

## ДЕГРАДАЦИЯ, ВОССТАНОВЛЕНИЕ И ОХРАНА ПОЧВ

УДК 631.4

### ПЯТИЛЕТНЕЕ ИЗМЕНЕНИЕ ЗАСОЛЕННОСТИ ПОЧВ И ГРУНТОВ РИСОВЫХ СИСТЕМ ПРИКАРКИНИТСКОЙ НИЗМЕННОСТИ ПОСЛЕ ПРЕКРАЩЕНИЯ ОРОШЕНИЯ<sup>1</sup>

© 2021 г. Н. Б. Хитров<sup>а</sup>, \*, Л. В. Роговнева<sup>а</sup>

<sup>а</sup>Почвенный институт им. В.В. Докучаева, Пыжжевский пер, 7, стр. 2, Москва, 119017 Россия

\*e-mail: khitrovn@gmail.com, <https://orcid.org/000-0001-5151-5109>

Поступила в редакцию 28.04.2020 г.

После доработки 25.05.2020 г.

Принята к публикации 12.07.2020 г.

Цель статьи – представить данные о солевом состоянии почв, грунтов и грунтовых вод бывших рисовых систем на Прикаркинитской низменности в Краснопереконском районе Республики Крым в 2015–2018 гг., через 2–5 лет после прекращения орошения. За полвека орошения затоплением чеков большинство почв солонцовых комплексов на рисовой системе были рассолены до глубины 3–3.5 м. В 2015–2018 гг. грунтовые воды ежегодно понижались и залежали преимущественно на глубине ниже критической. С 2017 г. в береговой полосе образовалась депрессионная воронка грунтовых вод с гидравлическим напором до 0.8–1.1 м со стороны моря. В грунтах зоны аэрации увеличилась частота обнаружения горизонтов со скоплениями мелкокристаллического гипса, и в депрессионной воронке на глубине 3.5–4.5 м восстановилось слабое засоление. На чеках с высотой поверхности <2 м над ур. м. в средней и нижней частях почвенного профиля на пятый год после прекращения орошения содержание солей превысило нижнюю границу градации слабой степени засоления. Максимум солей сопровождается наличием хлоридов кальция и магния в поровых растворах и накоплением мучнистых форм гипса.

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

**DOI:** 10.31857/S0032180X21010044

#### ВВЕДЕНИЕ

Равнинная часть Крымского полуострова характеризуется засушливым климатом [7]. Рост населения и развитие промышленности и сельского хозяйства на полуострове в 1950-х годах ограничивался естественными небольшими ресурсами пресных вод. Для решения этих проблем в 1960-х годах был построен Северо-Крымский канал, по которому поступала днепровская вода из Каховского водохранилища. Оросительная система Северо-Крымского канала охватила большую часть равнинного Крыма и включала многочисленные массивы с полевыми севооборотами, сады и рисовые системы.

Строительство рисовых систем было спроектировано на Прикаркинитской и Присивашской низменностях в береговой полосе шириной до 10–15 км. Почвенный покров этих территорий представлен лугово-каштановыми солонцовыми

комплексами, большинство почв которых отличались сильной степенью засоления [4, 7, 13, 15, 21, 23, 25, 37, 38]. В настоящее время такие почвенные комплексы на целинных участках вокруг рисовых систем используются под пастбища. Отметим, что устройство рисовых систем на сильнозасоленных щелочных почвах считается одним из приемов мелиорации и использования исходно малопродуктивных земель в разных странах [42, 53, 57, 58].

После ввода в эксплуатацию в 1960-х годах рисовых систем на Прикаркинитской и Присивашской низменностях почвы стали подвергаться интенсивной промывке от легкорастворимых солей водой с минерализацией 0.37–0.57 г/л, поступающей по Северо-Крымскому каналу. По данным многих авторов [1, 3, 8–12, 17–19, 27–32, 40], сильнозасоленные солончаковые солонцы и солончаковатые лугово-каштановые почвы Крыма по мере их использования под культуру риса путем затопления чеков становились слабозасоленными или незасоленными в слое 0–100 см.

<sup>1</sup> Дополнительная информация для этой статьи доступна по doi 10.31857/S0032180X21010044 для авторизованных пользователей.

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 [34], почвы, грунты зоны аэрации и верхней части водоносного горизонта на территории бывшей рисовой системы в Красноперекопском районе Крыма по формальным критериям оказались незасоленными до глубины 3.0–3.5 м. По данным Крымской гидрогеолого-мелиоративной экспедиции [20, 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 зернокармными и рисовыми севооборотами.

