УДК 631.4
DOI: 10.19047/0136-1694-2020-102-70-102

Ссылки для цитирования:
Хитров Н.Б., Роговнева Л.В., Паштецкий В.С. Изменение засоленности почв и грунтовых вод рисовых систем Присивашской низменности после прекращения орошения // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2020. Вып. 102. С. 70-102. DOI: 10.19047/0136-1694-2020-102-70-102
Cite this article as:
Khitrov N.B., Rogovneva L.V., Pashtetskiy V.S., Changes of soil salinity and ground waters at the rice systems in Sivash lowland after irrigation cease, Dokuchaev Soil Bulletin, 2020, V. 102, pp. 70-102, DOI: 10.19047/0136-1694-2020-102-70-102
Благодарность:
Работа выполнена по программе фундаментальных исследований Президиума РАН “Инновационные технологии в решении проблем развития агропромышленного комплекса России”, раздел “Трансформация, эволюция и деградация почв в условиях агрогенеза и глобальных изменений климата” 2015–2017 и 2018–2020 гг.
Acknowledgments:
The studies were carried out within the framework of fundamental research program of the Presidium of the Russian Academy of Sciences “Innovative technologies in solving problems of development of the agro-industrial complex of Russia”, section “Transformation, evolution and degradation of soils under the conditions of agrogenesis and global climate change” in 2015–2017 and 2018–2020.

Изменение засоленности почв и грунтовых вод рисовых систем Присивашской низменности после прекращения орошения

© 2020 г. Н. Б. Хитров[1*], Л. В. Роговнева[1], В. С. Паштецкий[2]

[1]*ФИЦ “Почвенный институт им. В.В. Докучаева”, Россия, 119017, Москва, Пыжевский пер, 7, стр. 2,*
[*]*https://orcid.org/000-0001-5151-5109, e-mail: khitrovnb@gmail.com.*
[2]*Научно-исследовательский институт сельского хозяйства Крыма, Россия, 295493, Республика Крым, Симферополь, ул. Киевская, 150.*

Поступила в редакцию 20.03.2020, *после доработки* 07.04.2020,
принята к публикации 22.06.2020

Резюме: Цель статьи – представить данные о положении грунтовых вод и солевом состоянии почв бывших рисовых систем в береговой полосе оз. Сиваш в Нижнегорском р-не Республики Крым в 2017–2018 гг., через 4–5 лет после прекращения орошения. Установлено, что большинство почв солонцовых комплексов на рисовой системе были рассолены до глубины 3–3.5 м за полвека орошения затоплением чеков. В 2017–2018 гг. грунтовые воды залегали на глубине ниже критической. Минерализация грунтовых вод имела мозаичное пространственное распределение, варьируя в диапазоне от 1.9 до 7.4 г/л с тенденцией ее увеличения по мере увеличения глубины грунтовой воды. В береговой полосе образовалась депрессионная воронка грунтовых вод с гидравлическим напором до 0.8–1.6 м со стороны моря. Отмечаются первые признаки начала восстановления засоленности грунтов зоны аэрации в виде (1) появления хлоридов кальция и магния в поровых растворах в формально незасоленных или слабозасоленных горизонтах, (2) тенденции увеличения активности ионов натрия и хлорид-ионов, измеренных в пастах с влажностью 50% (мас.), в 2018 г. по сравнению с 2017 г. на динамических площадках, (3) увеличения частоты встречи горизонтов зоны аэрации, содержащих скопления мелкокристаллического гипса.

Ключевые слова: активность ионов натрия, активность хлорид-ионов, уровень грунтовых вод, депрессионная воронка грунтовых вод, засоленные почвы, зона аэрации.

Changes of soil salinity and ground waters at the rice systems in Sivash lowland after irrigation cease

N. B. Khitrov[1*], L. V. Rogovneva[1], V. S. Pashtetskiy[2]

[1]*Federal Research Centre "V.V. Dokuchaev Soil Science Institute",*
7 Bld. 2 Pyzhevskiy per., Moscow 119017, Russian Federation,
[*]*https://orcid.org/000-0001-5151-5109, e-mail: khitrovnb@gmail.com.*

[2]*Research Institute of Agriculture of Crimea,*
150 Kievskaya Str., Simferopol 295493, Republic of Crimea,
Russian Federation

Received 20.03.2020, *Revised* 07.04.2020, *Accepted* 22.06.2020

Abstract: The aim of the article is to submit data about ground water table and soil salinity of the rice irrigated systems at the Sivash seashore in

Nyzhnegorsky district of Crimea in 2017–2018 which is 4–5 years from irrigation cease. It was found that many soil cover patterns with salt-affected solonetz at the rice system were leached from salts to the depth about 3–3.5 m by flooding irrigation during half a century. In 2017–2018 ground water tables were deeper than the critical depth. Ground water mineralization is characterized by mosaic spatial distribution, varying from 1.9 to 7.4 g/l with a tendency to growth as ground water depth increases. Depression funnel of ground water table was formed at the seashore. The bottom water drive is up to 0.8–1.6 m relatively sea level. The first symptoms of the salinity returning in grounds of vadose zone were found: (1) appearance of calcium and magnesium chlorides in pore solutions of formally no saline or weakly saline horizons; (2) increasing trend of sodium and chloride ion activity measured in pastes with moisture 50% (w) at the dynamic plots in 2018 as compared with 2017; (3) frequency of grounds with clustered gypsum crystals is increased.

Keywords: sodium ion activity, chloride ion activity, ground water table, depression funnel of ground water table, salt-affected soils, vadose zone.

ВВЕДЕНИЕ

Для обеспечения развития засушливых районов равнинной части Крымского п-ва в 1960-х годах был построен Северо-Крымский канал, по которому поступала днепровская вода из Каховского водохранилища. Вода имела минерализацию 0.37–0.57 г/л, возрастающую по мере ее транспортировки по каналу с земляным руслом. Состав воды сульфатно-гидрокарбонатный кальциево-магниево-натриевый, pH воды варьировал от 7.5 до 9.95, по мере увеличения минерализации воды увеличивалась доля магния и особенно натрия, величина SAR = 2–3. Оросительная система Северо-Крымского канала сильно разветвлена, охватывая большую часть равнинного Крыма. В ее состав входили многочисленные орошаемые массивы с полевыми севооборотами, орошаемые сады и рисовые системы.

Согласно Почвенной карте Крымской области, до строительства рисовых систем почвенный покров был представлен лугово-каштановыми солонцовыми комплексами, большинство почв которых отличалось сильной степенью засоления (Клепинин, 1935; Дзенс-Литовская, 1957; Новикова, 1958; Севастьянов, 1959; Половицкий, Гусев, 1987; Драган, 2004; Кізяков, 2005). Такие почвенные комплексы сохранились на целинных участках вокруг ри-

совыхсистем Присивашской низменности. Обычно они используются под пастбища. Характеристика одного из профилей солонца лугового каштанового среднего солончакового сильнозасоленного сульфатно-хлоридного с гипсом глинистого на делювиальных глинах (разр. КР-077), расположенного в Нижнегорском р-не в 2 км от чеков рисовой системы в 2016 г., представлена в работе (Чижикова и др., 2017).

После ввода в эксплуатацию в 1960-х годах рисовых систем на Присивашской низменности почвы стали подвергаться интенсивной промывке от легкорастворимых солей днепровской водой, поступающей по Северо-Крымскому каналу. По данным многих авторов (Супряга, 1971; Янчковский, 1973; Лактионов, Карпович, 1967; Лактионов, Малеев, 1990; Кизяков, 1977; Кизяков, Тронза, 2002, 2004; Кизяков и др., 2001, 2002; Гусев, Титков, 1973; Титков, Гусев, 1975, 1988; Титков, Кольцов, 1995; Тронза, 2002; Балюк и др., 2006; Наукові основи..., 2009; Титков, 2011), сильнозасоленные солончаковые солонцы и солончаковатые лугово-каштановые почвы Крыма по мере их использования под культуру риса путем затопления чеков стали слабозасоленными или незасоленными в слое 0–100 см.

В 2015 г., через год после прекращения подачи воды по Северо-Крымскому каналу, в условиях постепенного растекания куполов грунтовых вод под орошаемыми массивами и каналами наблюдалось быстрое понижение уровня грунтовых вод и появилась возможность оценить засоленность грунтов глубже 1 м. По нашим данным (Хитров и др., 2016), почвы, грунты зоны аэрации и верхней части водоносного горизонта на территории бывшей рисовой системы в Красноперекопском р-не Крыма по формальным критериям оказались незасоленными до глубины 3.5 м. По данным Крымской гидрогеолого-мелиоративной экспедиции (Национальный доклад..., 2018, с. 104), на Присивашской низменности в зоне развития плиоцен-четвертичного водоупора к концу вегетационного периода 2016 г. произошло полное растекание куполов ирригационно-грунтовых вод под каналами и бывшими орошаемыми зернокормовыми и рисовыми севооборотами.

Учитывая исходную природную засоленность почв Присивашской низменности, связанную с более высоким уровнем моря в

прежние эпохи, колебаниями уровня минерализованных грунтовых вод, и засушливым климатом в настоящее время, в условиях прекращения подачи воды на рисовые системы Крыма, расположенные в непосредственной близости к Сивашу и Каркинитскому заливу Черного моря, следует необходимость оценки весьма вероятного риска восстановления засоленности почв на прибрежных территориях степного Крыма для выработки превентивных мер его реального развития.

