных горизонтов, иногда повышенной эманацией радона (Суханова и др., 2014; Суханова и др., 2020; Шестопалов, Макаренко, 2013). В местах скопления западин часто образовывается своеобразный западинный ландшафт. Встречаются территории, сплошь покрытые западинами, причем на космических снимках хорошо видны западинные структуры разных порядков: по размерам, разновременные, накладывающиеся друг на друга и т.п. Это особенно хорошо диагностируется на территориях сельскохозяйственного использования. К таковым относятся районы наших исследований, где практически во всех западинах обнаружен водород.

Наши предыдущие работы показали, что поток молекулярного водорода из недр Земли является значимым фактором гумусообразования и почвообразования в целом. Проходя через почвенные слои, водород резко меняет почвенные свойства, и в разной степени меняет подвижность многих почвенных компонентов (Суханова и др., 2014; Суханова и др., 2020; Sukhanova et al., 2013; Sukhanova, Zubkova, 2018). Конечно, глубинные разломы являются водородоносными не на всем своем протяжении. Это зависит от какой-то внутривоздушной обстановки, часто там, где нарушается сплошность плит земной коры (особенно на пересечениях разломов), на тектонически ослабленных зонах растяжения, на отрезках с максимальным тепловым потоком в неоднородном тепловом поле Земли и др. (Фирстов, Широков, 2005; Щербаков, Козлова, 1986). Субмеридиональные, да и иные разломы на обширном Евразийском континенте могут пересекать природные зоны с разным климатом, разными породами и разными типами почв. Поэтому и результат воздействия водородного флюида на почвенный покров будет разным.

Целью данного исследования являлась оценка эффекта воздействия глубинного водорода на почвы с различными условиями увлажнения.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследования проводились на двух обширных территориях примерно с одинаковой высокой плотностью выходов водородного флюида на поверхность, но с разными гидротермическими условиями почвообразования (Аксимов и др., 2014; Трегуб и др., 2008).

Хоперский полигон. Участок с высокой плотностью выходов водорода расположен в районе коленообразного поворота долины р. Хопер в северо-восточной части Воронежской области (Хоперский глубинный разлом, левобережье р. Хопер в окрестностях городов Поворино, Борисоглебск, Новохоперск) общей площадью около 3600 км² (Ефременко, 2011; Larin et al., 2014). Водораздельная часть слабоволнистая. Климат района исследования умеренно-континентальный, с теплым летом и умеренно-холодной зимой. Район отличается неравномерным выпадением осадков в течение года: среднее количество осадков за год – 510 мм, а за летний вегетационный период выпадает 280 мм при повышенной температуре и инсоляции. В почвенном отношении это зона распространения черноземов обыкновенных, которые интенсивно используются в сельском хозяйстве. Во всех исследованных западинах (более двух десятков) отмечена значительная концентрация водорода на глубине 120 см, намного превышающая обычные концентрации в почвенном воздухе. На водораздельной части этой территории выбраны почвы двух водородных западин разного размера. Поскольку западины расположены на расстоянии друг от друга, разрезы закладывали в западине и рядом на окружающем ее черноземе.

Липецкий полигон. Участок исследования расположен в окрестности г. Липецка на стыке двух крупнейших неотектонических структур первого порядка: Среднерусской антеклизы и Окско-Донской депрессии. Это территория субмеридионально вытянутого Кривоборгского и Салтыковского прогиба, в настоящее время испытывающего активизацию, что сопряжено с образованием зон трещиноватости и разрывных дислокаций осадочного чехла и фундамента (Панина и др., 2016; Трегуб и др., 2008). Климат района исследования умеренно-континентальный, с теплым летом и умеренно-холодной зимой. Район отличается неравномерным выпадением осадков в течение года: среднее количество осадков за год – 550 мм, а за летний вегетационный

период 600-650 мм. В почвенном отношении это зона распространения черноземов выщелоченных, почвы интенсивно используются в сельском хозяйстве.

Для исследования выбраны три западины небольшого размера. Они расположены близко друг к другу, поэтому фоновый разрез сравнения для них выбран один.

Превышение содержания молекулярного водорода на глубине 120 см относительно его атмосферного содержания измеряли непосредственно в поле переносным газоанализатором водорода ВГ-3В (Россия). Общее содержание органического углерода ($C_{\text{общ}}$, %) в почвах определяли мокрым сжиганием в сернокисло-хромовой смеси по методу Тюрина, рН водной суспензии – потенциометрически. Для оценки изменений состава гумуса использовали однократную щелочную пирофосфатную вытяжку с разделением ее на щелочно- и кислоторазрушаемые группы (ГК и ФК), без последующего разделения этих групп на фракции. Показатели светлоты почвенных проб определяли по международной системе цветности CIELAB и по системе LRV на спектроколориметре Nix Color Sensor.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Исследования с привлечением информации космической съемки позволяют оценить присутствие изучаемого фактора на отдельных территориях. Во-первых, наиболее вероятны выходы водорода в районах глубинных разломов или стыков платформ, на тепловых аномалиях земной коры. Во-вторых, на поверхности присутствуют правильной формы, круглые, не повторяющие рельеф, западины; они могут быть разного размера. Западины такой формы не могут образоваться под действием осадков, а формируются глубинным потоком флюида. Третий признак – это осветление верхнего гумусового горизонта почв в западинах, особенно заметное на темных почвах, например на черноземах. В-четвертых – на сельскохозяйственных посевах наблюдается угнетение, либо гибель растительности (Sukhanova et al., 2019; Zgonnik, 2020).

Оба полигона расположены в местах повышенной сейсмичности и характеризуются признаками выхода водородного флюида. Все исследованные нами и нашими коллегами западины (их было несколько десятков) показали наличие водорода в разной концентрации от нескольких десятков до 7500 ppm. Большие превышения концентрации водорода чаще наблюдались в больших западинах, но иногда бывало и наоборот.

Хоперский полигон. В западинах в период исследования концентрация водорода 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). Более подробные данные по исследованию западин с выходами водорода на этом полигоне были нами представлены и обсуждены ранее в работе (Суханова и др., 2020), но для раскрытия темы данной статьи следует привести некоторые из них.

Первая западина (I) размером около 100 м, глубиной 0,6 м. Западина исключена из сельскохозяйственного использования около 15 лет назад. В настоящее время это залежный участок, зарастающий лугово-степной растительностью с редким кустарником. Разрезы заложены на дне и на периферии западины. Вторая западина (II) размером в диаметре около 20 м развита на регулярной пашне. Строго говоря, это не западина, понижения практически нет, переувлажнения нет, на снимке пашни она выглядит как осветленное пятно правильной круглой формы. Возможно, это будущая западина, поскольку геологи считают, что водородный флюид из глубин земли растворяет нижележащие карбонатные породы, в результате чего и образуются понижения на поверхности. Почва, окружающая западины (фон) – чернозем обыкновенный легкосуглинистый.