Исходная природная засоленность почв приморских низменностей Крымского п-ова связана с более высоким уровнем моря в прежние эпохи, колебаниями уровня минерализованных грунтовых вод и засушливым климатом в настоящее время [5]. В условиях прекращения подачи воды на рисовые системы Крымского п-ва, расположенные в непосредственной близости к Сивашу и Каркинитскому заливу Черного моря, возникает необходимость оценки весьма вероятного риска восстановления засоленности почв на прибрежных территориях 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 как 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;

**Таблица 1.** Краткая характеристика положения динамических площадок (среднее ± пределы)

Название	Высота, м над ур. м.	Расстояние от берега, м
Целина	1.7 ± 0.12	160 ± 30
Чек 1	1.9 ± 0.07	1150 ± 20
Чек 2	2.4 ± 0.07	1380 ± 20
Чек 3	3.0 ± 0.07	1600 ± 20
Чек 9	3.7 ± 0.07	2800 ± 20
Чек 24	5.3 ± 0.07	5090 ± 20

– 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 на Прикаркинитской низменности через 4–5 лет после прекращения орошения.

## ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Объектами послужили почвы бывшей рисовой системы и рядом расположенных участков целинных солонцовых комплексов на территории ООО “Штурм Перекопа” в Красноперекопском районе. Хозяйство находится на Прикаркинитской низменности. Трансекта заложена севернее села Курганное, пересекая с запада на восток рисовую систему от Каркинитского залива до водохранилища в устье р. Воронцовка (рис. 1). Она включала целинный солонцовый комплекс на побережье и 5 динамических площадок в центрах бывших рисовых чеков, расположенных на разной высоте относительно уровня моря, удаляющихся от берега (табл. 1).

Названия почв даны по классификации почв России [14] в ее более поздней версии [22] и по международной классификации почв WRB-2014 [49], с использованием диагностических критериев, принятых в каждой классификации.

Целинный участок, расположенный на низкой террасе (1.7 м над ур. м.) Каркинитского залива, был ранее исследован Кольцовым [16] и Тронза [32]. В составе почвенной комбинации преобладают солонцы светлые квазиглееватые солончаковые корковые, мелкие, средние и глубокие гипс-содержащие тяжелосуглинистые на делювиальных суглинках, формула профиля: SELq–BSN1el–BSN2–



**Рис. 1.** Положение трансекты (красная линия) через рисовую систему, Красноперекопский район, ООО “Штурм Перекоп”: Ц – участок целинных солонцов; 1, 2, 3, 9, 25 – условные номера рисовых чеков с запада на восток, на которых расположены динамические площадки.

BCAnc,th–BCAcs–BCCa,cs–Cca,cs. По международной классификации почв WRB [49] – Gypsic Salic Solonetz (Albic, Loamic, Columnic, Cutanic, Differentic). Их характеристика опубликована ранее [37].

В ООО “Штурм Перекопа” средний размер чека составляет около 3 га, отводные коллекторы, примыкающие непосредственно к блоку чеков, имеют глубину около 1.5 м, из них вода сбрасывалась в магистральные коллекторы глубиной 3–3.5 м. Общий сброс воды осуществлялся в Каркинитский залив. Рисовая система построена и введена в эксплуатацию в середине 1960-х годов. С 2014 г. территорию используют под богарные полевые севообороты.

После полувекового использования под культуру затопляемого риса почвенный покров чеков представлен пятнистостью двух типов агроземов. Из бывших солонцов сформировались агроземы поверхностно-глеевые текстурно-дифференцированные аккумулятивно-карбонатные окисленно-

глеевые глубокосолончаковатые глубоко гипс-содержащие тяжелосуглинистые на желто-бурых суглинках и глинах с формулой профиля P/Gox–BTg,ox–BCAq,g,th–BCAnc,q–BCCa,cs,g, по WRB [49] – Eutric Oxigleyic Hydragric Gleysol (Luvisc, Loamic, Aric, Drainic, Protocalcic, Bathygypsic). Лугово-каштановые почвы преобразованы в агроземы поверхностно-глеевые ксерометаморфические окисленно-глеевые тяжелосуглинистые на желто-бурых суглинках и глинах с формулой профиля P/Gox–BMKg,ox–BCAq,g,th–BCAnc,q–BCCa,g, по WRB [49] – Eutric Oxigleyic Hydragric Gleysol (Loamic, Aric, Drainic, Protocalcic). Особенностью этих почв являлся серо-сизый пахотный горизонт с многочисленными ржаво-бурыми пленками гидроксидов железа на гранях агрегатов и стенках пор. По своей сути в течение первых трех лет после прекращения орошения затоплением уже в окислительном режиме горизонт оставался глеевым. С 2017 г. на четвертый год богарного использования пахотный горизонт потерял признаки глеевого горизонта, сохранились лишь окисленно-глееватые признаки (Pox) в обеих группах почв. По этой причине термин “поверхностно-глеевые” в названиях обеих групп почв по классификации почв России стал излишним. По классификации WRB-2014 почвы стали относиться к другой реферативной почвенной группе: Luvisc Kastanozem (Loamic, Aric, Protosodic, Stagnic, Bathygypsic) и Naplic Kastanozem (Loamic, Aric, Stagnic).