Потенциальными критериями оценки процесса восстановления засоленности почв в условиях бывших рисовых систем Крыма могут быть:

- соотношение реальной глубины грунтовых вод с ее критическим значением; засоление почв начинается в условиях более близкого залегания грунтовых вод по сравнению с критическим (2.5 м в Крыму);
- увеличение минерализации грунтовых вод во времени;
- возникновение гидравлического напора соленых морских вод в сторону берега, в результате которого будет происходить постепенное замещение грунтовых вод морской водой;
- в условиях сульфатно-натриевого состава грунтовых вод появление в почвах горизонтов с мучнистым гипсом в пределах первого метра – это индикатор восходящего движения растворов за счет капиллярного поднятия от грунтовых вод, постепенного замещения обменного кальция натрием раствора с последующим осаждением вытесненного кальция в виде гипса – сульфата кальция;
- увеличение содержания хлоридов в верхней части капиллярной каймы;
- увеличение содержания водорастворимого натрия в породах зоны аэрации и тем более в почвенных горизонтах;
- собственно накопление легкорастворимых солей в почвенных горизонтах в количестве, соответствующем слабой или более высокой степени засоления по действующей классификации.

Указанные выше критерии оценки перечислены в порядке потенциального развития во времени процесса накопления солей в грунтовых водах, грунтах зоны аэрации и затем в почвах.

Цель статьи – представить данные о положении грунтовых

вод и солевом состоянии почв бывших рисовых систем в береговой полосе оз. Сиваш через 4–5 лет после прекращения орошения.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Объектами исследования послужили почвы и грунтовые воды Азовской рисовой системы, расположенной на Присивашской низменности в Нижнегорском и частично в Джанкойском р-нах Республики Крым.

В 2017 г. было заложено четыре трансекты разной длины от берега Сиваша вглубь территории на бывших рисовых системах, питавшихся из Азовской ветви Северо-Крымского канала (рис. 1).

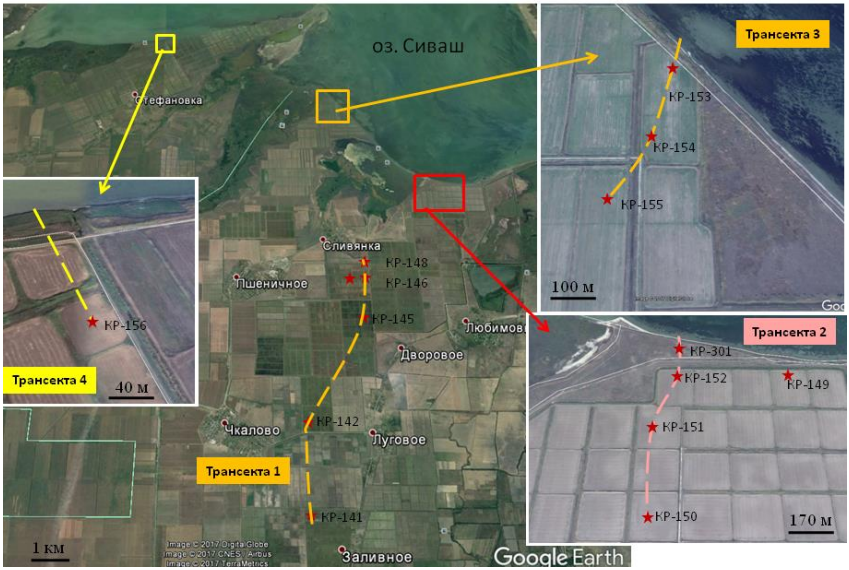

Рис. 1. Схема объектов исследования на рисовой системе.
Fig. 1. The scheme of study objects at the rice irrigated system.

Работы на трансектах включали ручное бурение до грунтовой воды, отбор образцов почв, грунтов и грунтовых вод для полевых и лабораторных измерений содержания солей и нивелирный ход. Исключением являлась трансекта 1 от с. Сливянка до с. Заливное, для которой высотные отметки скважин получены по

материалам дистанционного зондирования с портала Google Earth.

Названия почв даны по классификации почв России (2004) в ее более поздней версии (Полевой определитель почв России, 2008) и по международной классификации почв WRB-2014 (IUSS, 2015), используя диагностические критерии, принятые в каждой классификации.

По исследованиям 2015–2017 гг., почвенный покров бывших рисовых чеков представлен пятнистостью двух типов агроземов. На месте бывших солонцов возникли агроземы поверхностно-глеевые текстурно-дифференцированные аккумулятивно-карбонатные окисленно-глеевые глубокосолончаковатые глубоко гипс-содержащие тяжелосуглинистые на желто-бурых суглинках и глинах с формулой профиля PU/Gox – BTg,ox – BCAq,g,th – BCAnc,q – BCca,cs,g, по WRB (IUSS, 2015) – Eutric Oxigleyic Hydragric Gleysol (Luvic, Loamic, Aric, Drainic, Protocalcic, Bathygypsic). На месте лугово-каштановых почв сформировались агроземы поверхностно-глеевые ксерометаморфические окисленно-глеевые тяжелосуглинистые на желто-бурых суглинках и глинах с формулой профиля PU/Gox – BMKg,ox – BCAq,g,th – BCAnc,q – BCca,g, по WRB (IUSS, 2015) – Eutric Oxigleyic Hydragric Gleysol (Loamic, Aric, Drainic, Protocalcic). С 2018 г. пахотный горизонт в ходе 4-летнего окислительного режима богарного использования потерял признаки глеевого горизонта, сохранились лишь окисленно-глееватые признаки – PUox – в обеих почвах. По этой причине термин “поверхностно-глеевые” в названиях обеих почв по классификации почв России следует удалить. В классификации WRB-2014 изменяются даже реферативные почвенные группы: Luvic Kastanozem (Loamic, Aric, Protosodic, Stagnic, Bathygypsic) и Haplic Kastanozem (Loamic, Aric, Stagnic).

Обратим внимание на важный методический аспект исследования оценки тренда начала восстановления засоленности рассоленных почв рисовых систем. Традиционная водная вытяжка с соотношением почва : вода 1 : 5 имеет низкую чувствительность в области очень низкого содержания легкорастворимых солей, когда по формальным критериям почва или грунт считаются незасоленными. Она становится пригодна лишь на поздних этапах процесса накопления солей, когда констатируем уже свершившийся факт –

наличие засоления почв.

Альтернативой является измерение активности ионов в пасте с влажностью, приблизительно соответствующей полной влагоемкости почвы. Этот подход имеет заметное преимущество за счет возможности дифференцировать формально незасоленные горизонты на несколько более дробных градаций по содержанию и концентрации ионов в почвенных растворах. А измерение активности нескольких ионов (Na^+, Cl^- и Ca^{2+}) позволяет оценивать начальные признаки вторичного засоления по соотношению ионов.

В 2017 г. трансекты представляли собой преимущественно серию одиночных скважин для оценки общего состояния и выбора динамических площадок последующего мониторинга. С 2018 г. работы продолжались на выбранных динамических площадках вдоль трансекты 2, удлиненной вдаль от берега Сиваша до 2 км.

Для оценки пространственного варьирования засоленности почв и грунтов на динамической площадке в пределах участка 30 × 30 м закладывали пять скважин методом конверта с разносом четырех угловых точек на 15 м относительно центральной. Одна из диагоналей конверта была направлена в сторону береговой линии Сиваша. Две крайние точки по этой диагонали бурили до грунтовой воды с таким расчетом, чтобы можно было измерить установившийся уровень грунтовой воды (УГВ) и произвести отбор воды для анализа состава солей. Три оставшиеся точки бурили до глубины 2 м. Отбор образцов почв, грунтов зоны аэрации и водоносного горизонта делали послойно через 10 см, на глубине более 200 см, как правило, через 20 см. Бурение сопровождалось кратким морфологическим описанием извлекаемого слоя с допустимой интерпретацией почвенного горизонта и общей полевой характеристикой цвета, влажности, класса гранулометрического состава, наличия вскипания от HCl, карбонатных и гипсовых новообразований.

Установившийся УГВ определяли через 5–6 часов после вскрытия скважины с контролем на следующий день. Измерение УГВ производили мерной лентой с хлопушкой, погрешность 1 см. Отбор грунтовой воды выполняли с помощью желонки. В извлеченной пробе измеряли удельную электропроводность (EC) и тем-

пературу полевым кондуктометром КП-001 с последующим расчетом значения удельной электропроводности воды, приведенной к температуре 25°С (EC_{25}) путем умножения на поправочный температурный коэффициент (Richards, 1954). В лаборатории определяли ионный состав, pH традиционными методами (Руководство..., 1990) и EC_{25} лабораторным кондуктометром.

Из высушенных и растертых (< 1 мм) образцов готовили пасты с влажностью 50% (мас.) путем увлажнения дистиллированной водой. На следующий день после перемешивания пасты измеряли активности ионов Na^+, Cl^- и Ca^{2+} с помощью ионоселективных электродов серии ЭЛИС. Регистрирующий прибор – иономер Экотест-120. Для каждого образца по каждому показателю получено среднее арифметическое значение $pX = -\lg a_x$ из 2–3 повторных измерений. Среднее значение pX преобразовывали в активность иона с размерностью [ммоль/л].

Таким образом, получены две группы рядов послойных измерений с сериями из 5 и 2 средних значений активности иона в индивидуальных образцах. Для серии из 5 образцов рассчитывали частные оценки среднего арифметического (M_i) и среднеквадратического отклонения (s_i) в серии. На основе точечного графика $M_i = f(s_i)$ оценивали изменение разброса значений s_i в зависимости от M_i, выделив несколько диапазонов значений M_i, для каждого из которых рассчитали усредненную оценку среднеквадратического отклонения (s_{cp}) (Дмитриев, 1995).

Долю обменного натрия (Y) оценивали на основе соотношения активности ионов натрия (a_{Na}) и кальция (a_{Ca}), измеренных в пасте ($X = a_{Na}/\sqrt{a_{Ca}}$), по регрессионной модели, состоящей из системы двух уравнений:

$$\begin{cases} \text{если } X \le 10, \text{ то } Y = 1.15 + 1.02 \cdot X, \\ \text{если } 10 < X < 50, \text{ то } Y = 3.840 + 0.899 \cdot X - 0.0072 \cdot X^2. \end{cases}$$

В части образцов определили состав водной вытяжки 1 : 5.

