

2  
НОМЕР

БОНЦ

ISSN 2304-9081

ЭЛЕКТРОННЫЙ ЖУРНАЛ

On-line версия журнала на сайте

<http://www.elmag.uran.ru>

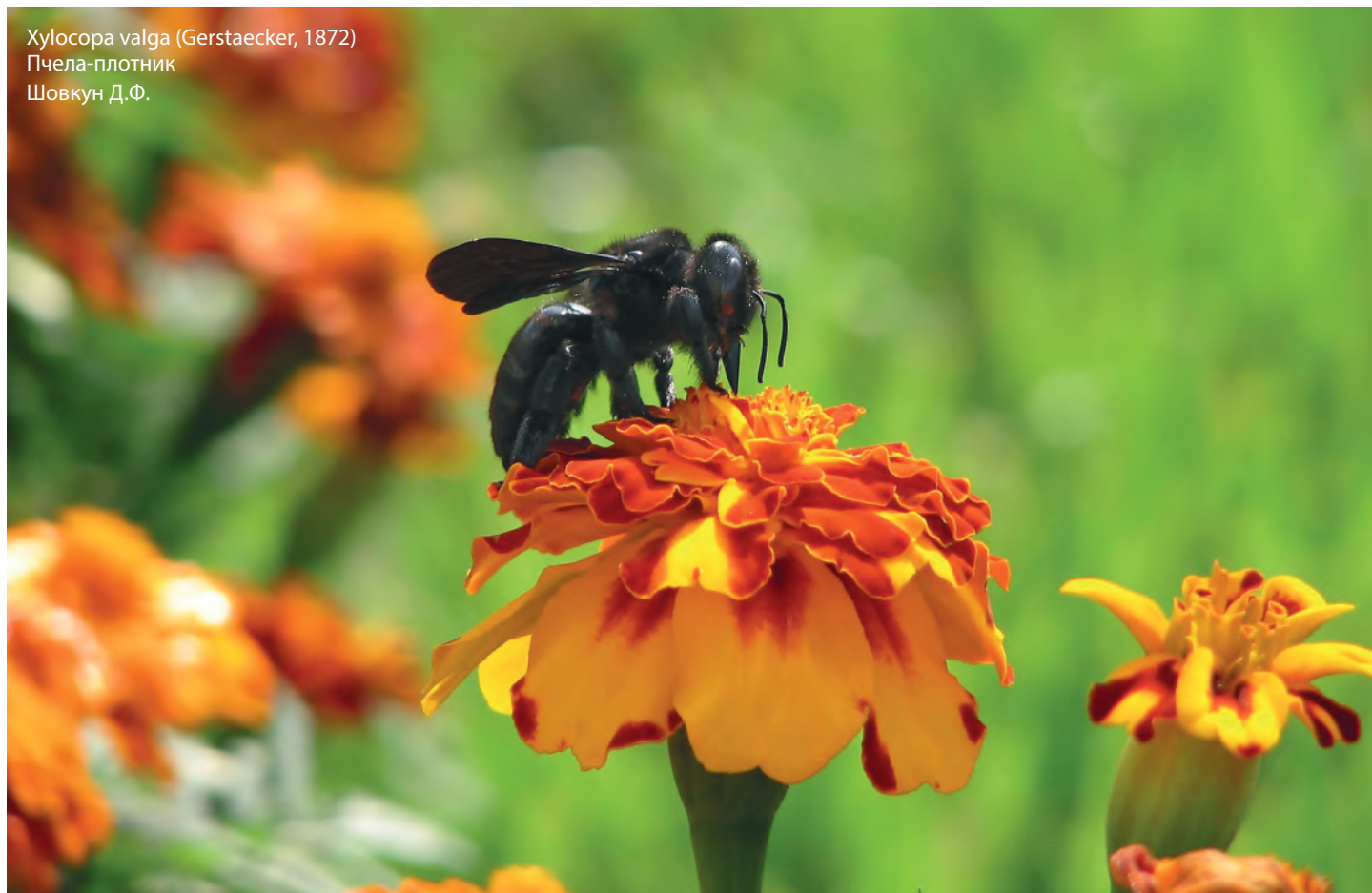
# БЮЛЛЕТЕНЬ

ОРЕНБУРГСКОГО НАУЧНОГО ЦЕНТРА УРО РАН

*Xylocopa valga* (Gerstaecker, 1872)

Пчела-плотник

Шовкун Д.Ф.