Для оценки пространственного варьирования засоленности почв и грунтов на каждой динамической площадке размером 30 × 30 м закладывали пять скважин методом конверта с разносом четырех угловых точек на 15 м относительно центральной.

Одна из диагоналей конверта была направлена вдоль трансекты. 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 характеристики цвета, влажности, класса гранулометрического состава, наличия вскипания от HCl, карбонатных и гипсовых новообразований. На каждой динамической площадке пять точек опробования всегда были представлены обоими компонентами почвенного покрова.

Установившийся УГВ определяли через 5–6 ч после вскрытия скважины с контролем на следующий день. Измерение УГВ производили мерной лентой с хлопущкой, погрешность 1 см. Отбор

грунтовой воды выполняли с помощью желонки. В извлеченной пробе измеряли удельную электропроводность (ЕС) и температуру полевым кондуктометром КП-001 с последующим расчетом значения удельной электропроводности воды, приведенной к температуре 25°C (ЕС<sub>25</sub>) путем умножения на поправочный температурный коэффициент [54]. В лаборатории определяли ионный состав, рН традиционными методами [24] и ЕС<sub>25</sub> лабораторным кондуктометром.

Географические координаты всех точек опробования регистрировали с помощью навигационного приемника GPS (номинальная пространственная погрешность 15 м). Инструментальная съемка рельефа вдоль трансекты выполнена с помощью оптического нивелира (максимальная погрешность определения высоты до 3–4 см на 6.5 км нивелирного хода). Высота уровня грунтовых вод в конкретный срок измерения получена путем вычитания глубины установившегося уровня в скважине из высоты дневной поверхности на динамической площадке.

Из высушенных и растертых (<1 мм) образцов готовили пасты с влажностью 50 мас. % путем увлажнения дистиллированной водой. На следующий день после перемешивания пасты измеря-

ли активности ионов Na<sup>+</sup>, Cl<sup>-</sup> и Ca<sup>2+</sup> 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 пяти и двух средних значений активности иона в индивидуальных образцах. Для серии из пяти 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 ( $s_{cp}$ ) [6].

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 (все коэффициенты значимы):

$$\begin{cases} \text{если } X \leq 10, \text{ то } Y = 1.15 + 1.02X, \\ (R^2 = 0.89; \text{ доверительный интервал } Y \pm 2\%), \\ \text{если } 10 < X < 50, \text{ то } Y = 3.840 + 0.899X - 0.0072X^2, \\ (R^2 = 0.67; \text{ доверительный интервал } Y \pm 5\%). \end{cases}$$

При создании модели были объединены сопряженные данные при одной влажности по активностям ионов натрия и кальция, измеренных ионоселективными электродами в пастах, и определению состава обменных катионов по методу Пфеффера в модификации Молодцова и Игнатовой, полученных для разных объектов – почв солонцовых комплексов в Ставрополье, Крыму, Ростовской, Волгоградской, Воронежской областях. Магний в этой модели не учитывается, поскольку нет адекватного ионоселективного электрода. Поэтому погрешность оценки доли обменного натрия заметно выше по сравнению с прямым определением указанным выше методом, но допустимая для принятия оперативного решения. При этом использование модели позволяет получать информацию довольно быстро в большом числе образцов (до 100 анализов в день) в отличие от трудоемкого прямого определения этого показателя (60 анализов в месяц).

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 целинном участке солонцового комплекса, расположенном на первой террасе в 160 м от берега моря, УГВ соответствовал уровню моря, не меняясь в годы наблюдений.

В 2015 г. грунтовые воды залегают ниже критического уровня на глубине 2.8–3.5 м [34]. Поскольку большая часть рисовых чеков на исследуемом участке находятся на абсолютной высоте выше 3 м, зеркало грунтовых вод было выше уровня моря (рис. 2). Минерализация растворов верхней (вскрытой бурением) части водоносного горизонта составляла 1.1–3.5 г/л (табл. 2). Химический состав был преимущественно сульфатный по анионам и смешанный кальциево-натриево-магниевый по катионам.