Величины рН в исследуемых почвах, подвергающихся воздействию потока водорода, очень низкие по всему почвенному профилю (табл. 1). Такие значения не встречаются в западинах, сформированных под действием только воды, но характерны для западин с присутствием водорода. В западинах такого размера (их очень много на территории исследуемого полигона) увеличивается содержание гумуса, иногда значительно. В то же время наблюдается существенная осветленность их верхних гумусовых горизонтов. Величина показателя светлоты (L) колеблется в пределах 35,3 – 42,7 в почвах западин при 32,4 в фоновой почве.

По классическим представлениям на черноземах в понижениях такого размера, где переувлажнение временное и не очень значительное, происходит повышение гумусированности, причем окраска становится темнее в соответствии с увеличением содержания гумуса; изменение величины рН по профилю такое же, как и в фоновом черноземе (Ахтырцев, Самойлова, 1983).

В нашем случае понятно, что осветленность верхних гумусовых горизонтов не определяется изменением содержания гумуса, а зависит от состава гумуса, который в условиях потока водорода претерпевает глубокую трансформацию.

Таблица 1

Общее содержание органического углерода ($C_{\text{общ}}$), гуминовых кислот ($C_{\text{ГК}}$) и фульвокислот ($C_{\text{ФК}}$), величины pH водной суспензии в почвах западин Хоперского полигона

Объект	Горизонт	pH	$C_{\text{общ}}$, %	$C_{\text{ГК}}$	$C_{\text{ФК}}$	$C_{\text{ГК}} + C_{\text{ФК}}$	Объект	Горизонт	pH	$C_{\text{общ}}$, %	$C_{\text{ГК}}$	$C_{\text{ФК}}$	$C_{\text{ГК}} + C_{\text{ФК}}$
				% от $C_{\text{общ}}$							% от $C_{\text{общ}}$		
Западина I							Западина II						
Западина	A _d	5,02	5,38	10,2	30,0	40,2	Западина	A _{пах}	5,37	2,47	10,2	30,2	40,4
	A _{пах}	4,61	3,60	3,8	34,0	37,8		A _{пах}	5,73	2,35	10,4	25,4	35,8
	AE	4,48	2,07	8,2	32,4	40,6		A _{п/п}	5,45	1,82	13,4	28,4	41,8
	E	4,48	0,71	10,4	43,2	53,6		A _{п/п}	5,12	1,34	15,0	31,2	46,2
	B1	4,17	0,53	8,0	40,5	48,5		AB	4,98	1,80	7,4	16,8	24,2
	B2	4,47	0,70	-	-	-		B1	4,95	0,47	3,4	30,6	34,0
	B2	4,70	0,42	-	-	-		B2	4,87	0,39	-	-	-
Вне западины	BC	5,03	0,30	-	-	-	C	5,03	0,07	-	-	-	
	A _{пах}	6,29	2,37	8,4	10,2	18,2	Вне западины	A _{пах}	6,17	2,28	10,2	16,2	26,4
	A _{п/п}	7,10	1,83	9,2	14,8	24,0		A _{пах}	6,03	2,14	8,4	18,8	27,2
	AB	7,74	1,23	8,6	12,6	21,2		A _{п/п}	6,81	1,88	9,6	17,0	26,6
	B1	7,96	0,76	-	-	-		AB	7,21	1,29	7,4	17,4	24,8
	B2 _{Ca}	8,07	0,38	-	-	-		B1	7,85	0,97	-	-	-
	BC	8,10	0,28	-	-	-		B2 _{Ca}	8,04	0,60	-	-	-

Примечание.

Прочерк – данные отсутствуют.

Для выявления особенностей состава гумуса посчитали возможным использовать однократную щелочную пирофосфатную вытяжку, предложенную М.М. Кононовой и Н.П. Бельчиковой (Орлов, Гришина, 1981), с разделением ее на щелочно- и кислоторастворимые группы (ГК и ФК), но без последующего деления этих групп на фракции, которая позволяет оценить наиболее трансформируемую часть гумуса. Учитывая, что есть теоретические и экспериментально подтвержденные представления о связи содержания групп гуминовых кислот и фульвокислот с условиями почвообразования, с подвижностью и устойчивостью гуминовых веществ и др., полагаем (с долей условности), что щелочная вытяжка экстрагирует ту их часть, которая наиболее подвержена изменениям при смене почвенных режимов. Изучение варьирования количества и структурной организации (соотношение ГК и ФК) этой фракции может дать информацию об изменениях окраски гумусового горизонта, подвижности гумуса и т.д.

В составе гумуса почв западин резко увеличивается его трансформируемая часть ($C_{\text{ГК}} + C_{\text{ФК}}$ пирофосфатной вытяжки) в основном за счет высокого преобладания в ней группы ФК (иногда втрое) по сравнению с окружающим черноземом обыкновенным. Такое высокое преобладание ФК наблюдается не только в верхнем горизонте почв, но и ниже по морфологическому профилю с тенденцией увеличения в горизонте В; очевидно, что гумус в таких условиях обладает высокой подвижностью и передвигается вниз в виде кислоторастворимых соединений. Кроме того, в препаратах гуминовых кислот, выделенных из почв западин, происходит обуглероживание и увеличение степени ароматичности, что приводит к упрощению их структуры за счет отщепления алифатических фрагментов ГК. Все это ведет к осветлению верхнего гумусового горизонта водородных западин, поскольку гумус обогащается более светлыми компонентами. В почвах наблюдается значительное повышение агрессивных фульвокислот, что, вероятно, является основной причиной сильного подкисления почвенного профиля.

Все эти особенности в той или иной степени наблюдаются для обеих западин, хотя, как указывалось выше, вторую западину (II) мы так называем условно. В ней нет понижения и, следовательно, нет временного периодического переувлажнения, которое ведет к установлению восстановительных условий в почве. Это практически не выражено в профиле при визуальном описании разреза, в отличие от западины I, где они ярко проявляются (наличие элювиального горизонта E, присутствие мелких ортштейнов в горизонте B2 и пр.). Однако характер изменения химических свойств в почве второй западины (II) по отношению к фону, такой же, как и в первой, и ясно указывает, что и в ней условия восстановительные (очень кислая реакция среды по

профилю, отсутствие карбонатных новообразований, значительная фульватность гумуса, осветленность верхнего гумусового горизонта). В этом случае эти изменения никак не могут относиться к действию переувлажнения, их можно отнести только за счет действия на почву такого сильного восстановителя как водород, поступающего извне. Возможно, что при поступлении в почву водорода происходит деструктивное гидрирование гумуса в результате расщепления двойных углерод-углеродных связей подобно механизмам технологии переработки угля, сланцев, нефти, древесины в жидкое топливо в токе молекулярного водорода в присутствии металлов переменной валентности, их сульфидов и оксидов. В результате гуминовые вещества распадаются на более мелкие фрагменты. Известно, что окраска гумуса зависит от наличия в составе гумуса сопряженных двойных углерод-углеродных связей. А если так, то сильное осветление гумусного горизонта в черноземных почвах, подвергающихся действию водорода, вполне закономерно. Кроме того, в этих условиях гумус, в целом, становится очень подвижным; при наличии агента переноса он легко может терять легкогидролизуемые компоненты. Подтверждением этого служит наличие в морфологическом профиле таких почв очень мощных гумусовых кутан, потеков гумуса до большой глубины.