2019

УЧРЕДИТЕЛЬ

ОРЕНБУРГСКИЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР УРО РАН

© Ю.М. Нестеренко, 2019

УДК 550.424 (1-924.86)

*Ю.М. Нестеренко*

## **МИГРАЦИЯ ХИМИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ В ЗОНЕ АЭРАЦИИ СТЕПЕЙ ЮЖНОГО УРАЛА И ЗАВОЛЖЬЯ**

Оренбургский федеральный исследовательский центр УрО РАН (Отдел геоэкологии), Оренбург, Россия

Рассмотрены вопросы миграции химических элементов и их соединений через многометровую иссушенную зону аэрации в степной зоне Южного Урала и Заволжья. Они мигрируют с инфильтрующимися талыми и дождевыми водами в понижениях рельефа. Растворяя химические соединения в грунтах под ними, они выносят их в подземные воды. Под возвышениями рельефа сохраняется природная высокая минерализация грунтов зоны аэрации. Слоистое строение зоны аэрации с переменным и малым коэффициентом фильтрации обусловило длительное взаимодействие воды с грунтами. Проходя различные геохимические барьеры, они неоднократно меняют химический состав и величину минерализации. На орошаемых землях из зоны аэрации соли выносятся в центральную межканальную зону и в подземные воды верховодками, образующимися возле каналов.

*Ключевые слова:* зона аэрации, степная зона, миграция химических элементов в грунтах, Южный Урал, Заволжье.

---

---

*Y. M. Nesterenko*

## **MIGRATION OF CHEMICAL ELEMENTS IN THE AERATION ZONE OF STAGES OF THE SOUTHERN URALS AND ZAVOLZHE**

Orenburg Federal Research Center, UB RAS (Department of Geoecology), Orenburg, Russia

The issues of migration of chemical elements and their compounds through a multi-meter dry aeration zone in the steppe zone of the Southern Urals and the Trans-Volga region are considered. They migrate with infiltrating melt and rain waters in depressions of the relief. Dissolving chemical compounds in the soils below them, they carry them into groundwater. Under the elevations of the relief, the natural high mineralization of the soils of the aeration zone is preserved. The layered structure of the aeration zone with a variable and low filtration coefficient caused a long-term interaction of water with the soil. Passing through various geochemical barriers, they repeatedly change the chemical composition and the amount of mineralization. On irrigated lands, from the aeration zone, salts are carried to the central inter-channel zone and to groundwater by water pipes that form near the canals.

*Key words:* aeration zone, steppe zone, migration of chemical elements in soils, South Ural, Zavolzhie.

### **Введение**

Химические элементы и их соединения мигрируют в зоне аэрации под воздействием множества факторов, часто взаимозависимыми.

Природные воды в процессе круговорота обуславливают перенос химических элементов и их соединений в зоне аэрации над подземными водами и в водоносных горизонтах.

Миграционные процессы химических элементов в грунтах охарактеризованы В.И. Вернадским [1, 2] как сложная равновесно-неравновесная система: порода – вода – газ – живое вещество, лежащая в основе изменений химического состава природных вод и вмещающих их почв, грунтов и горных пород. Значительный вклад в эту систему вносит неживое органическое вещество, накапливаемое в почвенном слое степной и лесостепной зон, определяя количество и качество инфильтрующейся воды в зону аэрации.

Огромное значение в понимании природных и техногенных гидрогеохимических процессов имеет учение А.Е. Ферсмана [3] о миграции химических элементов в водовмещающих породах. Под миграцией элементов понимается их перемещение в различных оболочках Земли с рассеянием на одних участках и концентрацией на других. А.Е. Ферсман обнаружил, что атомы элементов непрерывно движутся и проходят через различные фазовые состояния. Их перемещение связано со стремлением системы к энергетическому равновесию и направлено в сторону образования веществ с наименьшим количеством свободной энергии. В ходе миграции происходит отклонение концентраций того или иного элемента от кларка (среднего весового содержания элемента в земной коре) в сторону накопления или в сторону рассеяния.