К концу 2016 г., по данным гидрогеолого-мелиоративной экспедиции Крыма [20] на большей

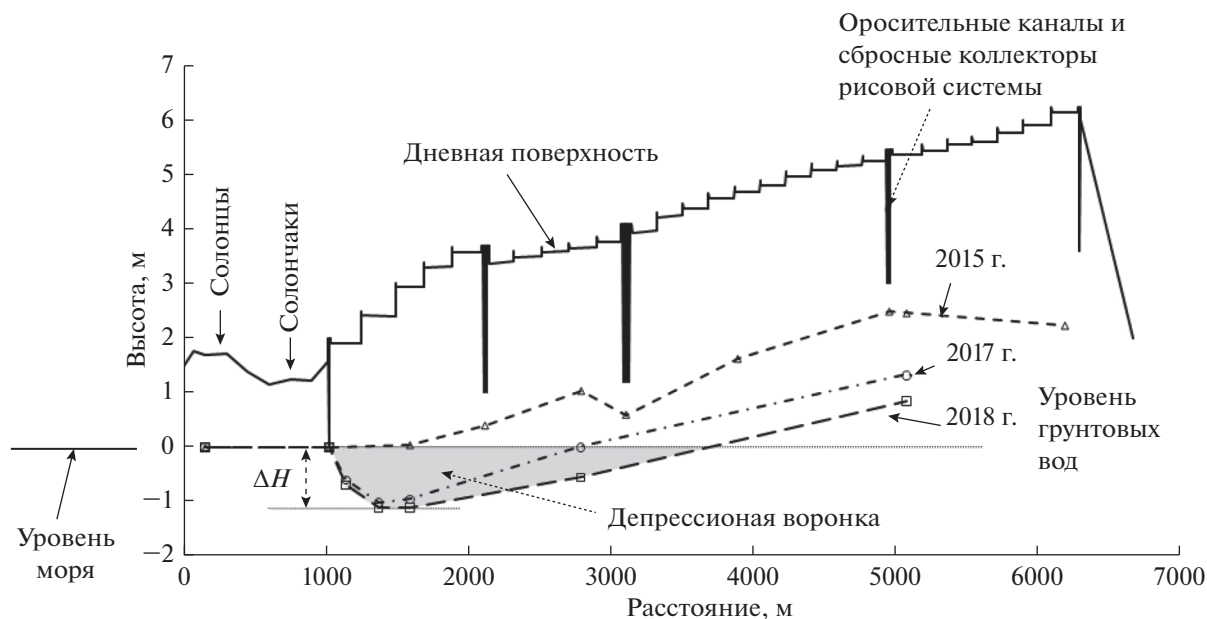


Рис. 2. Изменение высоты уровня грунтовых вод в 2015–2018 гг.  $\Delta H$  – гидравлический напор морских вод в сторону грунтовых вод.

части оросительной системы Северо-Крымского канала произошло растекание куполов грунтовых вод под каналами и на орошаемых массивах.

На четвертый год после прекращения орошения (2017 г.) на исследуемой трансекте глубина грунтовых вод изменялась в пределах от 2.5 до 4.1 м. В области низких чеков, расположенных на высоте 2–3 м над ур. м., УГВ опустился до отрицательных абсолютных отметок  $-0.9...-1.0$  м. Иными словами, в береговой полосе возникла депрессионная воронка грунтовых вод с максимальным гидравлическим напором до 1 м и шириной около 1.5–1.7 км. Отметим, что на первой террасе с целинными солонцовыми комплексами и солончаками УГВ практически не изменился.

В 2018 г. диапазон изменения глубины грунтовых вод вдоль трансекты расширился. Минимальные значения остались приблизительно такими же, как в предшествующий год 2.5–2.7 м, а максимальные заметно увеличились до 4.5–4.6 м. В результате депрессионная воронка грунтовых вод немного углубилась до  $-1.1$  м и расширилась до 2.5 км.

Аналогичная ситуация наблюдалась на рисовых системах Присивашской низменности [35]. Отличие заключается в размерах депрессионной воронки грунтовых вод. Она была ближе к берегу Сиваша, глубже (до  $-1.6$  м) и шире в связи с положением чеков на высоте менее 3 м.

Общее понижение УГВ на исследуемом участке происходило за счет потребления воды корневыми системами выращиваемых сельскохозяйственных культур (пшеница, ячмень, подсолнечник, лен) в

условиях заметного дефицита атмосферных осадков в вегетационные периоды 2017 и 2018 гг. Наиболее сильно понижение УГВ происходило под посевами подсолнечника.

Понижение уровня сопровождалось тенденцией увеличения минерализации и изменения состава грунтовых вод. В анионном составе на фоне доминирующих сульфатов с максимальными концентрациями до 80–107 ммоль(экв)/л, увеличилась концентрация хлоридов, изменяющаяся в интервале от 2–6 до 16–28 ммоль/л. Концентрации всех трех главных катионов стали выше с тенденцией изменения их соотношения. В 2017 и 2018 гг. в грунтовых водах, вскрытых на большей глубине, приблизительно в половине случаев среди катионов наиболее высокие концентрации имел натрий (табл. 2).