Липецкий полигон. Этот участок также характеризуется очень большой плотностью выхода водородного флюида по площади и изобилует западинами разного размера с разными уровнями величин измеренной концентрации водорода. Для реализации цели настоящего исследования и некоторых статистических обобщений были выбраны три небольшие западины примерно с близкими режимами (соотношения размеров и глубины, концентрация водорода, и др.). Крупные и глубокие западины в данной работе мы не рассматривали, поскольку в этих случаях необходимо учитывать еще такой важный фактор, как рельеф, где сочетаются аккумулятивные и транзитные ландшафты. Агент переноса подвижных компонентов почвы (в данном случае это атмосферная вода) здесь мощный и реализуется не только в вертикальном, но и в горизонтальном направлении. Конечно, и в наших исследованных западинах горизонтальный перенос есть, но он все-таки при наличии растительности не так велик.

Западина 1. Старая западина на поле размером около 100 м. В боковой части западины был, вероятно, неглубокий провал, теперь это неглубокое понижение, заросшее осиной, березой, ивой с густым травянистым покровом из сорных трав. Пологая часть западины включена в поле с посевом ячменя. Посевы в западине по сравнению с фоном изрежены и угнетены, проективное покрытие относительно фона около 50%. На космическом снимке пологая часть западины интенсивно светлеет при приближении к центру в точке 4 (рис. 1), где максимальная светлота на снимке определяется не только изреженностью посевов, но и осветленностью верхнего горизонта почв, что видно даже невооруженным глазом при полевых обследованиях западины.

Водородометрия (рис. 1) проводилась по трансекте, пересекающей западину. Наибольший поток водорода наблюдался на границе между провальной частью и пологим склоном западины (на рисунке точка 4).

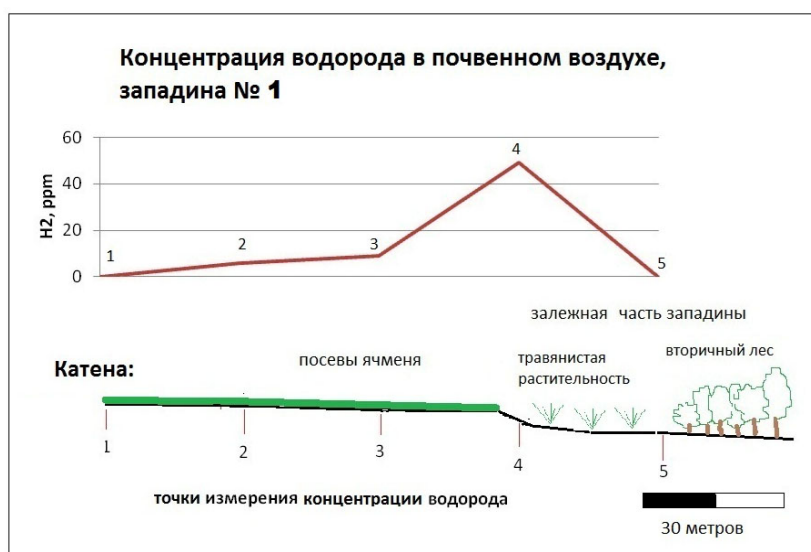


Рисунок 1. Водородометрия на территории выхода водорода, западина 1. Почвенный разрез заложен в центре западины (точка 4 на рисунке).

Западина 2. Маленькая западина на поле ячменя, размером около 50 м, когда-то, вероятно в сухие годы, пахалась и заседалась, в настоящее время исключена из пашни, растительность – влаголюбивые злаки, сорная. На снимке выглядит как округлое правильной формы темное пятно, окруженное светлым кольцом. Водородометрия проводилась по трансекте, пересекающей западину, через 10 м. В центре западины регистрировались наибольшие значения содержания водорода (около 30 ppm) с постепенным снижением его уровня к краям западины (рис. 2); почвенный разрез заложен в центре западины (точка 6).

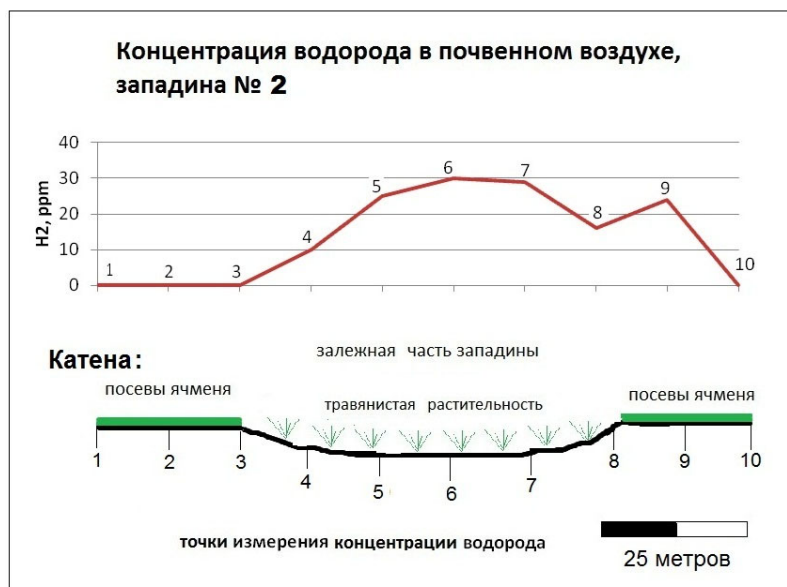


Рисунок 2. Водородометрия на территории выхода водорода, западина 2. Почвенный разрез заложен в центре западины (точка 6 на рисунке).

Западина 3. Обширная, очень пологая и неглубокая западина на поле ячменя, размерами около 300 м в диаметре, глубиной около 30 см. На космическом снимке представляет собой округлое осветленное пятно на поле. Посевы в центре западины угнетены, проективное покрытие относительно фона 50-60%. Наибольшие значения содержания водорода наблюдались в центре западины (около 90 ppm) с постепенным снижением его уровня к краям западины (рис. 3).

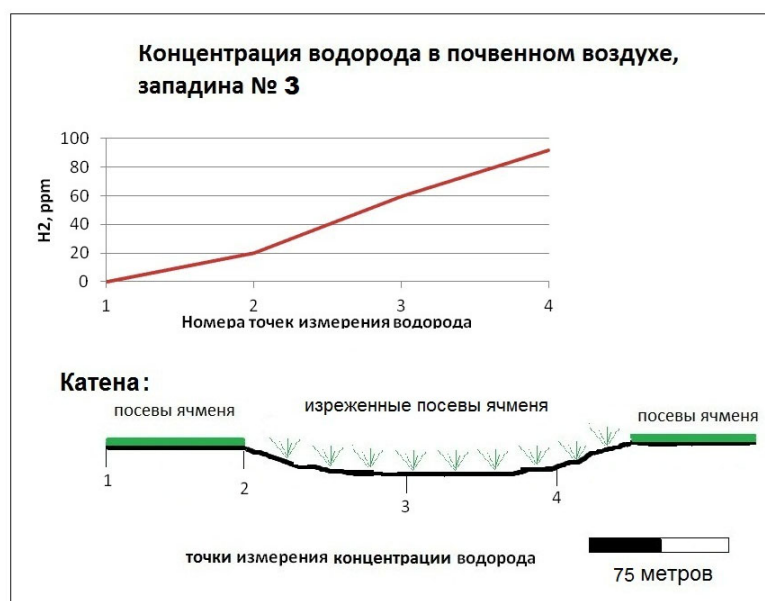


Рисунок 3. Водородометрия на территории выхода водорода, западина 3. Почвенный разрез заложен в центре западины (на рисунке точка 3).