Статистическая обработка данных выполнена в Excel.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Уровень, минерализация и состав грунтовых вод

На трансекте 1, расположенной на рисовых чеках между с. Сливянка и с. Заливное на высоте от 4.5 до 5.7 м над уровнем моря, более чем в 3.5 км от берега Сиваша, грунтовые воды были вскрыты на глубине от 3.4 до 5.3 м. Их глубина залегания увеличивалась по мере удаления от берега и увеличения высоты поверхности. При этом высота зеркала грунтовых вод практически не зависела от точки опробования, колеблясь в интервале 0.2–1.4 м выше уровня моря (рис. 2). В 2017 г. грунтовые воды имели минерализацию от 1.9 до 5.8 г/л. Состав преимущественно хлоридно-сульфатный по анионам и смешанный натриево-магниево-кальциевый, натриево-кальциево-магниевый или кальциево-магниево-натриевый по катионам (табл. 1).

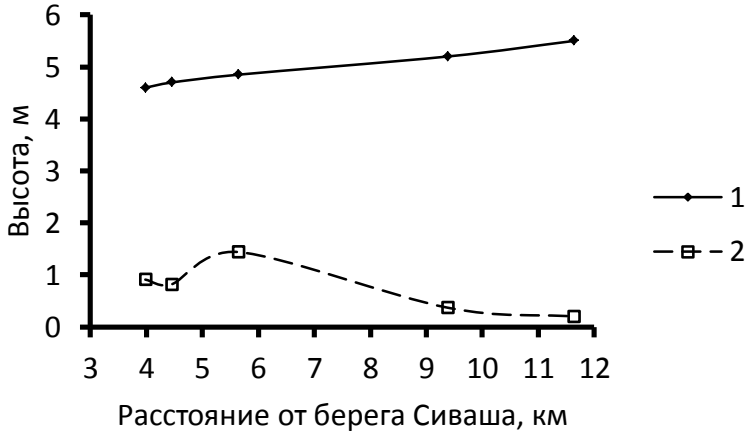

Рис. 2. Изменение высоты грунтовых вод на трансекте 1 в июле 2017 г. Обозначения: 1 – дневная поверхность, 2 – уровень грунтовых вод.
Fig. 2. The altitude of ground water table at the transect 1 in July 2017. Legend: 1 – surface; 2 – ground water table.

Таблица 1. Глубина залегания и ионный состав грунтовых вод
Table 1. Depth and ion composition of ground waters

№ скв.	УГВ, см	pH	HCO_3	Cl	SO_4	Ca	Mg	Na	K	S^*, г/л	EC_{25}, дСм/м
			ммоль(экв)/л								
Вода оз. Сиваш											
б/н	0	7.19	2.6	932.7	146.9	61.5	186.4	785.8	13.7	61.86	76.76
Трансекта 1, рисовые чеки, 2017 г.											
КР-142	483	7.22	8.1	2.5	51.8	21.2	15.3	24.1	0.03	4.23	4.28
КР-145	341	7.19	7.7	12.3	9.9	7.6	6.2	14.2	0.03	1.94	2.78
КР-146	388	7.25	5.9	4.9	55.0	21.8	26.5	13.8	0.02	4.24	4.34
КР-147	379	7.18	6.7	4.2	77.1	23.8	27.2	33.5	0.02	5.83	5.63
КР-148	369	7.44	5.0	11.0	43.4	25.5	21.2	15.0	0.01	3.89	3.84
Трансекта 2, рисовые чеки, 2017 г.											
КР-149	231	7.21	5.7	14.2	11.7	11.4	11.5	6.9	0.04	1.94	2.88
КР-150	330	7.23	5.4	55.0	53.6	31.6	36.7	42.5	0.03	6.91	8.62
КР-151	332	7.30	5.5	19.3	55.0	25.9	25.2	27.9	0.02	5.12	5.44
КР-152	311	7.22	5.2	6.0	30.2	24.0	8.6	6.0	0.02	2.70	3.01
Целинный солонцовый комплекс между оз. Сиваш и рисовой системой, 2018 г.											
КР-301	282	7.17	5.4	116.9	54.2	41	61.0	74.9	0.02	10.36	14.01

№ скв.	УГВ, см	pH	HCO_3	Cl	SO_4	Ca	Mg	Na	K	S^*, г/л	EC_{25}, дСм/м
			ммоль(экв)/л								
Трансекта 2, рисовые чеки, 2018 г.											
КР-302	331	7.19	5.8	8.3	29.4	24.8	11.0	7.8	0.02	2.87	3.33
КР-303	336	7.30	5.8	7.6	37.5	23.3	17.2	10.4	0.02	3.33	3.75
КР-307	393	7.19	6.1	28.7	59.0	25.2	28.6	40.0	0.02	5.99	7.27
КР-308	383	7.36	6.2	18.6	60.4	23.3	26.2	35.6	0.02	5.54	6.44
КР-312	425	7.43	7.9	17.3	50.2	18.6	24.3	32.6	0.02	4.92	5.88
КР-315	425	7.32	7.8	21.1	51.0	22.4	25.7	31.8	0.02	5.16	6.40
КР-317	402	7.24	5.4	61.7	55.1	32.4	43.8	46.1	0.02	7.40	9.57
КР-318	402	7.30	6.6	45.6	54.1	29.5	37.2	39.5	0.02	6.56	8.06
КР-322	423	7.44	8.8	20.5	39.5	9.3	21.3	38.1	0.02	4.48	5.98
КР-323	433	7.43	7.7	6.6	43.0	16.4	25.5	15.3	0.02	3.75	4.18
Трансекта 3, рисовые чеки, 2017 г.											
КР-153	195	6.93	4.7	86.2	27.2	69.1	28.9	19.7	0.02	6.84	9.76
КР-154	251	7.30	5.2	11.0	53.8	24.2	21.5	25.3	0.02	4.62	5.12
КР-155	363	7.22	6.1	55.0	40.0	31.7	30.1	35.3	0.04	6.05	7.84
Трансекта 4, рисовые чеки, 2017 г.											
КР-156	305	7.04	4.7	27.0	29.2	36.0	10.8	12.5	0.03	3.78	4.93

Примечание. S^* – сумма ионов, г/л.

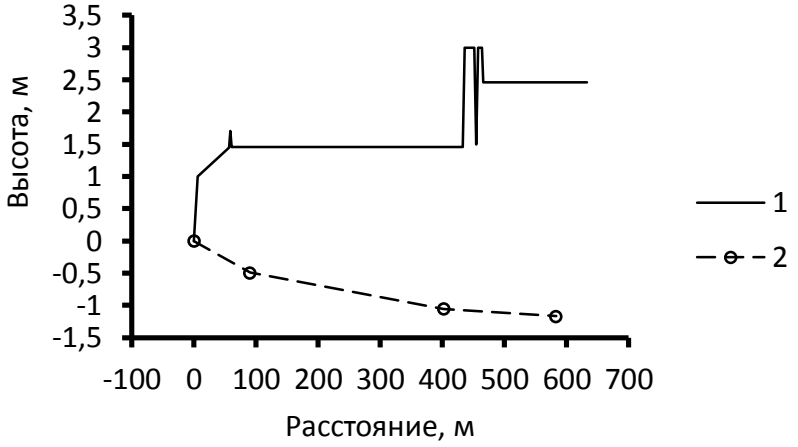

Рис. 3. Изменение высоты грунтовых вод на трансекте 3 в июле 2017 г. Обозначения: 1 – дневная поверхность, 2 – уровень грунтовых вод. Отрицательные значения расстояния соответствуют водам оз. Сиваш.
Fig. 3. The altitude of ground water table at the transect 3 in July 2017. Legend: 1 – surface; 2 – ground water table. Negative values of distance correspond to sea water in Sivash.

Три других трансекты были заложены в береговой полосе на чеках, организованных на 1-й и 2-й террасах Сиваша.

Трансекта 3, расположенная к востоку от с. Пшеничное, пересекла узкую 1-ю террасу, имеющую высоту около 1.5 м, и закончилась на 2-й террасе на высоте 2.5 м над уровнем воды в Сиваше (рис. 3). УГВ на трансекте 3 быстро понижался по мере удаления от берега, залегая на глубине 1.9–2.5 м на чеке первой террасы и 3.6 м на чеке второй террасы, демонстрируя образование депрессионной воронки, углубляющейся по мере удаления от берега на расстояние около 700 м и более. В результате в 2017 г. на четвертом году после прекращения орошения на этом участке возник гидравлический напор солевых вод Сиваша в сторону прибрежных грунтовых вод. Его величина возрастала от 0.5 м на расстоянии около 100 м от берега до 1.2 м на расстоянии 600 м.

Грунтовая вода под первой террасой вблизи от берега (скв. КР-153) имела наибольшую минерализацию (9.8 г/л) и сульфатно-

хлоридный натриево-магниево-кальциевый состав (табл. 1). По мере удаления от берега общая минерализация уменьшалась до 5.1–7.8 г/л, а в ионном составе уменьшалась доля хлоридов и возрастала доля сульфатов и натрия.

На трансекте 4 недалеко от с. Стефановка нижние чеки расположены на высоте 2.3 м на второй террасе. Глубина грунтовых вод составляла 305 см, здесь тоже сформировалась депрессионная воронка грунтовых вод с гидравлическим напором 0.77 м на расстоянии 170 м от берега Сиваша.

Динамические площадки были выбраны на трансекте 2 юго-восточнее с. Сливянка (рис. 4). Здесь все чеки находятся на второй террасе. Высота их дневной поверхности изменяется в узких пределах от 2.4 до 2.8 м над уровнем Сиваша. В 2017 г. депрессионная воронка грунтовых вод распространялась по меньшей мере более чем на 1 км от берега (дальше не было измерений) с гидравлическим напором до 0.88 м. В 2018 г. воронка углубилась. Ее простирание вглубь террасы превысило 2 км, а гидравлический напор увеличился до 1.6 м.