Миграция химических элементов в основном зависит от строения атомов и их соединений и показателей среды. А.Е. Ферсман разделяет факторы миграции на две группы – внутренние и внешние. К внутренним относятся: химические свойства соединений, качество связи, энергетические свойства ионов, гравитационные и радиоактивные свойства атомов. Основой представления о роли внутренних факторов в процессах миграции является размер атомов и ионов, входящих в состав различных веществ [4]. К внешним факторам миграции относятся параметры среды, в которой перемещаются химические элементы. В верхней части земной коры основными внешними параметрами, определяющим миграцию химических элементов, являются водная среда и вмещающие ее твердая и газообразная среды. Важное значение для их миграции имеет соотношение между твердой, жидкой и газообразной средами и их параметрами. Основные параметры миграции химических элементов с водной средой – температура, концентрация водного раствора, величины рН-Eh, и доля воды в данной природной среде.

Химические элементы, мигрирующие в почвах, грунтах зоны аэрации и подземных водах зоны активного водообмена, в зависимости от их раствори-

мости и распространенности образовавшихся из них соединений можно разделить на три группы [5].

К первой группе относятся анионогенные и катионогенные элементы, имеющие большую концентрацию (высокий кларк) в природе и характеризующиеся хорошей растворимостью образующихся с их участием соединений:  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Cl}$ ,  $\text{S}(\text{SO}_4^{2-})$ ,  $\text{C}(\text{HCO}_3^- \text{ и } \text{CO}_3^{2-})$ . Они всегда имеются в почвах, грунтах зоны аэрации и природных водах, их содержание в них может достигать больших величин.

Ко второй группе относятся анионогенные и катионогенные элементы с высоким кларком, но низкой растворимостью в воде:  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{Fe}^{2+}$ ,  $\text{Fe}^{3+}$ ,  $\text{Al}^{3+}$ ,  $\text{SiO}_2$  и органические вещества. Они всегда присутствуют в почве, грунтах, но в природных водах их содержание обычно невелико. В почвах и грунтах их содержание относительно высокое, что обуславливает постоянное их наличие в природных водах.

К третьей группе относятся микрокомпоненты. При малом кларке и часто плохой растворимости они не имеют существенного значения в химическом составе природных вод. Но они имеют важное значение для неживой и живой материи, создающей почвенный покров, из которого химические элементы и органическое вещество мигрируют в земную кору и природные воды. Поэтому изучение миграции микрокомпонентов в различных средах немаловажно для понимания процессов, идущих в природе. К микрокомпонентам относятся  $\text{Br}$ ,  $\text{J}$ ,  $\text{Ba}$ ,  $\text{Sr}$ ,  $\text{Li}$ , радиоактивные элементы  $\text{Ra}$  и  $\text{U}$  и элементы рудообразующих минералов ( $\text{Pb}$ ,  $\text{Cu}$ ,  $\text{Zn}$ ,  $\text{Co}$ ,  $\text{Cr}$ ,  $\text{Ni}$ ,  $\text{As}$ ,  $\text{Mo}$  и др.).

Особенности рассмотренных групп химических элементов находятся в основе их миграции в зоне аэрации, подземных водах и их экологического состояния. В данной работе рассмотрены особенности миграции химических элементов в аридных зонах, в основном их первой группы, играющей основную роль в изменениях химического состава почв, грунтов и подземных вод.

Природные воды, являясь основой природных процессов, в значительной мере управляют процессами миграции химических элементов и их соединений в зоне аэрации степной зоны.

Инфильтрационное питание подземных вод через мощную зону аэрации вододефицитных территорий определяет особенности состава химических элементов в грунтах зоны аэрации и подземных водах. Антропогенные изменения в балансе и режиме природных вод обуславливают соответствующее

ющие изменения в миграции химических элементов и их соединений в почвенном слое, в зоне аэрации, и поступление их в подземные воды.