Связь между минерализацией и высотой уровня грунтовых вод имеет нелинейный вид (рис. 3). Формально ее можно аппроксимировать полиномом второй степени с коэффициентом детерминации  $R^2 = 0.85$  и значимыми параметрами регрессии. На рис. 3 хорошо видно, что выделяются два участка такой связи: 1 – широкий разброс значений минерализации вод от 0.3–1.0 до 3–4 г/л независимо от высоты УГВ в области положительных его значений; 2 – почти прямолинейный рост минерализации вод от 4 до 9 г/л по мере углубления УГВ ниже уровня моря.

Возможны 3 причины увеличения минерализации грунтовых вод с понижением УГВ: 1 – по мере увеличения глубины увеличивается засоленность вмещающей породы; 2 – происходит при-



**Таблица 2.** Глубина залегания и ионный состав грунтовых вод

№ скв.	УГВ, см	рН	HCO <sub>3</sub>	Cl	SO <sub>4</sub>	Ca	Mg	Na	K	S*, г/л	EC <sub>25</sub> , дСм/м
			ммоль(экв)/л								
2015 г.											
КР-094	287	н.о.	2.8	3.8	45.4	6.8	20.4	25.4	0.04	3.45	5.55
КР-100	291	н.о.	2.5	0.4	41.1	8.3	19.8	12.5	0.05	2.83	3.67
КР-102	271	н.о.	0.8	0.7	15.7	2.2	8.8	5.8	0.06	1.11	2.57
КР-103	297	н.о.	3.2	0.1	46.0	11.5	22.0	14.8	0.06	3.44	4.20
КР-104	289	н.о.	4.2	1.6	18.2	3.5	9.1	14.0	0.07	1.69	2.24
2017 г.											
КР-194	392	7.72	8.3	10.1	83.1	15.6	40.2	53.3	0.02	6.88	7.58
КР-199	249	7.48	6.9	16.7	66.2	25.7	38.2	29.5	0.07	5.84	6.35
КР-204	341	7.44	8.1	5.8	84.8	14.5	38.7	44.4	0.02	6.54	7.20
КР-209	403	7.50	8.4	4.0	29.2	6.8	13.3	20.1	0.01	2.81	3.72
КР-210	374	7.44	8.9	2.6	41.6	8.9	23.1	21.9	0.09	3.57	4.29
2018 г.											
КР-331	256	7.43	7.0	16.1	72.0	21.0	45.7	28.5	0.02	6.08	6.63
КР-332	262	7.41	6.6	14.8	66.6	18.6	43.3	26.1	0.02	5.62	6.25
КР-336	349	7.44	7.9	8.0	95.0	19.6	46.3	45.0	0.02	7.31	7.23
КР-337	351	7.43	8.3	6.7	82.6	14.7	38.7	44.3	0.02	6.49	7.06
КР-342	406	7.40	8.6	20.3	107.0	16.2	51.4	68.7	0.02	8.91	10.25
КР-343	405	7.46	8.6	28.3	100.4	16.2	51.4	69.8	0.02	8.90	10.41
КР-346	429	7.41	9.5	6.8	63.0	11.6	36.6	31.5	0.02	5.24	5.91
КР-347	431	7.55	11.0	5.1	45.0	7.7	26.3	27.1	0.02	4.10	4.81
КР-351	450	7.41	5.9	1.8	50.7	12.4	23.8	22.2	0.02	3.90	4.30
КР-352	454	7.45	8.3	1.8	23.8	3.7	14.7	15.5	0.02	2.32	2.87

\* S – сумма ионов, г/л.

Примечание. н.о. – не определяли.

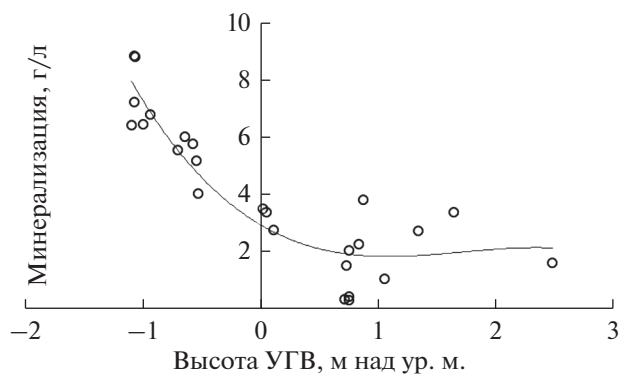
ток солевых растворов со стороны моря; 3 – увеличение концентрации солей в грунтовой воде по мере ее расхода глубокими корневыми системами полевых культур (например, подсолнечника).