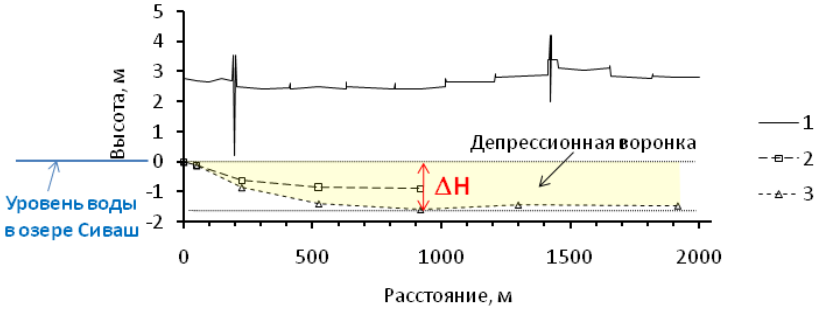

Рис. 4. Изменение высоты грунтовых вод на трансекте 2 в июле 2017 и 2018 гг. Обозначения: 1 – дневная поверхность (чеки, валики, подающий и отводящий каналы в насыпях); 2 – УГВ 2017 г.; 3 – УГВ 2018 г.; ΔH – гидравлический напор морских вод над грунтовыми водами.

Fig. 4. The altitude of ground water table at the transect 2 in July 2017 and 2018. Legend: 1 – surface (ponds, rolls, channels); 2 – ground water table in 2017; 3 – ground water table in 2018; ΔH – the bottom water drive – height between sea water and ground water levels.

Наиболее минерализованные (10.4 г/л) сульфатно-хлоридные магниево-натриевые грунтовые воды отмечены в узкой полосе (около 180 м) целинного солонцового комплекса между береговым обрывом к оз. Сиваш и сбросным каналом, отгораживающим чеки рисовой системы (табл. 1, скв. КР-301). Под рисовыми чеками минерализация грунтовых вод варьировала в 2017 и 2018 гг. в диапазоне от 1.9 до 7.4 г/л с тенденцией увеличения минерализации по мере увеличения глубины грунтовой воды на фоне пространственной мозаичности ее распределения. По анионному составу грунтовые воды преимущественно хлоридно-сульфатные. Исключением является чек 4 (скв. КР-150 и КР-317), в котором концентрация хлоридов выше, чем концентрация сульфатов, на фоне наиболее высоких значений минерализации грунтовой воды (6.9 и 7.4 г/л). В катионном составе вод с минерализацией более 4 г/л доминирует натрий (32–46 ммоль/л) при сравнительно высоком уровне концентраций магния (21–44 ммоль(экв)/л) и кальция (9–32 ммоль(экв)/л).

Таким образом, на всех участках в береговой полосе Сиваша шириной до 2–3 км на 4-й и 5-й годы после прекращения орошения рисовой системы Нижнегорского р-на сформировалась депрессионная воронка грунтовых вод с гидравлическим напором до 0.8–1.2 м в 2017 г. и до 1.6 м в 2018 г. На расстоянии 4 км и более от берега на чеках, расположенных на водораздельной поверхности между долиной реки и балкой, уровень грунтовых вод сохранился на положительных высотных отметках, залегая глубже критического уровня.

Оценка пространственного варьирования активности ионов в исследуемых почвах и грунтах бывшей рисовой системы на Присивашской низменности в Нижнегорском р-не Республики Крым представлена в таблице 2.

Общая тенденция для трех ионов – увеличение минимальных, максимальных значений s_i и s_{cp} по мере увеличения среднего значения активности иона в слое. Исключением является только диапазон активности хлорид-ионов 2–3 ммоль/л, в котором эта тенденция нарушается.

Таблица 2. Усредненные оценки среднеквадратического отклонения (s_{cp}) в зависимости от диапазона средних значений активности ионов в слое
Table 2. Mean estimation of standart deviation (s_{cp}) for different ranges of mean values of ion activity in the layer

Ион	Диапазон значений активности иона, ммоль/л	Ориентировочное содержание иона в жидкой фазе пасты, смоль(экв)/кг	Разброс значений s_i,	s_{cp}	Число степеней свободы	Коэффициент вариации, %
			ммоль/л			
Na^+	0–2.00	0–0.11	0.05–0.68	0.31	204	31
	2.01–3.00	0.11–0.16	0.17–0.90	0.56	160	22
	3.01–4.00	0.16–0.21	0.47–1.62	1.07	168	31
	4.01–6.00	0.21–0.33	0.57–2.38	1.43	104	29
	6.01–8.00	0.33–0.44	0.94–4.19	2.52	76	36
	8.01–22.00	0.44–1.27	1.00–6.09	3.12	332	21
Cl^-	0–1.00	0–0.05	0.07–0.97	0.36	216	72
	1.01–2.00	0.05–0.11	0.19–2.52	0.84	212	56
	2.01–3.00	0.11–0.16	0.45–2.09	0.55	620	22
	3.01–4.00	0.16–0.21	0.28–2.99	1.70	176	49
	4.01–8.00	0.21–0.44	0.87–5.39	2.46	112	41
	8.01–20.00	0.44–1.15	0.87–8.93	4.66	164	33
Ca^{2+}	0–1.00	0–0.06	0.19–0.81	0.41	56	82
	1.01–2.00	0.06–0.12	0.23–1.50	0.66	312	44
	2.01–5.00	0.12–0.34	0.43–4.74	1.84	632	52
	5.01–14.00	0.34–1.14	5.58–7.55	6.81	24	72

Иными словами, чем больше среднее значение активности иона в слое, тем более широкие пределы пространственного варьирования абсолютных значений активности иона в данном слое на участке.

Сравнение s_{cp} для разных ионов провели по критерию F (Дмитриев, 1995). В сопоставимых диапазонах средних значений активности иона в слое величины s_{cp} для разных ионов, как правило, образуют ряд $Na^+ \leq Cl^- < Ca^{2+}$. Это означает, что активность Ca^{2+} варьирует в пространстве сильнее всего среди трех ионов, а активность Na^+ – меньше всего. Это проявляется и в относительных величинах – коэффициентах вариации. Для ионов натрия коэффициент вариации в слое самый низкий, изменяющийся от 21 до 36%, и практически не зависит от средней активности иона в слое. Для ионов кальция этот показатель самый высокий. Он изменяется от 44 до 82%. Коэффициент вариации хлорид-ионов имеет промежуточные значения от 22 до 72%.

Солевое состояние почв и грунтов

В 2017 г., на четвертый год после прекращения орошения рисовой системы, на чеках, расположенных на расстоянии 4–12 км от берега Сиваша (трансекта 1) во многих точках опробования почвы и грунты зоны аэрации были незасоленными. Активность ионов натрия и хлоридов изменялась в интервале 1–12 ммоль/л (рис. 5 А, Б, Г, Д). Исключением была скважина КР-145, представленная солонцом солончаковым слабозасоленным (рис. 5 В). В ней активность Na^+ на глубине от 20 до 150 см составляла 17–27 ммоль/л с максимумом на глубине 40–80 см в подсолонцовом карбонатном горизонте. Указанный диапазон активности Na^+ свидетельствует о содержании 0.9–1.5 смоль(экв)/кг натрия в жидкой фазе почвы при влажности 50%, близкой к полной влагоемкости, что соответствует слабой степени засоления. Уровень активности Ca^{2+} (2–5 ммоль/л) и Cl^- (3–7 ммоль/л) в сочетании с указанным диапазоном активности Na^+ позволяет утверждать, что горизонты имеют сульфатное натриевое засоление. Присутствие натриевых солей обеспечило накопление обменного натрия в указанных горизонтах до 12–17% от емкости катионного обмена (ЕКО) (рис. 5 Е).

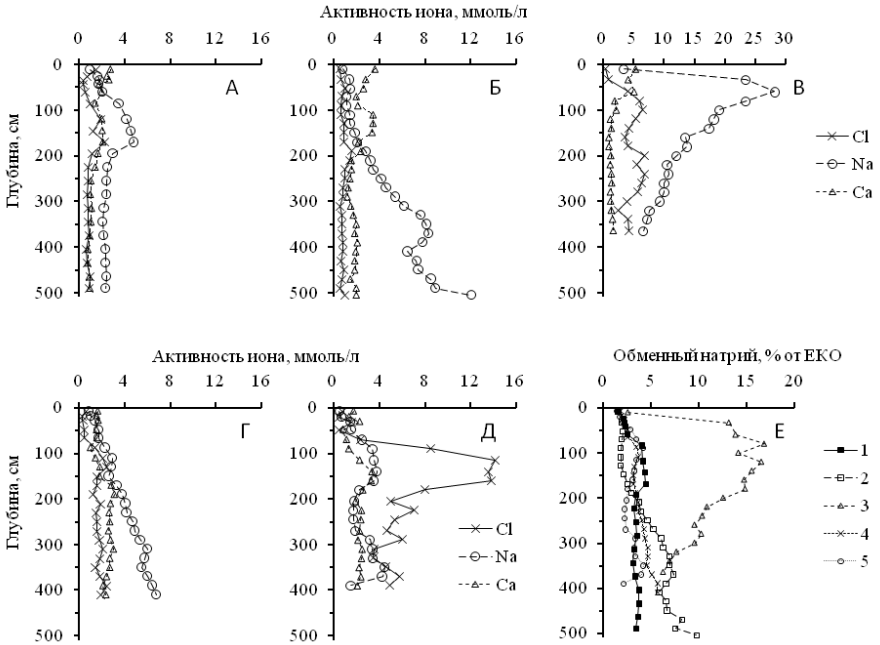

Рис. 5. Профильное распределение активности хлоридов (Cl), ионов натрия (Na), кальция (Ca), измеренных в пастах с влажностью 50% (мас.), и доли обменного натрия (E) в почвах и грунтах трансекты 1: А – скв. КР-141; Б – скв. КР-142; В – скв. КР-145; Г – скв. КР-146; Д – скв. КР-148; Е – обменный натрий: 1 – скв. КР-141; 2 – скв. КР-142; 3 – скв. КР-145; 4 – скв. КР-146; 5 – скв. КР-148.