Для вододефицитных территорий, как отмечено в нашей работе [6], характерно сосредоточенно-аккумулятивное движение воды через мощную преимущественно сухую зону аэрации и часто сложенную грунтами различного строения и химического состава с различными коэффициентами фильтрации. На участках водосбора с относительно интенсивным нисходящим потоком влаги в понижениях рельефа, в местах скопления снега и талых вод возле строений, под лесными полосами, под оросительными каналами в местах потерь воды из водопроводной и канализационной сети (гидрогеологических окнах) формируется нисходящий промывной режим, выносящий из зоны аэрации растворимые химические элементы и соединения в водоносные горизонты, а также в прилегающие к ним, иссушенные участки с замедленным водообменом в процессе растекания верховодок.

На рисунке 1 представлены эпюры химического состава грунтов под понижениями и возвышениями рельефа. На опытном участке под возвышениями рельефа на глубине 2-4 м в условиях малой подвижности влаги отмечается высокое (до 14 мг-экв) содержание подвижных катионов  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$  и  $\text{Mg}^{2+}$  и анионов  $\text{Cl}^-$  и  $\text{SO}_4^{2-}$ ; в условиях промывного режима под понижениями рельефа суммарное их содержание в 10 раз меньше.

Вымываемые в гидрогеологических окнах химические элементы увеличивают минерализацию воды, мигрирующей в подземные водоносные горизонты. На рисунке 2 показана эпюра химического состава верховодки, сформировавшейся под понижением рельефа в глинистой зоне аэрации богарного Покровского опытного участка возле г. Оренбурга. Слоистое строение зоны аэрации с переменным и малым коэффициентом фильтрации обусловило длительное взаимодействие воды с грунтами. Для достижения 1-го водоносного горизонта, расположенного на глубине 35 м, талым водам требуется около 3-х лет. За это время, проходя различные геохимические барьеры, они неоднократно меняют химический состав и величину минерализации.

На глубинах 4 и 13 м суммарное содержание анионов и катионов в водонасыщенных грунтах достигает 30 мг-экв. На глубине 10 м в промежуточном между ними слое их содержание в 2 раза меньше. Глубже 15 м, перед поступлением фильтрующихся вод в водоносный горизонт, идет постепенное уменьшение их минерализации до 5 мг-экв.

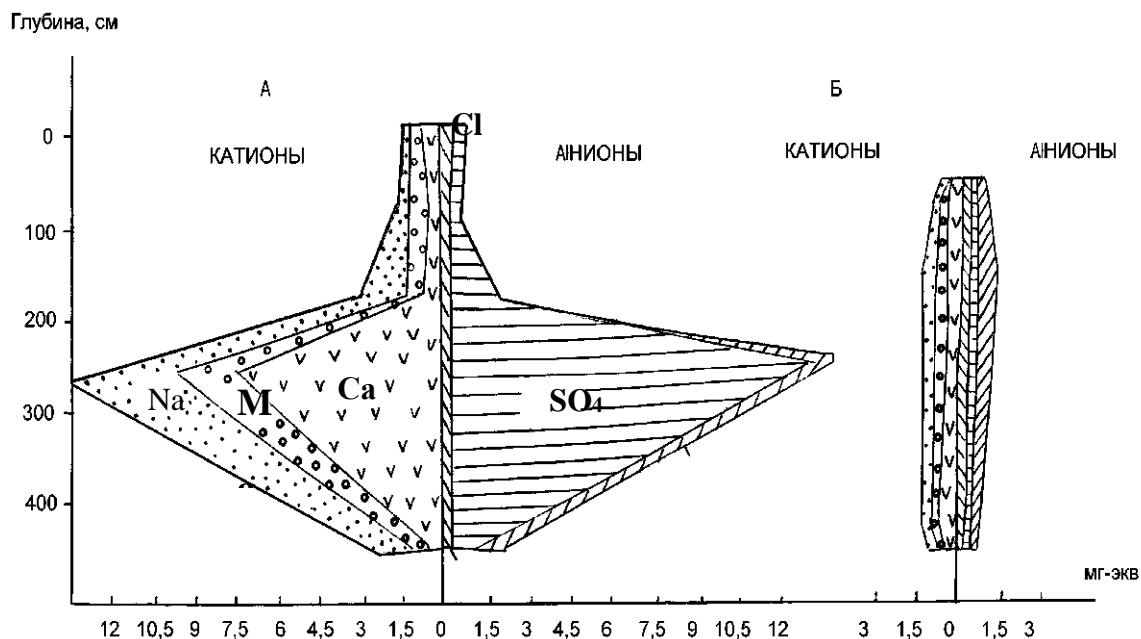


Рис. 1. Эпюры минерализации грунтов аэрации: А – под возвышениями и Б – под понижениями рельефа.