Трудно точно оценить интенсивность воздействия потока водорода в западинах, так как он, по свидетельству многих исследователей, неравномерно, импульсно и часто не прогнозируемо выходит на поверхность (Нивин и др., 2018; Перевозчиков, 2012; Сывороткин, 2002; Rhee et al., 2006; Prinzhofer et al., 2019; Simon et al., 2020). Сегодня это 50 ppm, а завтра может увеличиться на несколько порядков. Довольно условно можно оценить время развития мелких западин только по свидетельству местных аграриев и по остаткам пахотного горизонта в морфологическом профиле почв, навсегда исключенных из пашни; это, вероятно, десятки лет. О возрасте крупных водородных структур говорить сложно, требуются более глубокие исследования. Но наши полевые наблюдения и замеры показывают, что поток глубинного водорода здесь присутствует и, судя по словам местных сельхозпроизводителей, западины продолжают развиваться, причем довольно интенсивно.

Первая западина, вероятно, старше остальных двух, поскольку край ее когда-то провалился, зарос кустарниками и деревьями. Атмосферная вода, стекающая туда, вероятнее всего, формирует внизу линзу, препятствующую прохождению газа. Известно, что скорость потока газа в обводненной почвенной толще на порядок меньше, чем в воздухе (Перевозчиков, 2012; Пискарев, 2010), и он стремится вверх рядом, по пути наименьшего сопротивления (точка 4 на рис. 1); в это же время в заросшем понижении водород не обнаружен. Это довольно традиционная, часто встречающаяся картина.

Наиболее молодая западина 3, хотя и очень обширная, но не глубокая. Обнаружить ее на поле по ландшафту было почти невозможно; только на космическом снимке она видна как правильной формы круглое светлое пятно на заросшем ячменем поле. Вряд ли в ней собирается много воды, поэтому период переувлажнения короче. Однако поток водорода в ней на момент исследования был значительно интенсивнее, чем в остальных западинах. Визуальные признаки восстановительного процесса в этой почве, пожалуй, ярче, чем в остальных.

Морфологические описания почв всех трех западин по сравнению с фоновым черноземом выщелоченным отражают признаки сильного восстановительного процесса. Оподзоливание и оглеение наблюдаются уже в нижней части гумусового горизонта; в горизонте В (западина 3) иногда присутствуют в небольшом количестве ортштейны. Структурные элементы почвенной массы обволакивают очень мощные, черные кутаны, переходящие в гумусовые вертикальные потоки между структурными отдельностями.

Во всех западинах, в отличие от фона, происходит очень сильное осветление верхнего гумусного горизонта. Измеренные в лаборатории показатели светлоты (L, A) верхнего горизонта почвы западины 1 составляют 38 и 10%, в фоновой почве их величина значительно ниже 26 и 5% соответственно. В западине 2 показатели светлоты (L, A) верхнего горизонта почвы составляют 44 и 14%, а в западине 3 – 35 и 8% при 26 и 5% в фоновой почве (табл. 2). Собственно говоря, оба показателя отражают практически одинаковые закономерности, поэтому использовать можно оба, но предпочтительнее альбедо, так как в этом случае закономерности проявляются ярче, кроме того, на черно-белых космических снимках фиксируется именно альбедо.

Таблица 2

Светлота и общее содержание органического углерода ($C_{\text{общ}}$) верхнего горизонта почв западин Липецкого полигона

Показатель	Местоположение			
	Западина 1	Западина 2	Западина 3	Фон
L, %	38	44	35	26
A, %	10	14	8	5
$C_{\text{общ}}$, %	3,2	2,1	2,9	3,9

Примечание.

L – светлота (по международной системе цветности CIELAB), A – альбедо (по системе LRV).

Осветление верхних гумусных горизонтов почв западин очень сильное, величины показателя светлоты (L) на 9-18% больше, чем таковые в окружающем фоновом черноземе выщелоченном. Оно значительнее, чем в почвах западин Хоперского полигона, где показатель L всего на 3-10% выше, чем в фоновом черноземе обыкновенном.

В почвах западин Липецкого полигона, как и на территории Хоперского полигона, наблюдается подкисление почвенной массы всех горизонтов, иногда значительное – до 4,76 при

6,45 в фоновой почве; но в большинстве случаев подкисление не столь высокое. Величины pH колеблются в пределах 5,46-6,29 в водородных западинах при 5,15-6,48 в фоновом выщелоченном черноземе (табл. 3).

Таблица 3

Общее содержание органического углерода ($C_{\text{общ}}$), углерода гуминовых кислот ($C_{\text{ГК}}$) и фульвокислот ($C_{\text{ФК}}$), величины pH водной суспензии в почвах западин Липецкого полигона

Объект	Горизонт	pH	$C_{\text{общ}}$, %	$C_{\text{ГК}}$	$C_{\text{ФК}}$	$C_{\text{ГК}}+C_{\text{ФК}}$
				% от $C_{\text{общ}}$		
Вне западины	A _{пах}	6,45	3,88	5,9	2,6	8,5
	A _{п/п}	6,48	3,10	9,0	3,9	12,9
	AB	6,29	1,26	20,6	15,9	36,5
	B1	6,15	0,35	-	-	-
	B2	6,16	0,23	-	-	-
Западина 1	A _{пах}	4,76	3,22	5,6	5,9	11,5
	AЕg	5,64	1,13	26,5	15,0	41,5
	AЕВ	5,91	0,69	40,5	24,6	65,1
	B1	5,92	0,33	-	-	-
	B2	5,96	0,23	-	-	-
Западина 2	A _d	5,64	2,21	12,1	7,9	20,0
	A	5,61	2,15	12,5	8,4	20,9
	AE	6,14	1,70	15,9	13,5	29,4
	E	6,29	0,60	-	-	-
	B1	5,91	0,33	-	-	-
Западина 3	A _{пах}	5,06	2,89	7,9	5,5	13,4
	E _g	5,84	0,64	46,8	37,5	84,3
	B1	5,93	0,54	20,4	37,0	57,4
	B2	5,46	0,19	-	-	-

Примечание.

Прочерк – данные отсутствуют.