Fig. 5. Profile distribution of chloride (Cl), sodium (Na) and calcium (Ca) ion activity measured in pastes with moisture 50% (w) and sodium exchange percentage (E) in soils and grounds of transect 1: A – bore КР-141; Б – КР-142; В – КР-145; Г – КР-146; Д – КР-148; E – exchangeable sodium: 1 – КР-141; 2 – КР-142; 3 – КР-145; 4 – КР-146; 5 – КР-148.

Обратим внимание на распределение активности ионов по профилю скв. КР-148 (рис. 5 Д), расположенной на самой низкой гипсометрической отметке в пределах трансекты 1 и ближе всего к берегу Сиваша. В ней активность Na^+ не превышает 4–6 ммоль/л по всему профилю до грунтовой воды, тогда как активность хлоридов имеет максимум 12–14 ммоль/л на глубине 100–160 см. По формальным критериям почва и грунты зоны аэрации считаются незасоленными. Вместе с тем превышение активности хлоридов над активностью Na^+ в 2.5–3 раза означает, что в растворе хлориды компенсируются ионами кальция и/или магния. Измеренные значения активности Ca^{2+} 2–4 ммоль/л в горизонте с максимумом хлоридов позволяют утверждать, что компенсация связана преимущественно ионами кальция. Ориентировочная концентрация хлорида магния не превышает 1–2 ммоль/л. Наличие хлоридов кальция и магния в почвенных растворах еще незасоленных горизонтов на глубине верхней границы капиллярной каймы свидетельствует о признаках начала вторичного засоления.

Их возникновение обусловлено капиллярным подъемом хлоридно-сульфатных натриевых растворов через рассоленную толщу грунтов зоны аэрации, насыщенных обменными кальцием и магнием. Доля обменного натрия пока незначительная (менее 5% от ЕКО). По мере движения солевых натриевых растворов через незасоленную толщу происходят реакции обмена катионов раствора и почвенно-поглощающего комплекса. Натрий раствора замещает обменные кальций и магний, что приводит к постепенному накоплению обменного натрия в грунтах зоны аэрации и увеличению концентрации ионов кальция и магния в движущихся вверх растворах. При достижении произведения растворимости гипса в растворе, равного произведению активностей ионов кальция и сульфат-ионов, происходит осаждение гипса с образованием его скоплений в виде мелких кристаллов, фиксируемых морфологически при бурении.

В береговой полосе Сиваша ситуация сложнее (рис. 6).

Начнем с сохранившегося участка целинного солонцового комплекса на узкой полосе между береговым обрывом второй террасы и рисовыми чеками (рис. 1, трансекта 2, скв. КР-301).

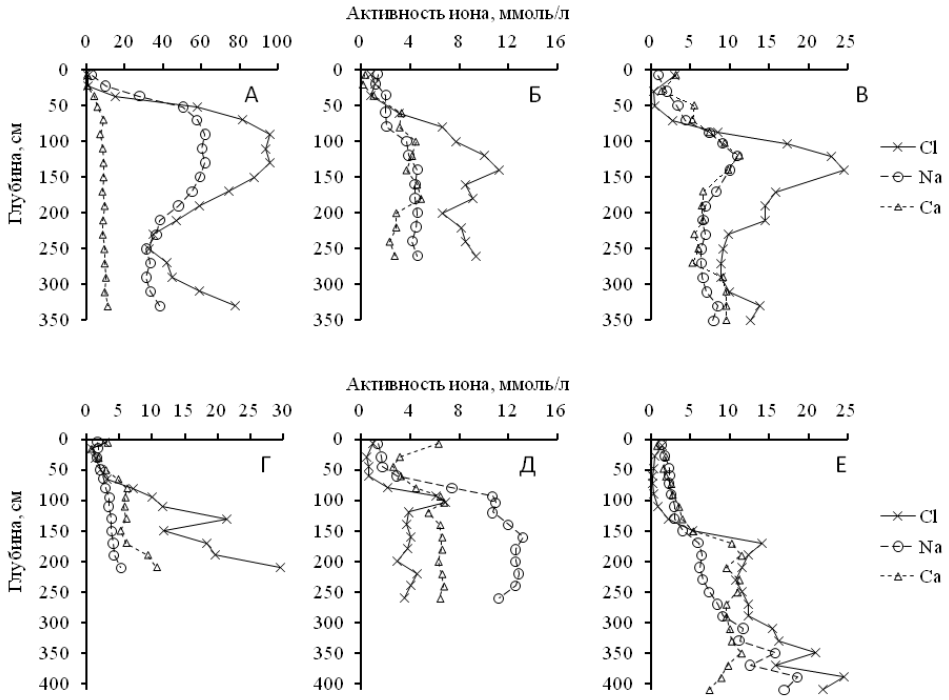

Рис. 6. Профильное распределение активности хлоридов (Cl), ионов натрия (Na), кальция (Ca), измеренных в пастах с влажностью 50% (мас.), в почвах и грунтах береговой полосы Сиваша: А – скв. КР-301 (целинный солонец между берегом Сиваша и рисовыми чеками); Б – скв. КР-149; В – скв. КР-156; Г – скв. КР-153; Д – скв. КР-154; Е – скв. КР-155.

Fig. 6. Profile distribution of chloride (Cl), sodium (Na) and calcium (Ca) ion activity measured in pastes with moisture 50% (w) in soils and grounds of Sivash seashore: A – bore КР-301 (virgin solonetz between seaside and rice ponds); Б – КР-149; В – КР-156; Г – КР-153; Д – КР-154; Е – КР-155.

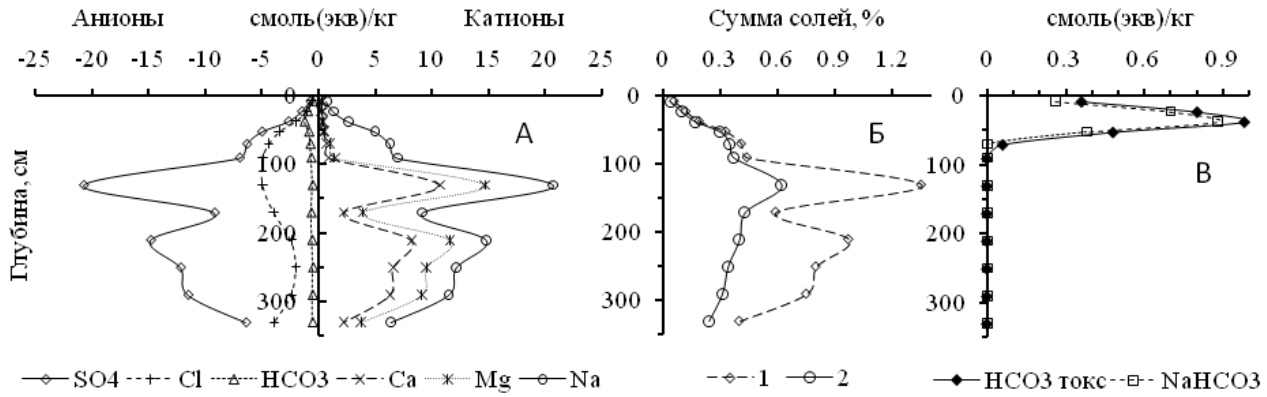

Рис. 7. Распределение солей по профилю целинного солонца на второй террасе Сиваша (скв. КР-301, данные водной вытяжки 1 : 5): А – двусторонний солевой график; Б – содержание общей суммы (1) и суммы токсичных солей (2); В – содержание общей токсичной щелочности (HCO_3 токс.) и токсической щелочности, связанной с натрием ($NaHCO_3$).

Fig. 7. Profile distribution of salts in virgin solonetz at the second terrace of Sivash (bore KP-301, data of water extract 1 :5): A – two-side salinity diagram; Б – total dissolved salts (1) and sum of toxic salts (2); B – total toxic alkalinity (HCO_3 toxic) and sodium toxic alkalinity ($NaHCO_3$).

Целинный солонец лугово-каштановый средний солончаковатый тяжелосуглинистый на лёссовидных глинах (Salic Gypsic Solonetz (Albic, Loamic, Columnic, Cutanic, Differentic, Ochric)) имеет типичное строение почвенного профиля: SEL – BSN – BCAnc,q – BCAnc,cs,q – BCca,cs,q – Cca,cs,q. Содержание обменного натрия в солонцовом горизонте составляет 15–19% от ЕКО. Распределение солей по профилю имеет срединно-аккумулятивный вид с максимумом легкорастворимых солей на глубине 45–200 см как по данным активностей ионов в пастах с влажностью 50% (рис. 6 А), так и по данным водной вытяжки 1 : 5 (рис. 7).

Обратим внимание, что два метода оценки засоленности почвы дают сходную информацию об общем характере распределения солей по профилю почвы и грунтов зоны аэрации, но различающуюся информацию о химизме солей. Последнее обусловлено разной влажностью (50 и 500%, соответственно), при которой оценивают содержание ионов в жидкой фазе, влияющей на ионно-солевые равновесия между жидкой, твердой фазами и ионообменной частью почвенно-поглощающего комплекса. По данным традиционной водной вытяжки 1 : 5, в надсолонцовом (SEL), солонцовом (BSN) и верхней части аккумулятивно-карбонатного (BCA) горизонтов до глубины около 60 см имеется токсическая щелочность 0.35–1.0 смоль(экв)/кг (рис. 7 В) – типичное явление для солонцов. В горизонтах солевого максимума химизм засоления сульфатно-хлоридный магниево-натриевый с гипсом (рис. 7 А, Б). Существенная разница между общей суммой солей и суммой токсичных солей обусловлена растворением гипса из твердой фазы в водной вытяжке (рис. 7 Б). По данным измерения активностей ионов в пастах с влажностью 50% картина иная. В горизонтах солевого максимума активность хлоридов в 1.5 раза выше активности Na^+ (рис. 6 А). Это означает, что в почвенных растворах помимо хлоридов натрия содержатся хлориды кальция и магния. Наличие последних является признаком развития вторичного засоления. Водная вытяжка 1 : 5 этот факт камуфлирует за счет дополнительного растворения гипса из твердой фазы и ионообменных реакций, в результате которых обменный натрий вытесняется в раствор и рассматривается как хлорид и сульфат натрия.