Интенсивное изменение химического состава воды в грунтах зоны аэрации и формирующихся в ней верховодок является важной особенностью воддефицитной степной зоны, и требуются дополнительные их исследования. Исследования техногенной метаморфизации химического состава подземных вод Южного Урала [5] выявили быструю пространственную их изменчивость по типу и степени минерализации.

На орошаемых и неорошаемых землях наблюдается неравномерное во времени и по площади инфильтрационное питание подземных вод. При орошении наименьшее количество растворимых химических элементов и соединений наблюдается возле каналов. Сформировавшаяся под ними верховодка существенно изменяет динамику солевого режима всей зоны аэрации. Растекаясь в межканальную зону и фильтруясь через условный водоупор, она в этих же направлениях смещает и растворимые химические соединения. Верховодка, растекаясь, перемещает их в центральную часть межканальной зоны, где они накапливаются и постепенно с ней движутся в более глубокие слои грунтов под условным водоупором, а часть их будет накапливаться в центральной части межканальной зоны.

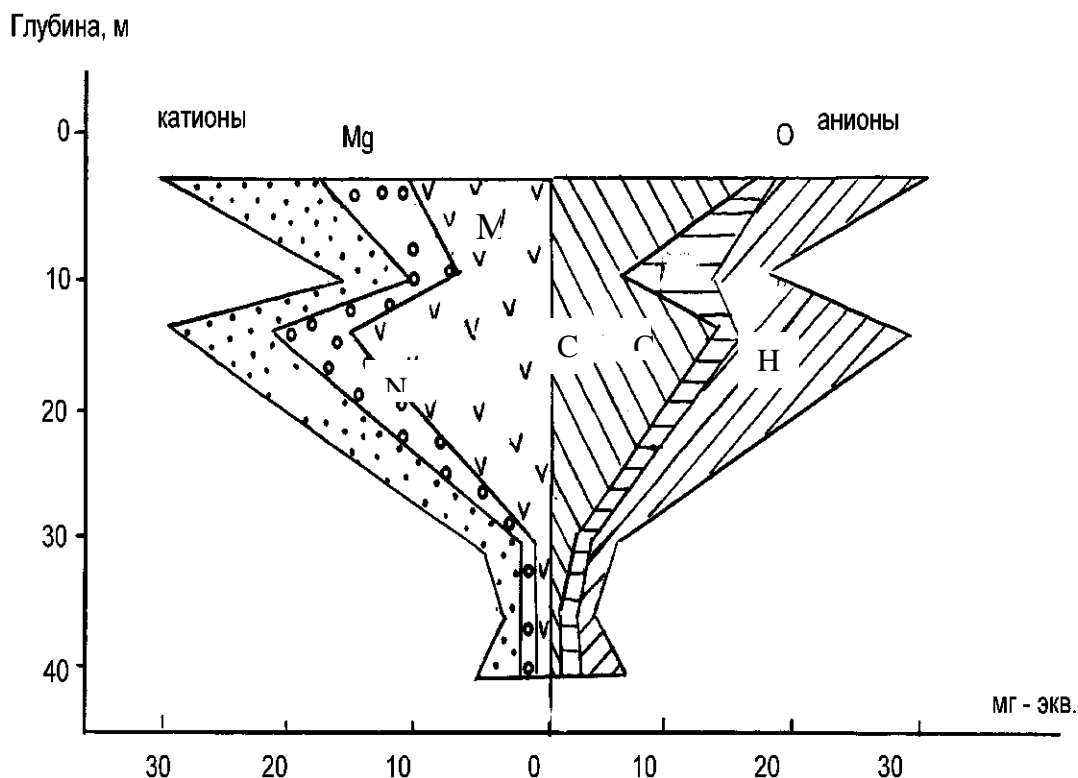


Рис. 2. Химический состав верховодки в зоне аэрации Покровского опытного участка.