Последняя причина представляется маловероятной, поскольку расход грунтовой воды сопровождается понижением уровня. В этих условиях соли должны накапливаться в слое, который освобождается от гравитационной воды, несущественно влияя на минерализацию растворов более глубокой части водоносного горизонта.

На водоносные горизонты выше уровня моря приток солевых растворов со стороны моря оказывать влияния не может, поскольку эти горизонты имеют гидравлический напор, наоборот, в сторону моря. Поэтому вариацию минерализации грунтовых вод на участках с положительными значениями высоты УГВ следует рассматривать как результат исходной пространственной неоднородности засоленности грунтов и грунтовых вод бывших лугово-каштановых солонцовых комплексов и разной степени их рассоления в ходе полувековой ежегодной промывки пресными водами при орошении риса затоплением чеков.

На участках с отрицательными значениями высоты УГВ боковой приток солевых растворов со стороны моря мало вероятен в силу большого

расстояния от моря (более 1 км). Более вероятно выдавливание более минерализованных растворов из нижележащих водоносных горизонтов за счет общего гидравлического напора. Вместе с тем в исследуемый период 2017–2018 гг., когда было установлено формирование депрессионной воронки грунтовых вод, наблюдалось пока только понижение уровня, сопровождавшееся увеличением минерализации вод. Поэтому наиболее вероятной причиной такой связи между высотой и минерализацией грунтовых вод следует признать



**Рис. 3.** Связь минерализации и высоты грунтовых вод в период 2015–2018 гг.

увеличение засоленности вмещающих пород по мере углубления слоя относительно уровня моря.

*Оценка пространственного варьирования активности ионов* в исследуемых почвах и грунтах бывшей рисовой системы на Прикаркинской низменности в Красноперекоском районе Республики Крым представлена в табл. 3.

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. 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  $F$ -критерию [6]. 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 среди трех ионов наименьшее пространственное варьирование имеет активность  $Na^+$ . Это проявляется и в относительных величинах — коэффициентах вариации.

**Солевое состояние почв и грунтов.** В период эксплуатации рисовой системы в данном хозяйстве сотрудники кафедры мелиорации почв Крымского аграрного университета вели стационарные наблюдения за состоянием почв [9–12, 16, 32]. По опубликованным данным [32] и материалам диссертации Тронза [33], почвы лугово-каштановых солонцовых комплексов на исследуемом массиве в начале 2000-х годов, то есть через 35–40 лет после ввода в эксплуатацию рисовой системы, были рассолены до глубины около 1 м. Глубже опробование не выполнялось, поскольку грунтовая толща была обводнена.

По результатам обследования в 2015 г., на второй год после прекращения орошения и перехода к богарной системе земледелия, было установлено, что почвы, грунты зоны аэрации и верхняя часть водоносного горизонта рассолены на большей части массива до глубины 3–3.5 м [34].

На относительно высоких чеках 9 и 25, расположенных на высоте 3.7 и 5.3 м над ур. м., в 2017 и 2018 гг. почвы и грунты зоны аэрации до глубины 3.4–4.5 м оставались незасоленными. Это следует из распределения активности  $Na^+$  и  $Cl^-$ , измеренных в пастах с влажностью 50 мас. % (рис. 4), и данных водной вытяжки (рис. S1). Активность  $Na^+$  постепенно увеличивается от 1–5 ммоль/л в слое 0–100 см до 12–17 ммоль/л на глубине 300–500 см, приближаясь к условной нижней границе слабой степени засоления ( $a_{Na}$  20 ммоль/л), но не достигая ее. В пересчете на массу твердой фазы

содержание натрия в жидкой фазе изменится от 0.05–0.25 до 0.6–0.85 смоль(экв)/кг.