В трех скважинах, заложенных сравнительно близко от берега (КР-149, КР-153, КР-156) на разных участках рисовой системы (трансекты 2, 3 и 4), также характерно превышение активности хлоридов над активностью Na^+ (рис. 6 Б, В, Г). Скв. КР-149 в 2017 г. была еще полностью незасоленной до грунтовых вод, минерализация которых не превышала 2 г/л. В двух других скважинах горизонты с максимумом активности хлоридов уже имели слабую степень засоления. Во всех трех случаях глубина расположения максимума хлоридов приблизительно одинаковая – 120–160 см, что соответствует верхней части капиллярной каймы. На трансекте 3 признаки начальной стадии вторичного засоления проявляются не только на первой, но и на второй террасе в зоне аэрации на глубине 150–420 см (рис. 6 Е).

Как отмечалось выше, на рисовых чеках, удаляющихся от берега Сиваша (трансекта 2), были выбраны динамические площадки. В 2017–2018 гг. на них установлена депрессионная воронка грунтовых вод, которая углубилась и расширилась в 2018 г. по сравнению с 2017 г. (рис. 4). Понижение УГВ сопровождалось некоторым накоплением легкорастворимых солей в грунтах зоны аэрации (рис. 8).

Наиболее ярко этот процесс заметен на ближайшем к берегу чеке 1. Почвы и грунты этого чека отличаются отсутствием засоления по формальным признакам по всему профилю до грунтовой воды (рис. 8 А, Б). Активности Na^+ и Cl^- не превышают 4–6 ммоль/л. Вместе с тем в грунтах зоны аэрации на глубине 120–250 см, капиллярно увлажняемых от грунтовых вод, в 2018 г. отмечались более высокие значения активности Na^+ и Cl^- по сравнению с 2017 г. Увеличение активности пока небольшое 0.8–1.2 ммоль/л, что в пересчете на массу грунта составляет 0.04–0.06 смоль(экв)/кг, и формально грунт остался незасоленным. Тем не менее это явление сопровождалось формированием скоплений мелкокристаллического гипса в трех из пяти скважин в 2018 г. при полном их отсутствии в 2017 г. по данным морфологического описания образцов при бурении.

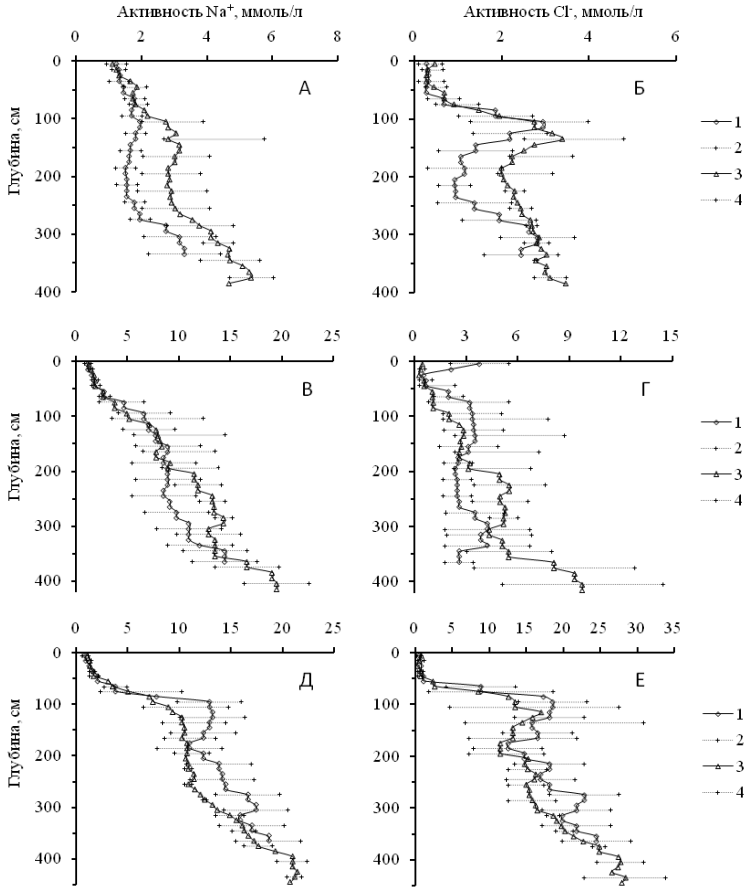

Рис. 8. Изменение профильного распределения активности ионов натрия (А, В, Д) и хлорид-ионов (Б, Г, Е) в 2017–2018 гг. на динамических площадках трансекты 2: А, Б – чек 1, 220 м от берега Сиваша; В, Г – чек 2, 525 м от берега Сиваша; Д, Е – чек 4, 920 м от берега Сиваша; Обозначения: 1, 3 – медиана, 2, 4 – пределы варьирования в слое; 1, 2 – июль 2017 г.; 3, 4 – июль 2018 г.

Fig. 8. Change of profile distribution of soduim (А, В, Д) and chloride (Б, Г, Е) ion activity at the transect 2 dynamic plots in 2017–2018: А, Б – rice pond 1, 220 m from Sivash seaside; В, Г – rice pond 2, 525 m from Sivash seaside; Д, Е – rice pond 4, 920 m from Sivash seaside; Legend: 1, 3 – median; 2, 4 – variation limits in a layer; 1, 2 – July 2017; 3, 4 – July 2018.

На чеке 2 динамическая площадка удалена от берега Сиваша на 510–540 м. Здесь в 2017 г. почвы и грунты являлись незасоленными до глубины 350 см. Понижение УГВ в 2018 г. до 400–402 см вскрыло более глубокий слабозасоленный горизонт и сопровождалось тенденцией увеличения активности Na^+ на 3–5 ммоль/л и Cl^- на 2–3 ммоль/л в слое 220–300 см (рис. 8 В, Г).

На чеке 4, удаленном от берега на 900–940 м, ситуация заметно отличалась. Незасоленными в 2017 и 2018 гг. были только почвенные горизонты от дневной поверхности до глубины 90–100 см (рис. 8 Д, Е). Глубже грунты зоны аэрации имели слабое засоление до грунтовой воды, в которой минерализация варьировала в интервале 6.6–7.4 г/л (табл. 1, скв. КР-150, КР-317, КР-318). В засоленных горизонтах активность Cl^- (15–30 ммоль/л) была выше активности Na^+ (10–22 ммоль/л), что означает присутствие хлоридов кальция и магния – признаков вторичного засоления. По морфологическому описанию в четырех из пяти скважин на этой динамической площадке отмечались скопления мелкокристаллического гипса. Учитывая довольно широкий интервал варьирования активностей, отметим, что солевое состояние почв и грунтов этой площадки в 2017 и 2018 гг. было одинаковым.

По данным водной вытяжки 1 : 5, в незасоленных горизонтах средней части почвенного профиля отмечается высокая токсическая щелочность, связанная с натрием (рис. 9). Хотя по измерениям активности ионов натрия и кальция в пастах, доля обменного натрия не превышает 5% от ЕКО до глубины 200 см. В слабозасоленных горизонтах зоны аэрации химизм солей сульфатный натриево-магниевый с гипсом. Для этой скважины также невозможно по данным водной вытяжки 1 : 5 дать заключение о признаках вторичного засоления за счет трансформации ионно-солевого состава жидкой фазы вытяжки в условиях растворения гипса и ионообменных реакций.

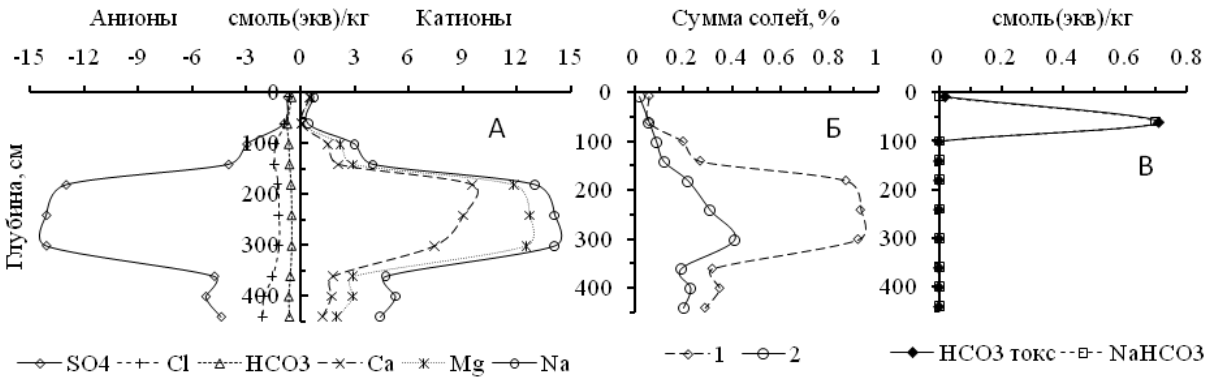

Рис. 9. Распределение солей по профилю агрозема текстурно-дифференцированного аккумулятивно-карбонатного окисленно-глееватого глубокозасоленного, бывший рисовый чек 4 на второй террасе (скв. КР-317, данные водной вытяжки 1 : 5): А – двусторонний солевой график; Б – содержание общей суммы (1) и суммы токсичных солей (2); В – содержание общей токсичной щелочности (HCO_3 токс.) и токсической щелочности, связанной с натрием ($NaHCO_3$).