В таблице 1 представлена зависимость минерализации и химического состава верховодки, а в таблице 2 – водной вытяжки грунтов в зависимости от расстояния до канала на Ершовском орошаемом участке.

Засоленность верховодки резко возрастает с 4,08 г/л возле канала до 13,06 г/л на расстоянии 265 м от него.

Таблица 1. Химический состав верховодки в зависимости от глубины залегания и расстояния до канала, г/л

№№ скважин	Глубина до верховодки, м	Расстояние до канала, м	Сухой остаток	НСО <sub>3</sub>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	CL <sup>-</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup> +K <sup>+</sup>
Вода из канала	-	0	0,412	0,205	0,046	0,091	0,056	0,019	0,057
14	2,0	15	4,080	0,605	2,090	0,292	0,553	0,143	0,514
15	4,0	100	5,132	0,669	3,026	0,091	0,393	0,214	0,905
16	6,0	180	9,164	0,400	5,412	0,621	0,709	0,365	1,619
21	9,5	256	13,06	0,186	3,011	5,560	0,930	0,749	2,634

При том содержание хлора увеличивается в 20 раз и достигает 5,56 г/л. Увеличение количества солей в верховодке произошло в результате их выно-

са из приканальной зоны, где произошло опреснение грунтов (скв. №№ 14 и 16) фильтрующимися талыми и поливными водами.

Таблица 2. Химический состав водной вытяжки грунтов верховодки, % от веса грунта

№№ скважин	Расстояние от канала, м	Глубина залегания верховодки, м	Глубина взятия образца, м	Сухой остаток	HCO <sub>3</sub> '	SO <sub>4</sub> '	CL'	Ca''	Mg'	Na'+K'
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
В почвенном профиле										
14	15	2,0	0,0-0,1	0,126	0,039	0,033	0,019	0,014	0,005	0,018
			0,6-0,7	0,410	0,066	0,049	0,005	0,016	0,005	0,024
			0,9-1,0	0,166	0,059	0,060	0,011	0,016	0,005	0,030
15	100	4,0	0,0-0,1	0,166	0,017	0,082	0,011	0,022	0,004	0,021
			0,6-6,7	0,168	0,044	0,064	0,016	0,018	0,006	0,026
			0,9-1,0	0,146	0,041	0,067	0,005	0,014	0,005	0,026
16	180	6,0	0,0-0,1	0,245	0,044	0,109	0,010	0,016	0,004	0,050
			0,6-0,7	0,205	0,054	0,092	0,012	0,014	0,005	0,047
			0,9-1,0	50	0,044	0,057	0,013	0,008	0,004	0,037
В подпочвенных грунтах										
14	15	2,0	1-2	0,152	0,033	0,026	0,039	0,014	0,008	0,020
16	180	6,0	1-6	0,244	0,068	0,093	0,11	0,006	0,004	0,062
22*	-	Верховодки нет	1-6	0,645	0,036	0,074	0,041	0,045	0,020	0,129
В водоносном слое										
14	15	2,0	2-14	0,630	0,038	0,383	0,014	0,083	0,023	0,09
16	180	6,0	6-14	1,000	0,024	0,540	0,113	0,133	0,051	0,139
21	265	9,5	9-14	0,861	0,025	0,499	0,083	0,106	0,032	0,116
22	450	Верховодки нет	6-14	0,412	0,034	0,120	0,120	0,20	0,009	0,109
В грунтах под условным водоупором										
14	15	2,0	14-16	0,524	0,038	0,300	0,032	0,064	0,001	0,103
16	180	6,0	14-16	0,543	0,028	0,177	0,146	0,042	0,018	0,108
21	265	9,5	14-20	0,626	0,029	0,154	0,15	0,051	0,017	0,134
22	450	Верховодки нет	14-17	0,374	0,031	0,080	0,140	0,022	0,010	0,098

Примечание: \* - на соседнем неорошаемом участке.



С удалением от канала (скв. №21) фильтрация поливных вод мала и поэтому содержание плотного остатка в зоне аэрации в сравнении с неорошаемым участком уменьшилось всего на 0,146% от веса сухой почвы. Однако содержание легкоподвижного хлора уменьшилось более чем в 3 раза (табл. 2).