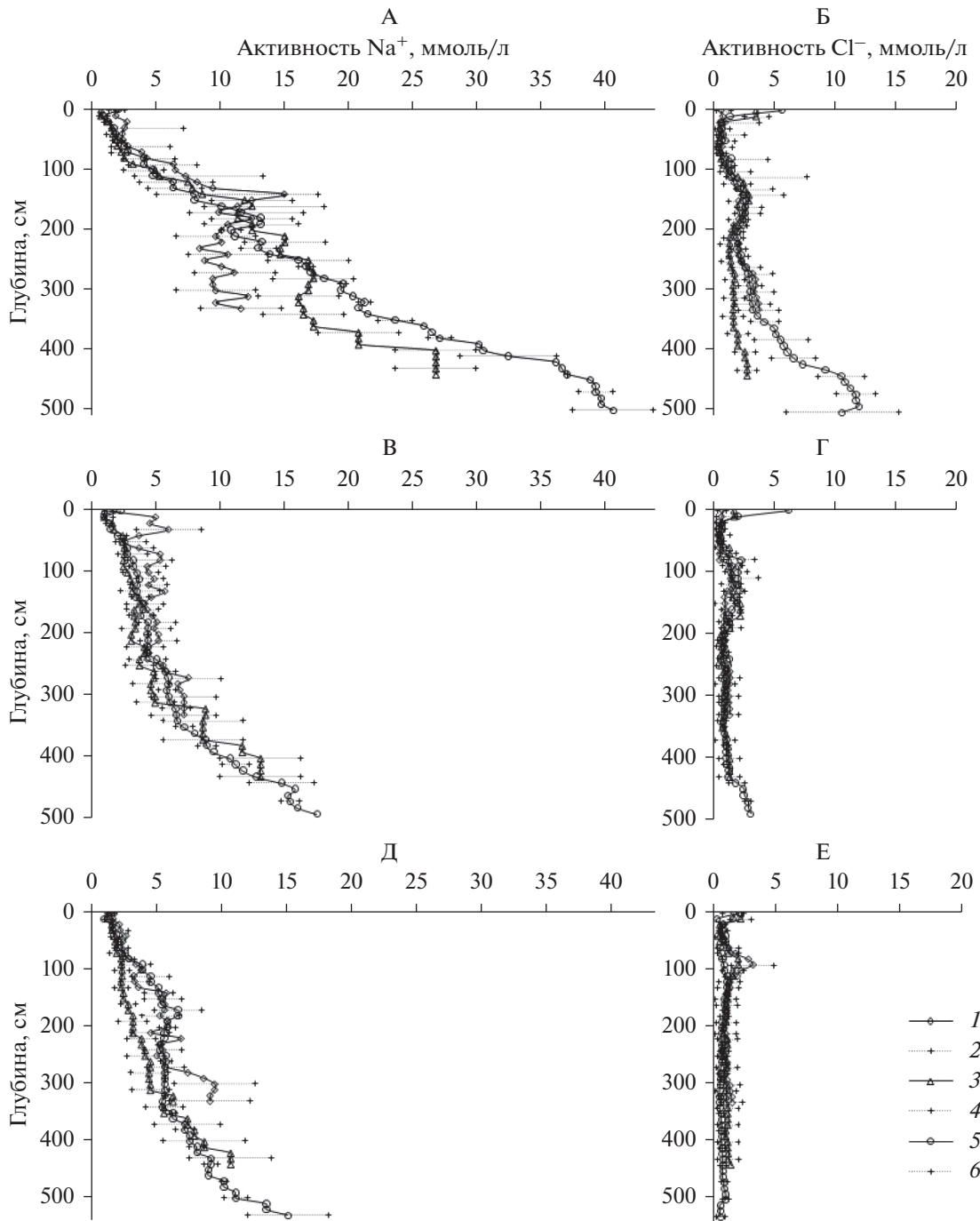
Значения активности хлоридов практически одинаковы по всей толще почв и грунтов до глубины 4–5 м; они варьируют в диапазоне от 0.3–0.5 до 3–5 ммоль/л, редко увеличиваясь до 7 ммоль/л. В пересчете на массу твердой фазы содержание хлоридов не превышает 0.3 смоль(экв)/кг. Вместе с тем обратим внимание, что в большинстве точек опробования на высоких чеках наблюдался слабо выраженный максимум активности хлоридов на глубине 1–2 м (рис. 4, Г, Е), который соответствовал положению верхней части капиллярной каймы в период последовательного понижения уровня грунтовых вод с 2014 г. Это свидетельствует о потенциальной способности восстановления засоленности почв и грунтов, которая на рассматриваемых относительно высоких чеках может реализоваться в условиях положения УГВ на глубине 3.5–4.5 м.

Значения активности  $Na^+$  превышают значения активности  $Cl^-$  в 3–5 раз (рис. 4) на фоне значений активности  $Ca^{2+}$  от 0.5 до 2–4 ммоль/л (рис. S2). Это означает, что среди легкорастворимых солей в незасоленных горизонтах доминируют сульфаты натрия. Почвы и грунты содержат обменный натрий от 2–5 до 7–12% от ЕКО (рис. S3) как остаточное явление, связанное с рассолением исходно сильнозасоленных почв лугово-каштановых солонцовых комплексов в течение полувекowego их промывания под культурой риса.

Наличие небольшого количества обменного натрия и карбонатов кальция в формально незасоленных горизонтах является причиной возникновения токсической щелочности по данным водной вытяжки почва : вода 1 : 5 (рис. S1 М, S1 П). Максимумы ее содержания приурочены к почвенным горизонтам на глубине 20–80 см и к грунтам зоны аэрации на глубине 4–5 м, примыкающим к водоносному горизонту.