Fig. 9. Profile distribution of salts in agrozem textural-differentiated accumulative-carbonate oxic-gleyic deeply saline, the rice pond 4 at the second terrace (bore KP-317, data of water extract 1 : 5): A – two-side salinity diagram; Б – total dissolved salts (1) and sum of toxic salts (2); B – total toxic alkalinity (HCO_3 toxic) and sodium toxic alkalinity ($NaHCO_3$).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Почвы лугово-каштановых солонцовых комплексов Присивашской низменности в Нижнегорском р-не республики Крым, преобразованные на рисовых системах в агроземы аккумулятивно-карбонатные окисленно-глееватые с остаточными текстурным или ксерометаморфическим горизонтами, на значительной площади рисовой системы были рассолены до 3–3.5 м в течение полувекового орошения затоплением чеков.

2. В 2017 г., на четвертый год после прекращения орошения, во-первых, более 90% точек опробования были представлены незасоленными почвами до глубины 1.5–2 м, во-вторых, в 80% случаев – незасоленными грунтами зоны аэрации, в-третьих, грунтовые воды вскрывались преимущественно на глубине 3.3–5.3 м.

3. В береговой полосе Сиваша шириной до 1–2.5 км в 2017 г. и 2018 г. под бывшими рисовыми чеками образовалась депрессионная воронка грунтовых вод с гидравлическим напором морских вод до 0.8–1.6 м. На расстоянии 4 км и более от берега на чеках, расположенных на водораздельной поверхности между долиной реки и балкой, уровень грунтовых вод сохранился на положительных высотных отметках, залегая глубже критического уровня.

4. Углубление и расширение депрессионной воронки грунтовых вод в 2018 г. по сравнению с 2017 г. сопровождалось образованием скоплений мелкокристаллического гипса и небольшим накоплением натрия и хлоридов в поровых растворах грунтов зоны аэрации на глубине 150–300 см.

5. Во многих точках опробования на рисовых чеках в береговой полосе исследуемой системы на четвертый и пятый годы после прекращения орошения отмечались признаки вторичного засоления – появление в поровых растворах хлоридов кальция и магния, присутствие которых фиксируется по более высокой активности хлорид-ионов по сравнению с активностью ионов натрия, измеренных в пастах с влажностью 50% (мас.). Данные водной вытяжки 1 : 5 не позволяют выявлять эти признаки за счет растворения гипса из твердой фазы и трансформации ионного состава солей в жидкой фазе при производстве вытяжки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Балюк С.А., Ладних В.Я., Гаврилович Н.Ю., НосоненкоА.О., ЗахароваМ.А., МошникЛ.І., ЛіснякА.А., Дрозд О.М.* Сучасна еволюція зрошуваних грунтів: екологічні проблеми та шляхи їх вирішення // Вісник агарної науки. 2006. № 6. С. 60–65.
2. *Гусев П.Г., Титков А.А.* Солевой режим пойменных почв низовий р. Салгира под культурой затопляемого риса // Мелиорация и водное хозяйство. 1973. Вып. 24. С. 41–48.
3. *Дзенс-Литовская Н.Н.* Почвы и растительность степного Крыма. Л.: Наука, 1970. 157 с.
4. *Дмитриев Е.А.* Математическая статистика в почвоведении: Учебник. М.: Изд-во МГУ, 1995. 320 с.
5. *Драган Н.А.* Почвенные ресурсы Крыма. Симферополь: ДОЛЯ, 2004. 208 с.
6. *Кизяков Ю.Е.* Физико-химические свойства солонцов Северного Присивашья, их вариабельность и изменение при длительном последействии различных способов мелиорации // Почвоведение. 1977. № 12. С. 20–30.
7. *Кизяков Ю.Е., Титков А.А., Кольцов А.В., Кольцов С.Ф., Рябышко А.В., Тронза Г.Е.* Почвенно-генетические и мелиоративные аспекты экологических проблем рисосеяния в Крыму // Вісник Харківського ДАУ ім. В.В. Докучаєва. 2001. № 3. С. 127–133.
8. *Кизяков Ю.Е., Титков А.А., Тронза Г.Е.* Солевой режим солонцов луговых Причерноморья в рисовом севообороте // Научные труды Крымского ГАУ: Сельскохозяйственные науки. Симферополь, 2002. Вып. 78. С. 86–89.
9. *Кизяков Ю.Е., Тронза Г.Е.* Солевые профили солонцов луговых Крымского Причерноморья и их трансформация в рисовых севооборотах // Вісник Харківського НАУ ім. В.В. Докучаєва. 2002. № 1. С. 144–149.
10. *Кизяков Ю.Е., Тронза Г.Е.* Состав поглощенных катионов в солонцах луговых Крымского Причерноморья // Вісник Харківського НАУ ім. В.В. Докучаєва. 2004. № 1. С. 136–141.
11. *Кізяков Ю.Є.* Солонці та солонцюваті ґрунти // Ґрунтознавство. Киев: Вища освіта, 2005. С. 525–535.
12. Классификация и диагностика почв России. Смоленск: Ойкумена, 2004. 342 с.
13. *Клепинин Н.Н.* Почвы Крыма. Симферополь: Гос. Изд-во Крым. АССР. 1935. 118 с.

14. *Лактионов Б.И., Карпович А.В.* Мелиоративная роль культуры затопляемого риса на солонцах юга Украины // Мелиорация солонцов: Труды Почвенного института им. В.В. Докучаева. М., 1967. С. 251–259.
15. *Лактионов Б.И., Малеев В.А.* Влияние длительного орошения на свойства почв рисовых полей юга Украины и пути повышения их плодородия // Труды III съезда почвоведов и агрохимиков Украинской ССР. “Мелиорация и охрана почв”. Харьков: Общество почвоведов, 1990. С. 61–63.
16. Наукові основи охорони та раціонального використання зрошуваних земель України / за наук. ред. С.А. Балюка, М.І. Ромащенка, В.А. Сташука. Киев: Аграрна наука, 2009. 620 с.
17. Национальный доклад “Глобальный климат и почвенный покров России: оценка рисков и эколого-экономических последствий деградации земель. Адаптивные системы и технологии рационального природопользования (сельское и лесное хозяйство)” / под ред. А.И. Бедрицкого. М.: Почвенный институт им. В.В. Докучаева, 2018. 357 с.
18. *Новикова А.В.* О мелиорации солонцов Крыма // Вопросы мелиорации солонцов. Москва: изд. АН СССР, 1958. С. 176–192.
19. Полевой определитель почв России. М.: Почвенный институт им. В.В. Докучаева, 2008. 182 с.
20. *Половицкий И.Я., Гусев П.Г.* Почвы Крыма и повышение их плодородия: Справочное изд. Симферополь: Таврия, 1987. 152 с.
21. Руководство по лабораторным методам исследования ионно-солевого состава нейтральных и щелочных минеральных почв / сост. Н.Б. Хитров, А.А. Понизовский. М.: Почвенный институт им. В.В. Докучаева, 1990. 236 с.
22. *Севастьянов Н.Ф.* Почвы Северо-Крымской низменности и их сельскохозяйственное использование // Труды Украинского научно-исследовательского института почвоведения. Т. IV. Проблемы плодородия почв Украинской ССР. Харьков, 1959. С. 201–241.
23. *Супряга И.К.* Рассоление почво-грунтов и опреснение грунтовых вод при культуре риса в Крыму / Мелиорация и водное хозяйство: Респ. межвед. темат. науч.-техн. сб. Киев: Урожай, 1971. Вып. 18. С. 14–18.
24. *Титков А.А.* Оросительные мелиорации южных степей Украины. Учебное пособие. Симферополь: ИТ “Ариал”, 2011. 812 с.
25. *Титков А.А., Гусев П.Г.* Изменение почвенно-мелиоративных условий Восточного Присивашья под рисом и другими культурами рисового севооборота // Повышение эффективности орошаемого земледелия: Сб. науч. тр. Одесса, 1975. С. 49–53.

26. *Титков А.А., Гусев П.Г.* Состав и свойства почв рисовых севооборотов в Крымском Присивашье // Почвоведение. 1988. № 12. С. 104–110.
27. *Титков А.А., Кольцов А.В.* Влияние орошения затоплением на мелиоративные условия и почвенный покров Присивашья. Симферополь, 1995. 167 с.
28. *Тронза Г.Е.* Солевой режим солонцов луговых Крымского Причерноморья, освоенных под культурой риса // Труды Крымского ГАТУ: Сельскохозяйственные науки. Симферополь, 2002. Вып. 91. С. 242–247.
29. *Хитров Н.Б., Роговнева Л.В., Добрицкая Е.Ю., Дунаева Е.А., Кириленко Н.Г., Попович В.Ф.* Солевое состояние рисовой системы севера Крыма после прекращения подачи воды // Таврический вестник аграрной науки. 2016. № 3 (7). С. 140–154.
30. *Чижикова Н.П., Хитров Н.Б., Варламов Е.Б., Чурилин Н.А.* Распределение минералов по профилю солонца Присивашья // Таврический вестник аграрной науки. 2017. № 2(10). С. 103–116.
31. *Янчковский Ю.Ф.* Солевой режим на рисовых полях // Гидротехника и мелиорация. 1973. № 9. С. 63–67.
32. IUSS Working Group WRB. 2015. World Reference Base for Soil Resources 2014, update 2015. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. World Soil Resources Reports No. 106. FAO, Rome, 192 p.
33. *Richards L.A.* (Ed.) US Salinity Laboratory Staff. Diagnosis and improvement of saline and alkali soils. USDA Agr. Handbook No. 60. Washington, 1954, 160 p.

REFERENCES

1. Balyuk S.A., Ladnikh V.Ya., Gavrilovich N.Yu., Nosonenko A.O., Zakharova M.A., Moshnik L.I., Drozd O.M., Suchasna evolutsiya zroshuvanikh gruntiv: ekologichni problemi ta shlyakhi ikh vyrishennya (Modern evolution of irrigated soils: ecological problems and ways to solve them), *Visnik agarnoy nauki*, Kiev, 2006, No. 6, pp. 60–65.
2. Gusev P.G., Titkov A.A., Solevoy rezhim poymennykhnizoviy r. Salgira pod kulturoy zatoplyaemogo risa (Salt regime of floodplain soils of the lower reaches of the Salgir River under the culture of flooded rice), *Melioratsiya i vodnoe khozyaystvo*, Kiev, 1973, Iss. 24, pp. 41–48.
3. Dzens-Litovskaya N.N., *Pochvy i rastitelnost stepnogo Krima* (Soils and vegetation of the steppe Crimea), Leningrad: Hauka, 1970, 157 p.