В зоне верховодки на всем поливном участке наблюдается увеличение засоленности грунтов в сравнении с неорошаемым полем. Притом, с удалением от канала их засоленность возрастает с 0,630% до 1-0,861% от веса сухих грунтов.

В грунтах под условным водоупором содержание сухого остатка в водной вытяжке увеличивается в 1,5-2 раза в сравнении с неорошаемым участком. Возле канала, где верховодка образовалась в первые годы эксплуатации оросительной системы, наблюдается вымывание солей и особенно хлора, в более глубокие слои грунтов. На большом расстоянии от канала (скв. № 21), где верховодка, образовавшаяся в последние годы эксплуатации системы, не успела вынести соли глубже, содержание хлора лишь в 1,5 раза выше, чем на неорошаемом поле. Можно сделать вывод, что динамика солевого режима верховодки и грунтов подтверждает разработанную нами схему развития верховодки на открытых оросительных системах в межканальную зону и инфильтрацию через условный водоупор [6]. Часть солей фильтруется с верховодкой через условный водоупор в более глубокие слои сыртовых глин, а часть солей концентрируется в верховодке в центральной части межканальной зоны. В результате создается опасность засоления почвенного профиля в центральной межканальной зоне при подъеме верховодки до «критического» уровня. Высокое содержание хлора и натрия в верховодке создает предпосылки для натриево-хлоридного засоления.

При орошении в почву и глинистые грунты поступает большое количество воды. Проходя по почвенному профилю и грунтам, она не только растворяет и перемещает растворимые соли, но и, взаимодействуя с минералами, почвой и глинами, вызывает распад алюмосиликатов. Б.В. Андреев [7] на основе теоретических и экспериментальных исследований доказал, что при избыточном орошении ускоряется переформирование вторичных минералов. При переформировании натриевых или магниевых силикатов появляются

обменный натрий или обменный магний, которые нисходящим током воды выносятся в более глубокие слои. Количество выносимого натрия может в 20-50 раз превышать первоначальное содержание обменного натрия. Следовательно, процессы образования обменного натрия и обменного магния из вторичных минералов в глинистых грунтах в зоне верховодки могут служить одним из источников засоления верховодки и почвенного профиля.

### **Заключение**

Особенностью зоны аэрации на основной части вододефицитных территорий является большая мощность (5-50 м и более) и ее иссушенность. В результате осложняется процесс питания подземных вод атмосферными осадками и исключается возможность потребления подземных вод растительностью из капиллярной каймы. Миграция химических элементов в зоне аэрации и подземных водах маловодных территорий, подчиняясь основным законам химии и физики, имеет ряд существенных отклонений от их миграции в зонах избыточного и достаточного увлажнения.

Основная миграция химических элементов происходит в гидрогеологических «окнах» под понижениями рельефа, лесополосами и в других местах скопления поверхностных вод, где в среднем за год за пределы активного слоя грунтов фильтруется 100-300 мм и более талых и дождевых вод. В этих «окнах» суммарное содержание водорастворимых солей составляет 0,05-0,25% от веса сухих грунтов. Мигрируя с нисходящим током воды при растекании верховодки, химические элементы частично аккумулируются в слоях грунтов с малым коэффициентом фильтрации и в периферийной её части.

Под водоразделами и склонами, занимающими более 80% водосборов, при почти полном отсутствии поступления воды в зону аэрации за пределы активного слоя миграция водорастворимых солей почти не происходит. В иссушенных почти до ВРК грунтах их миграция может идти лишь в результате испарения и в случае растекания под ними верховодок. Верховодки, образующиеся на условных водоупорах в зоне гидрогеологических «окон», вытесняют водорастворимые химические элементы в свою периферийную часть, в грунты водоупоров и под них.

Глинистые осадочные породы под верховодками и в зоне их растекания являются гидрохимическими барьерами, предотвращающими поступление

водорастворимых солей в нижерасположенные подземные воды. Малая дренированность глинистых и суглинистых грунтов зоны аэрации на основных орошаемых массивах региона с открытой оросительной сетью обусловила образование верховодок возле каналов и других местах аккумуляции вод поверхностного стока и потерь поливных вод. Из них вода, растекаясь и фильтруясь через условные водоупоры, выносит растворимые соли в межканальное пространство и в нижние слои зоны аэрации и затем в подземные воды.