В отношении гумусированности почвы западин на черноземе выщелоченном Липецкого полигона демонстрируют резкое ее снижение. Общее содержание органического углерода падает от 3,88% в фоновой почве до 2,21-3,22% в западинах. В составе гумуса легко трансформируемая часть ($C_{\text{ГК}} + C_{\text{ФК}}$ пирофосфатной вытяжки) в верхнем горизонте немного возрастает: от 8,5% в фоновой почве до 11,5-13,4% в западинах 1 и 3. Резкий скачок этой величины наблюдается в элювиальных горизонтах – до 65,1-84,3% от $C_{\text{общ}}$. Соотношение групп ГК и ФК пирофосфатной вытяжки не показывает увеличения фульватности гумуса, как это было в черноземах обыкновенных, формирующихся в условиях тока водорода, а, наоборот, при увеличении кислотности, что необычно, имеет тенденцию изменения в сторону гуматного типа. Исключение составляет западина 2. Если западины 1 и 3 пахуются и засеваются ежегодно (в них вымочка, конечно, может быть, но только во влажные годы), то западина 2 была ранее исключена из пашни и в настоящее время заросла влаголюбивыми травами; в ней почти всегда влажно, в течение вегетационного периода мало резких скачков затопления–иссушения. Водородометрия показала в ней небольшую интенсивность потока водорода по сравнению с западинами 1 и 3. Вероятно, поэтому, распределение по профилю групп гумусовых кислот плавное, малодифференцированное.

Можно констатировать, что осветление почв в водородных западинах на черноземе выщелоченном (полигон Липецкий) в отличие от таких на черноземе обыкновенном (Хоперский полигон) в большой степени определяется потерей гумуса, хотя нельзя исключать и трансформацию гуминовых кислот, поскольку известно, что молекулярный водород является сильным восстановителем и в ходе прохождения через почву снижает окислительно-восстановительный потенциал до крайне низких значений, а в таких условиях возможна трансформация гуминовых кислот (Ахтырцев, Самойлова, 1983; Канивец, 1970). Высокое содержание гуминовых кислот в составе гумуса почв западин на черноземе выщелоченном не говорит о том, что процесс гумификации идет в гуматную сторону. Липецкая область характеризуется более влажным климатом, максимум осадков здесь выпадает летом (600-650 мм), в то время как в более засушливом Поворинском районе (Хоперский разлом) летом их всего 280

мм. В Липецких западинах в течение активного вегетационного периода режим пульсирующий – застойный чаще чередуется с промывным. В профиле почв во время интенсивных кратковременных летних дождей образуется достаточное количество воды для переноса подвижных компонентов гумуса вниз. Можно полагать, что в условиях потока водорода (как и в почвах водородных западин Хоперского разлома) происходит некоторый распад гумуса и появление в почвах фульвокислот, которые в условиях более влажного климата Липецка быстро выносятся вниз за пределы морфологического профиля, поскольку их подвижность выше, чем подвижность гуминовых кислот. Подтверждением этого являются очень мощные гумусовые кутаны по граням структурных отдельностей, напоминающие потеки гумуса до большой глубины. Поскольку в этих более влажных условиях фульвокислоты мало задерживаются в профиле, то нет и сильного подкисления почв, такого как в западинах на территории распространения чернозема обыкновенного.

Для иллюстрации этого, можно сравнить западину 1 на черноземе обыкновенном и западину 2 на черноземе выщелоченном. Целесообразно сравнивать эти западины, поскольку условия в них близки, обе когда-то пахались, но сейчас выведены из сельскохозяйственного использования. В морфологическом профиле есть старопашотный горизонт, который уже несколько трансформировался, а сверху выделяется дерновый горизонт. Можно предположить, что, поскольку человек какое-то время не вмешивался в почвенные процессы, то обстановка в них относительно стабилизировалась по сравнению с пашней.

Таблица 4

Величины рН водной суспензии и содержание фульвокислот ($C_{ФК}$) в почве западин

ЧЕРНОЗЕМ ОБЫКНОВЕННЫЙ				ЧЕРНОЗЕМ ВЫЩЕЛОЧЕННЫЙ			
Объект	Горизонт	$C_{ФК}$, % от почвы	рН	Объект	Горизонт	$C_{ФК}$, % от почвы	рН
Вне западины	$A_{пах}$	0,24	6,29	Вне западины	$A_{пах}$	0,10	6,45
	$A_{п/п}$	0,27	7,10		$A_{п/п}$	0,12	6,48
	AB	0,23	7,74		AB	0,20	6,29
Западина 1	A_d	1,61	5,02	Западина 2	A_d	0,17	5,64
	$A_{пах}$	1,56	4,61		$A_{пах}$	0,27	5,61
	AB	0,67	4,48		AE	0,27	6,14

Если оценить абсолютное содержание фульвокислот в почве, а не в % от $C_{общ}$, то отчетливо видно, что большое увеличение фульвокислот в почве водородной западины на черноземе обыкновенном соотносится с резким снижением величин рН. В западинах на черноземе выщелоченном увеличение ФК в почве значительно меньше, величины рН, конечно, снижаются относительно фона, но не так резко.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Почвы (чернозем обыкновенный и чернозем выщелоченный) исследуемых нами регионов, подвергающиеся воздействию глубинного водорода, формируются примерно в одинаковом температурном диапазоне климата, но при резко различном количестве выпадающих осадков. В более сухом регионе (Хоперский полигон, территория распространения чернозема обыкновенного) выпадает летом всего 280 мм осадков. Здесь в почвах западин, подвергающихся воздействию водорода, в морфологическом профиле проявляются признаки оподзоливания и оглеения и на начальных стадиях этого восстановительного процесса происходит необычное осветление верхнего гумусового горизонта. При значительном повышении гумусированности в составе гумуса начинает преобладать (втрое, иногда вчетверо) группа фульвокислот, которые накапливаются и ведут к сильному подкислению всех горизонтов, включая верхний, и, в результате, к удалению характерных для этого типа почв карбонатных новообразований во всем почвенном профиле и ниже.

В более влажном регионе (Липецкая область, территория распространения чернозема выщелоченного) осадков летом выпадает вдвое больше (600-550 мм). В почвах западин, подвергающихся воздействию водорода, осветление верхнего гумусового горизонта гораздо интенсивнее. В морфологическом профиле также проявляются признаки оподзоливания и

оглеения, хотя подкисление почвенной массы не столь высокое. Следует особо отметить, что даже в небольших западинах этого региона наблюдается значительная потеря гумуса. При этом в составе гумуса соотношение групп гуминовых кислот и фульвокислот иное, чем в почвах западин Хоперского полигона. Содержание гуминовых кислот несколько выше, чем содержание фульвокислот, вероятно, за счет выноса из профиля последних в условиях интенсивного пульсирующего увлажнения.

Причиной трансформации гумуса черноземных почв в условиях дегазации из недр Земли является сочетание двух факторов: потока молекулярного водорода и сопутствующего переувлажнения. В условиях черноземных ландшафтов это ведущие разрушительные факторы, хотя они неравномерны и в пространстве и во времени. Действие их сводится к установлению в почвах активного восстановительного режима, но реализация его и, в конечном итоге, результат изменения соответствующих показателей состояния гумуса зависит еще от факторов более высокого порядка, например гидротермических условий природной зоны, в которой формируются конкретные почвы.

ФИНАНСОВАЯ ПОДДЕРЖКА

Работа выполнена в рамках госбюджетной темы МГУ им. М.В. Ломоносова, № гос. задания 121040800154-8.