4. Dmitriev E.A., *Matematicheskaya statistika v pochvovedenii* (Mathematical statistics in Soil Science), Moscow: Izd-vo MGU, 1995, 320 p.
5. Dragan N.A., *Pochvennye resursy Krima* (Soil resources of Crimea), Simferopol: DOLYA, 2004, 208 p.
6. Kizyakov Yu.E., Fiziko-khimicheskie svoystva solontsov Stvernogo Prisivashiya, ikh variabelnost i izmenenie pri dlitelnom posledeystvii razlichnykh sposobov melioratsii (Physico-chemical properties of solonetzes of Northern Prisivash, their variability and change during the long-term aftereffect of various methods of land reclamation), *Pochvovedenie*, 1977, No. 12, pp. 20–30.
7. Kizyakov Yu.E., Titkov A.A., Koltsov A.V., Koltsov S.F., Ryabyshko A.V., Tronza G.E., Pochvenno-geneticheskie i meliorativnye aspekty ekologicheskikh problem risoseyaniya v Krimu (Soil-genetic and reclamation aspects of ecological problems of rice sowing in Crimea), *Visnik Kharkivskogo DAU im. V.V. Dokuchaeva*, 2001, No. 3, pp. 127–133.
8. Kizyakov Yu.E., Titkov A.A., Tronza G.E., Solevoy rezhim solontsov lugovykh Prichernomoriya v risovom sevooborote (Salt regime of solonetzes of meadows of the Black Sea region in rice crop rotation), *Nauchnye trudy Krimskogo GAU: Selskokhozyaystvennye nauki*, Simferopol, 2002, Iss. 78, pp. 86–89.
9. Kizyakov Yu.E., Tronza G.E., Solevye profili solontsov lugovykh Krimskogo Prichernomoriya i ikh transformatsiya v risovykh sevooborotakh (Salt profiles of meadow solonetzes of the Crimean Black Sea region and their transformation in rice crop rotations), *Visnik Kharkivskogo NAU im. V.V. Dokuchaeva*, 2002, No. 1, pp. 144–149.
10. Kizyakov Yu.E., Tronza G.E., Sostav pogloschennykh kationov v solontsakh lugovykh Krimskogo Prichernomoriya (The composition of absorbed cations in meadow solonetzes of the Crimean Black Sea region), *Visnik Kharkivskogo NAU im. V.V. Dokuchaeva*, 2004, No. 1, pp. 136–141.
11. Kizyakov Yu.E., *Solontsi ta solontsyuvati grunty*, (Salt marshes and solonetzic soils), In: *Gruntoznavstvo* (Soil Science), Kiev: Vischa osvita, 2005, pp. 525–535.
12. Klassifikatsiya i diagnostika pochv Rossii (Classification and diagnostics of soils of Russia), Smolensk: Oykumena, 2004, 342 p.
13. Klepinin N.N., *Pochvy Kryma* (Soils of Crimea), Simferopol: Gos. Izd-vo Krym, ASSR, 1935, 118 p.
14. Laktionov B.I., Karpovich A.V., Meliorativnaya rol kultury zatoplyaemogo risa na solontsakh yuga Ukrainy. Melioratsiya solontsov (eclamation role of flooded rice culture on solonetzes of the south of Ukraine. Reclamation of solonetzes), *Trudy Pochvennogo instituta im. V.V. Dokuchaeva*, Moscow, 1967, pp. 251–259.

15. Laktionov B.I., Maleev V.A., Vliyanie dlitelnogo orosheniya na svoystva pochv risovykh poley yuga Ukrainy i puti povysheniya ikh plodorodiya (Influence of long-term irrigation on the properties of soils of rice fields in the south of Ukraine and ways to increase their fertility), *Proc. 3d Congress of soil and agrochemistry scientists of Ukrane SSR "Melioratsiya i okhrana pochv"* (Land reclamation and protection), Kharkov: Obschestvo pochvovedov, 1990, pp. 61–63.
16. *Naukovi osnovy ta ratsionalnogo vikorastannya zroshuvanykh zemel Ukrainy* (Scientific bases of protection and rational use of irrigated lands of Ukraine), S.A. Balyuk, M.I. Romaschenko, V.A. Stashuk (eds), Kiev: Agrarna nauka, 2009, 620 p.
17. *Natsionalnyy doklad* "Globalnyy klimat i pochvennyy pokrov Rossii: otsenka riskov i ekologo-ekonomicheskikh posledstviy degradatsyy zemel. Adaptivnye systemy i tekhnologii ratsionaknogo prirodopolzovaniya (selskoe khozyaystvo)" (National Report "Global Climate and Soil Cover of Russia: Assessing the Risks and Environmental and Economic Consequences of Land Degradation. Adaptive systems and technologies of rational nature management (agriculture and forestry)), A.I. Bedritskiy (Ed.), Moscow: V.V. Dokuchaev Soil Science Institute, 2018, 357 p.
18. Novikova A.V., *O melioratsii solontsov Kryma* (About reclamation of solonetzes of Crimea. Questions of reclamation of solonetzes), Moscow: izd. AN SSSR, 1958, pp. 176–192.
19. *Polevoy opredelitel pochv Rossii* (Field determinant of soils of Russia), Moscow: V.V. Dokuchaev Soil Science Institute, 2008, 182 p.
20. Polovitskiy I.Ya., Gusev P.G., *Pochvy Kryma i povyshenie ikh plodorodiya* (Soils of Crimea and increase of their fertility), Simferopol: Tavriya, 1987, 152 p.
21. *Rukovodstvo po laboratornym metodam issledovaniya ionno-solevogo sostava neytralnykh i schelochnykh mineralnykh pochv* (Guide to laboratory methods for studying the ionic-salt composition of neutral and alkaline mineral soils), N.B. Khitrov, A.A. Ponizovskiy, Moscow: V.V. Dokuchaev Soil Sciemce Institute, 1990, 236 p.
22. Sevast'yanov N.F., Pochvy Severo-Krymskoy nizmennosti i ikh selskokhozyaystvennoe ispolzovanie (Soils of the North-Crimean lowland and their agricultural use), *Trudy Ukrainskogo nauchno-issledovatelskogo instituta pochvovedeniya*, Vol. IV, Problemy plodorodiya pochv Ukrainskoy SSR, Kharkov, 1959, pp. 201–241.
23. Supryaga I.K., Rassolenie pochvo-gruntov i opresnenie gruntovykh vod pri kulture risa v Krymu (Soils salinization and desalination of ground water in rice cultivation in the Crimea), *Melioratsiya i vodnoe khozyaystvo*, 1971, Iss. 18, pp. 14–18.

24. Titkov A.A., *Orositelnye melioratsii uyzhnykh stepey Ukrainy* (Irrigation of the southern steppes of Ukraine), Symferopol: IT “Arial”, 2011, 812 p.
25. Titkov A.A., Gusev P.G., Izmenenie pochvenno-meliorativnykh usloviy Vostochnogo Prisivashiya pod risom i drugimi kulturami risovogo sevooborota (Changes in soil and reclamation conditions of the Eastern Prisivashya under rice and other crops of rice crop rotation), In: *Povyshenie effectivnosti oroshaemogo zemledeliya* (Increasing the efficiency of irrigated agriculture), Odessa, 1975, pp. 49–53.
26. Titkov A.A., Gusev P.G., Sostav i svoistva pochv risovykh sevooborotov v Krymskom Prisivashie (Composition and properties of soils of rice crop rotations in the Crimean Prisivashie), *Pochvovedenie*, 1988, No. 12, pp. 104–110.
27. Titkov A.A., Koltsov A.V., *Vliyanie orosheniya zatopleniem na meliorativnye usloviya i pochvenniy pokrov Prisivashiya* (Influence of irrigation by flooding on reclamation conditions and soil cover of Prisivash’e), Symferopol, 1995, 167 p.
28. Tronza G.E., Solevoy rezhim solontsov lugovykh Krymskogo Prichernomoriya osvoennykh pod kulturoy risa (Salt regime of meadow solonetzes of the Crimean Black Sea coast, developed under rice culture), *Trudy Krymskogo GATU: Selskokhozyaystvennye nauki*, Simferopol, 2002, Iss. 91, pp. 242–247.
29. Khitrov N.B., Rogovneva L.V., Dobritskaya E.Yu., Dunaeva E.A., Kirilenko N.G., Popovich V.F., Solevoe sostoyanie risovoy sistemy severa Kryma posle prekrasheniya podachi vody (Salt state of the rice system of the north of Crimea after the cessation of water supply), *Tavricheskiy vestnik agrarnoy nauki*, Symferopol, 2016, No. 3 (7), pp. 140–154.
30. Chizhikova N.P., Khitrov N.B., Varlamov E.B., Churilin N.A., Raspredelenie mineralov po profilyu solontsa Prisivashiya (Distribution of minerals along the profile of the salt marsh of Prisivashia), *Tavricheskiy vestnik agrarnoy nauki*, Symferopol, 2017, No. 2 (10), pp. 103–116.
31. Yanchkovskiy Yu.F., Solevoy rezhim na risovykh polyakh (Salt regime in rice fields), *Gidrotekhnika i melioratsiya*, 1973, No. 9, pp. 63–67.
32. IUSS Working Group WRB. 2015. World Reference Base for Soil Resources 2014, update 2015, International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. World Soil Resources Reports No. 106, FAO, Rome, 192 p.
33. Richards L.A. (Ed.), US Salinity Laboratory Staff, *Diagnosis and improvement of saline and alkali soils*, USDA Agr. Handbook No. 60, Washington, 1954, 160 p.