В условиях Южного Урала и Сыртового Заволжья на открытых оросительных системах ирригационное засоление почв возможно лишь в центральной части межканальной зоны через 30-40 лет их эксплуатации, что подтверждается мелиоративным состоянием длительно эксплуатируемых систем в этих регионах.

#### **ЛИТЕРАТУРА**

1. Вернадский В.И. Биосфера. М.: Мысль, 1967. 375 с.
2. Вернадский В.И. Избранные сочинения. Т.4. М.: Изд-во АН СССР.1960. 652 с.
3. Ферсман А.Е. Избранные труды. М.: Изд-во АН СССР, 1955. Т. 3.798 с; Т.4. 588 с.
4. Лебедев А.В. Методические рекомендации по изучению режима и баланса влаги в зоне аэрации в целях составления прогноза питания грунтовых вод. М.: ВСЕГИНГЕО, 1972. 115 с.
5. Самарина В.С., Гаев А.Я., Нестеренко Ю.М. и др. Техногенная метаморфизация химического состава природных вод (На примере эколого-гидрогеохимического картирования бассейна реки Урал, Оренбургская область). Екатеринбург: Изд-во УрО РАН, 1999. 444 с.
6. Нестеренко Ю.М. Водная компонента аридных зон: экологическое и хозяйственное значение. Екатеринбург: УрО РАН, 2006. 287 с.
7. Андреев Б.В. Теоретические основы повышения плодородия солонцов и солонцеватых почв Сыртового Заволжья и динамика химических процессов в них при орошении: Автореф. дисс. д.с.-х.н. М., 1981. 42 с.

*Получена 2 марта 2019 г.*

*(Контактная информация: **Нестеренко Юрий Михайлович** – доктор географических наук, доцент, заведующий отделом геоэкологии Оренбургского федерального исследовательского центра УрО РАН; адрес: 460014, Оренбург, ул. Набережная, д. 29, а/я 59; тел./факс (3532) 77-06-60 e-mail: [geoecol-onc@mail.ru](mailto:geoecol-onc@mail.ru))*

---

---

#### **LITERATURE**

1. Vernadskiy V.I. Biosfera. M.: Mysl', 1967. 375 s.
2. Vernadskiy V.I. Izbrannye sochineniya. T.4. M.: Izd-vo AN SSSR.1960. 652 s.
3. Fersman A.E. Izbrannye trudy. M.: Izd-vo AN SSSR, 1955. T.3.798 s; T.4.588 s.
4. Lebedev A.V. Metodicheskie rekomendatsii po izucheniyu rezhima i balansa vlagi v zone aeratsii v tselyakh sostavleniya prognoza pitaniya gruntovykh vod. M.: VSEGINGEO, 1972. 115 s.
5. Samarina V.S., Gaev A.Ya., Nesterenko Yu.M. i dr. Tekhnogennaya metamorfizatsiya

khimicheskogo sostava prirodnykh vod (Na primere ekologo-gidrogeokhimicheskogo kartirovaniya basseyna reki Ural, Orenburgskaya oblast'). Ekaterinburg: Izd-vo UrO RAN, 1999. 444 s.

6. Nesterenko Yu.M. Vodnaya komponenta aridnykh zon: ekologicheskoe i khozyaystvennoe znachenie. Ekaterinburg: UrO RAN, 2006. 287 s.
7. Andreev B.V. Teoreticheskie osnovy povysheniya plodorodiya solontsov i solontsevatykh pochv Syrtovogo Zavolzh'ya i dinamika khimicheskikh protsessov v nikh pri oroshenii: Avtoref. diss. d.s.-kh.n. M., 1981. 42 s.

**Образец ссылки на статью:**

Нестеренко Ю.М. Миграция химических элементов в зоне аэрации степей Южного Урала и Заволжья. Бюллетень Оренбургского научного центра УрО РАН. 2019. 1: 10с. [Электр. ресурс] (URL: <http://elmag.uran.ru:9673/magazine/Numbers/2019-2/Articles/NYM-2019-2.pdf>)  
**DOI: 10.24411/2304-9081-2019-12001.**