ЛИТЕРАТУРА

1. Акимов Л.М., Бочаров В.Л., Дмитриева В.А., Нестеров Ю.А., Нефедова Е.Г., Прохорова О.В., Строгонова Л.Н., Федотов В.И., Федотов С.В. Материалы по оценке производительных сил муниципальных районов Воронежской области (Агроклиматические, водные и рекреационно-туристические ресурсы) // *Вестник Воронежского государственного университета. Серия: география, геоэкология*. 2014. № 4. С. 68–126.
2. Ахтырцев А.Б., Самойлова Е.М. Влияние гидроморфизма на распределение, накопление и состав гумуса в почвах лесостепи // *Вестник Московского университета. Серия 17: Почвоведение*. 1983. № 2. С. 3–11.
3. Войтов Г.И., Осика Д.Г. Водородное дыхание Земли как отражение особенностей геологического строения и тектонического развития ее мегаструктур // *Труды Геологического Института Махачкалы*. 1982. С. 7–29.
4. Гумен А.М., Гусев А.П. Газогеохимические индикаторы геодинамической активности глубинных разломов на юго-востоке Беларуси // *Литасфера*. 1997. № 6. С. 140–149.
5. Гумен А.М., Гусев А.П., Рудаков В. Подпочвенный водород – индикатор изменений напряженно-деформированного состояния земной коры сейсмичных районов // *Доклады Российской академии наук*. 1998. № 359. с. 390–393.
6. Гуфельд И.Л., Матвеева М.И. Барьерный эффект дегазации и разрушения земной коры // *Доклады академии наук*. 2011. Том 438. № 2. С. 677–680.
7. Ефременко М.А. *Современные геодинамически активные зоны Воронежского кристаллического массива по геологическим, геофизическим и сейсмологическим данным*. Автореф. дисс. ... к.г.-м.н. М., 2011. 23 с.
8. Канивец В.И. Взаимодействие водорода, метана и сероводорода с минеральной частью почвы // *Почвоведение*. 1970. № 5. С. 52–59.
9. Нивин В.А., Пуха В.В., Ловчиков А.В., Рахимов Р.Г. Особенности и факторы временных изменений выделения водорода на Ловозерском месторождении редких металлов (Кольский полуостров) // *Геохимия*. 2018. № 7. С. 661–675. DOI: 10.1134/S0016752518070075
10. Орлов Д.С., Гришина Л.А. *Практикум по химии гумуса*. М.: Издательство Московского университета, 1981. 273 с.
11. Панина Л.В., Зайцев В.А., Сенцов А.А., Агibalов А.О. Неотектоника центральной части Восточно-Европейской платформы // *Бюллетень московского общества испытателей природы. Отдел геологический*. 2016. Том 91. № 4-5. С. 51–60.
12. Перевозчиков Г.В. Поле водорода на месторождении ГАЗЛИ по данным геохимических исследований в нефтегазоносном регионе Средней Азии // *Нефтегазовая геология. Теория и практика*. 2012. Том 7. № 1. С. 1–13.

13. Пискарев И.М., Ушканов В.А., Аристова Н.А., Лихачев П.П., Мысливец Т.С. Установление окислительно-восстановительного потенциала воды, насыщенной водородом // *Биофизика*. 2010. Том 55. Вып. 1. С. 19–24.
14. Рогожин Е.А., Горбатиков А.В., Степанова М.Ю., Ларин Н.В. Глубинное строение Московского авлакогена в западной части Москвы // *Геофизические процессы и биосфера*. 2010. Том 9. № 2. С. 37–49.
15. Суханова Н.И., Ларин Н.В., Кирюшин А.В. Влияние потока эндогенного водорода на химические свойства почв // *Геополитика и экогеодинамика регионов*. 2014. Том 10. № 1. С. 214–220.
16. Суханова Н.И., Трофимов С.Я., Степанов А.Л., Кирюшин А.В. Особенности черноземных почв района Хоперского глубинного разлома Земной коры // *Почвоведение*. 2020. № 2. С. 199–209. DOI: 10.31857/S0032180X20020124
17. Сывороткин В.Л. Экспериментальное подтверждение водородной концепции разрушения озонового слоя Земли // Система планеты Земля: Матер. XIII научного семинара. Москва, 2005. С. 265–267.
18. Сывороткин В.Л. Глубинная дегазация земли и глобальные катастрофы. М.: Геоинформцентр, 2002. 250 с.
19. Сывороткин В.Л. Озоновые аномалии над Воронежем – индикаторы глубинной дегазации // Материалы к литологическому совещанию “Литология и полезные ископаемые Центральной России”. 3–8 июля 2000. С. 81–82.
20. Трегуб А.И., Корабельников Н.А., Трегуб С.А., Старухин А.А. Территориальный прогноз развития опасных экзогенных геологических процессов в Липецкой области // *Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Геология*. 2008. № 1. С. 147–152.
21. Фирстов П.П., Широков В.А. Динамика молекулярного водорода и ее связь с деформационными процессами на геодинамическом полигоне Петропавловск-Камчатский: данные наблюдений в 1999–2003 годах // *Геохимия*. 2005. № 11. С. 1151–1160.
22. Шестопалов В.М., Макаренко А.Н. Поверхностные и приповерхностные проявления аномальной дегазации // *Геологический журнал*. 2013. № 3. С. 7–25.
23. Щербаков А.В., Козлова Н.Д. Наличие водорода в подповерхностных флюидах и связь аномальных концентраций с глубинными разломами в СССР // *Геотектоника*. 1986. № 2. С. 120–128.
24. Rhee T.S., Brenninkmeijer C.A.M., Röckmann T. The overwhelming role of soils in the global atmospheric hydrogen cycle // *Atmospheric Chemistry and Physics*. 2006. No. 6. P. 1611–1625. <https://doi.org/10.5194/acp-6-1611-2006>, 2006.
25. Larin N., Zgonnik V., Rodina S., Deville E., Prinzhofer A., Larin V. Natural Molecular Hydrogen Seepage Associated with Surficial, Rounded Depressions on the European Craton in Russia // *Natural Resources Research*. 2015. No. 24. p. 369–383. <https://doi.org/10.1007/s11053-014-9257-5>
26. Prinzhofer A., Moretti, I., Françolin J., Pachecodet C., D'Agostinoe A., Werlye J., Rupine F. Natural hydrogen continuous emission from sedimentary basins: The example of a Brazilian H₂-emitting structure // *International Journal of Hydrogen Energy*. 2019. Vol. 44. Is. 2. P. 5676–5685. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.01.119>
27. Simon J., Fulton P., Prinzhofer A. and Cathles L. Earth Tides and H₂ Venting in the Sao Francisco Basin, Brazil // *Geosciences*. 2020. No. 10 (10). P. 414. <https://doi.org/10.3390/geosciences10100414>
28. Sugisak, R., Ido M., Takeda H., Isobe Y., Hayashi Y., Nakamura N., Satake H., Mizutani Y. Origin of hydrogen and carbon dioxide in fault gases and its relation to fault activity // *The Journal of Geology*. 1983. Vol. 91. No. 3. P. 239–258. <https://doi.org/10.1086/628769>
29. 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. Vol. 46. No. 2. P. 135–144. <https://doi.org/10.1134/S1064229313020142>
30. Sukhanova N.I., Zubkova T.A. State of organic matter and particularities of physicochemical properties of soils in the endogenous hydrogen seepage zones // *Open Journal of Soil Science*. 2018. No. 8. P. 186–196. <https://doi.org/10.4236/ojss.2018.88015>
31. Sukhanova N.I., Lysak L.V., Kiryushin A.V. Influence of Hydrogen Fluid on Plants in Natural Conditions and a Model Experiment // *Moscow University Soil Science Bulletin*. 2019. Vol. 74. No. 5. P. 208–213. <https://doi.org/10.3103/S0147687419050053>

32. Wakita H., Nakamura Y., Kita I., Fujii N., Notsu K. Hydrogen release: new indicator of fault activity // *Science*. 1980. Vol. 210. P. 188–190. <https://doi.org/10.1126/science.210.4466.188>
33. Ware R.H., Roecken C., Wyss M. The detection and interpretation of hydrogen in fault gases // *Pure and Applied Geophysics*. 1984. Vol. 122. P. 392–402. <https://doi.org/10.1007/BF00874607>
34. Zgonnik V., Beaumont V., Deville E., Larin N., Pillot D., Farrell K.M. 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. Vol. 2. P. 31. <https://doi.org/10.1186/s40645-015-0062-5>
35. Zgonnik V. The occurrence and geoscience of natural hydrogen: A comprehensive review // *Earth-Science Reviews*. 2020. Vol. 203. P. 103140. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2020.103140>

Поступила в редакцию 17.06.2022

Принята 17.10.2022

Опубликована 01.11.2022

Сведения об авторах:

Суханова Наталья Ивановна – кандидат биологических наук, старший научный сотрудник кафедры химии почв факультета почвоведения Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова (Москва, Россия); vogudin@yandex.ru

Кирюшин Алексей Валериевич – кандидат биологических наук, старший преподаватель кафедры химии почв факультета почвоведения Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова (Москва, Россия); akiriushin@mail.ru

Автор(ы) прочитал(и) и одобрил(и) окончательный вариант рукописи.



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

HUMUS STATUS OF THE CHERNOZEM SOILS FORMED UNDER DEEP HYDROGEN RELEASE AND DIFFERENT HUMIDIFICATION

© 2022 N. I. Sukhanova , A. V. Kiryushin 

Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia. E-mail: vogudin@yandex.ru

Purpose of the study: to reveal changes in some humus characteristics in chernozems under the influence of two factors, specifically, humidification and the flow of endogenous hydrogen.

Place and time of the study. Soil sampling and hydrometry were carried out on the territory of the Gryazinsky district of the Lipetsk region (Krivoborgsko-Saltykovsky trough, the territory with leached chernozems) and on the territory of the Oktyabrsky district of the Voronezh region (Khopersky deep fault, the territory with ordinary chernozems) in June 2017.

Methods. The molecular hydrogen content was measured directly in the field with a portable hydrogen gas analyzer VG-3B. The total soil organic carbon (SOM) content was determined by the Tyurin method, and pH was measured potentiometrically. To assess the SOM composition, an alkaline pyrophosphate extraction was used. The luminance values of soil samples were determined using the CIELAB international chromaticity system and the LRV system on the Nix Color Sensor spectrophotometer.

Results. The study showed that under the influence of hydrogen flow in different humidification regions, the effect of these two factors was different. The establishment of the reductive regime, signs of podzolization and gleing in the morphological profile, acidification of the soil bulk and brightening of the upper humus horizon were found to be common features between the soils of these regions. However, the effect of such active reducing agent as hydrogen on the SOM and qualitative composition in these regions varied greatly. In the drier region with ordinary chernozems, SOM accumulated in hydrogen relief depressions (from 2.4 to 5.4%), and due to their sharp predominance (three times, sometimes four times) in SOM composition and predominance in the soil profiles, fulvic acids determined a sharp increase in soil acidity. The leached chernozems, on the contrary, manifested a significant SOM loss (from 3.9 to 2.2%), with humic acids

predominating in SOM composition. This effect was most likely associated with the removal of more mobile SOM components outside the soil profile in the more humic climate of the Lipetsk region.

Key words: endogenous hydrogen; soil organic matter; humic acids; fulvic acids

How to cite: Sukhanova N.I., Kiryushin K.A. Humus status of chernozem soils formed under deep hydrogen release and different humidification conditions // *The Journal of Soils and Environment*. 2022. 5(3). e184. DOI: 10.31251/pos.v5i3.184 (in Russian with English abstract).

REFERENCES

1. Akimov L.M., Bocharov V.L., Dmitriyeva V.A., Nesterov Yu.A., Nefedova E.G., Prokhorova O.V., Strogonova L.N., Fedotov V.I., Fedotov S.V. Information over the evaluation of municipal districts' productive forces in Voronezh region (agroclimatic, water, recreation and tourism resources), *Proceedings of Voronezh State University. Series: Geography. Geoecology*, 2014, No. 4, p. 68–126. (in Russian)
2. Akhtyrtshev A.B., Samoylova E.M. Influence of hydromorphism on distribution, accumulation and composition of humus in forest-steppe soils, *Vestnik Moskovskogo Universiteta. Seriya 17: Pochvovedenie*, 1983. No. 2. p. 3–11. (in Russian)
3. Voytov G.I., Osika D.G. Hydrogen Breathing of the Earth as a Reflection of Peculiarities of Geological Structure and Tectonic Development of its Megastructures, *Proceedings of Makhachkala Geological Institute*, 1982, p. 7–29. (in Russian)
4. Gumen A.M., Gusev A.P. Gas-geochemical indicators of geodynamic activity of deep faults in south eastern Belarus, *Litasfera*, 1997, No. 6, p. 140–149. (in Belarus)
5. Gumen A.M., Gusev A.P. Subsurface hydrogen as an indicator of changes in the stress-strain state of the earth's crust in seismic areas, *Doklady Rossijskoj akademii nauk*, 1998, No. 359, p. 390–393. (in Russian)
6. Gufeld I.L., Matveeva M.I. Barrier effect of degassing and destruction of the Earth's crust, *Doklady Akademii Nauk*, 2011, Vol. 438, No. 2. p. 677–680. (in Russian)
7. Efremenko M.A. *Modern geodynamically active zones of the Voronezh crystalline massif by geological, geophysical, and seismological data*. Abstract of Dissertation ... Cand. of Geol.-mineral. Sci. Moscow, 2011. 23 p. (in Russian)
8. Kanivets V.I. Interaction of hydrogen, methane and hydrogen sulfide with mineral part of soil, *Pochvovedenie*, 1970, No. 5, p. 52–59. (in Russian)
9. Nivin V.A., Pukha V.V., Lovchikov A.V., Rakhimov R.G. Features and factors of time variations in hydrogen release at Iovozersky rare-metal deposit (Kola peninsula), *Geochemistry International*, 2018, Vol. 56, No. 7. p. 688–701. DOI: 10.1134/S0016702918070078
10. Orlov D.S., Grishina L.A. *Workshop on the chemistry of humus*. Moscow: Publishing House of Moscow University, 1981, 273 p. (in Russian)
11. Panina L.V., Zaitsev V.A., Sentsov A.A., Agibalov A.O. Neotectonics of the East European platform central part, *Byulleten' moskovskogo obshchestva ispytateley prirody. Otdel geologicheskij*, 2016, Vol. 91, No. 4–5, p. 51–60. (in Russian)
12. Perevozchikov G.V. Geochemical research on hydrogen accumulation in the GAZLI gas field, *Petroleum Geology. Theoretical and Applied Studies*, 2012, Vol. 7, No. 1, p. 1–13. (in Russian)
13. Piskarev I.M., Ushkanov V.A., Aristova N.A., Likhachev P.P., Myslivets T.S. Establishment of the redox potential of water saturated with hydrogen, *Biophysics*, 2010, Vol. 55, No. 1, p. 13–17.
14. Rogozhin E.A., Gorbatikov A.V., Stepanova M.Yu., Larin N.V. Deep structure of the Moscow aulacogene in the western part of Moscow city, *Geophysical Processes and Biosphere*, 2010, Vol. 9, No. 2, p. 37–49. (in Russian)
15. Sukhanova N.I., Larin N.V., Kiriyushin A.V. Effect of endogenous hydrogen flux on chemical properties of soil, *Geopolitika i ekogeodinamika regionov*, 2014, Vol. 10, No. 1, p. 214–220. (in Russian)
16. Sukhanova N.I., Trofimov S.Y., Stepanov A.L., Kiryushin A.V. Specific features of Chernozemic soils in the area of the Koper deep fault in the Earth crust, *Eurasian Soil Science*. 2020. Vol. 53. No. 2. p. 197–206. DOI: 10.1134/S106422932002012X
17. Syvorotkin V.L. *Experimental confirmation of hydrogen concept of Earth ozone layer destruction*. In book: Earth System. Proc. of XIII scientific seminar. Moscow, 2005. p. 265–267. (in Russian)
18. Syvorotkin V.L. *Deep Earth Degassing and Global Catastrophes*. Moscow: Geoinformtsentr, 2002, 250 p. (in Russian)

19. Syvorotkin V.L. *Ozone anomalies over Voronezh - indicators of deep degassing*. Proceedings of the Lithological Council. "Lithology and minerals of Central Russia". July 3-8, 2000, p. 81–82. (in Russian)
20. Tregub A.I., Korabelnikov N.A., Tregub S.A., Starukhin A.A. Territorial forecast of dangerous exogenous geological processes in Lipetsk region, *Proceedings of Voronezh State University. Series: Geology*, 2008, No. 1, p. 147–152. (in Russian)
21. Firstov P.P., Shirokov V.A. Dynamics of molecular hydrogen and its relation to deformational processes at the Petropavlovsk-Kamchatskii geodynamic test site: evidence from observations in 1999–2003, *Geochemistry International*, 2005, Vol. 43, No. 11, p. 1056–1064.
22. Shestopalov V.M., Makarenko A.N. Some Results of Studies Developing the V.I. Vernadsky's Idea about "Gas Breathing" of the Earth. Paper 1. Surface and Nearsuburb Face Manifestations of Anomalous Degassing, *Geologichnyi zhurnal*, 2013, No. 3, p. 7–25. (in Ukraine)
23. Shcherbakov A.V., Kozlova N.D. Presence of hydrogen in subsurface fluids and connection of anomalous concentrations with deep faults in the USSR, *Geotektonika*, 1986, No. 2. p. 120–128. (in Russian)
24. Rhee T.S., Brenninkmeijer C.A.M., Röckmann T. The overwhelming role of soils in the global atmospheric hydrogen cycle, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2006, No. 6, p. 1611–1625. <https://doi.org/10.5194/acp-6-1611-2006>, 2006.
25. Larin N., Zgonnik V., Rodina S., Deville E., Prinzhofer A., Larin V. Natural Molecular Hydrogen Seepage Associated with Surficial, Rounded Depressions on the European Craton in Russia, *Natural Resources Research*, 2015, No. 24, p. 369–383. <https://doi.org/10.1007/s11053-014-9257-5>
26. Prinzhofer A., Moretti, I., Françolin J., Pachecodet C., D'Agostinoe A., Werlye J., Rupine F. Natural hydrogen continuous emission from sedimentary basins: The example of a Brazilian H₂-emitting structure, *International Journal of Hydrogen Energy*, 2019, Vol. 44, Is. 2, p. 5676–5685. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.01.119>
27. Simon J., Fulton P., Prinzhofer A. and Cathles L. Earth Tides and H₂ Venting in the Sao Francisco Basin, Brazil, *Geosciences*, 2020, No.10 (10), p. 414. <https://doi.org/10.3390/geosciences10100414>
28. Sugisaki, R., Ido M., Takeda H., Isobe Y., Hayashi Y., Nakamura N., Satake H., Mizutani Y. Origin of hydrogen and carbon dioxide in fault gases and its relation to fault activity, *The Journal of Geology*, 1983, Vol. 91, No. 3, p. 239–258. <https://doi.org/10.1086/628769>
29. 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, Vol. 46, No. 2, p. 135–144. <https://doi.org/10.1134/S1064229313020142>
30. Sukhanova N.I., Zubkova T.A. State of organic matter and particularities of physicochemical properties of soils in the endogenous hydrogen seepage zones, *Open Journal of Soil Science*, 2018, No. 8, p. 186–196. <https://doi.org/10.4236/ojss.2018.88015>
31. Sukhanova N.I., Lysak L.V., Kiryushin A.V. Influence of Hydrogen Fluid on Plants in Natural Conditions and a Model Experiment, *Moscow University Soil Science Bulletin*, 2019, Vol. 74, No. 5, p. 208–213. <https://doi.org/10.3103/S0147687419050053>
32. Wakita H., Nakamura Y., Kita I., Fujii N., Notsu K. Hydrogen release: new indicator of fault activity, *Science*, 1980, Vol. 210, p. 188–190. <https://doi.org/10.1126/science.210.4466.188>
33. Ware R.H., Roecken C., Wyss M. The detection and interpretation of hydrogen in fault gases, *Pure and Applied Geophysics*, 1984, Vol. 122, p. 392–402. <https://doi.org/10.1007/BF00874607>
34. Zgonnik V., Beaumont V., Deville E., Larin N., Pillot D., Farrell K.M. 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, Vol. 2, p. 31. <https://doi.org/10.1186/s40645-015-0062-5>
35. Zgonnik V. The occurrence and geoscience of natural hydrogen: A comprehensive review, *Earth-Science Reviews*, 2020, Vol. 203, p. 103140. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2020.103140>

Received 17 June 2022

Accepted 17 October 2022

Published 01 November 2022

About the author(s):

Sukhanova Natalia Ivanovna – Candidate of Biological Sciences, Senior Researcher, Soil Chemistry Department, Lomonosov Moscow State University (Moscow, Russia); vogudin@yandex.ru

Kiryushin Alevey Valereivich – Candidate of Biological Sciences, Senior Lecturer, the Soil Chemistry Department, Lomonosov Moscow State University (Moscow, Russia); akiriushin@mail.ru

The author(s) read and approved the final manuscript



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