Динамика солевого состояния почв и грунтов на чеках с высотой 3.0 м над ур. м. имеет качественное отличие от таковой более высоких чеков. В 2015 г. почвы и грунты на чеке 3 были незасоленными до грунтовой воды, включая верхнюю часть водоносного в тот год горизонта, то есть до 3.0–3.5 м (рис. 4, А). Наиболее высокие значения активности  $Na^+$  в диапазоне 8–15 ммоль/л отмечались в слое 1.5–3.5 м. В почвенном профиле активность  $Na^+$  была преимущественно менее 5 ммоль/л.

Потребление грунтовой воды корневыми системами сельскохозяйственных культур (в том числе подсолнечником) привели к дренированию верхней части водоносного горизонта, располагающейся на абсолютной высоте ниже уровня моря, и образованию депрессионной воронки грунтовых вод. По мере углубления депрессионной воронки, в дренируемых слоях грунтов глубже 3 м



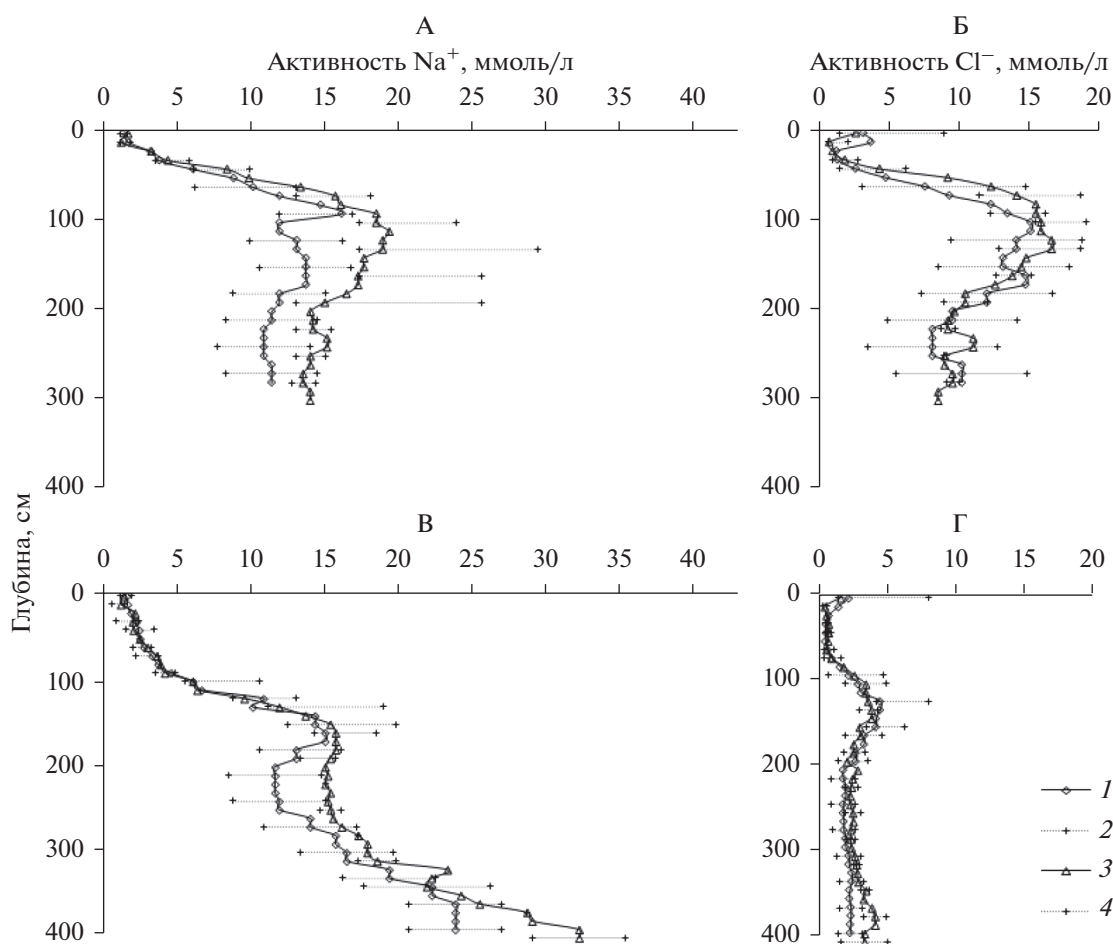
**Рис. 4.** Изменение профильного распределения активности ионов натрия (А, В, Д) и хлорид-ионов (Б, Г, Е) на динамических площадках: А, Б – чек 3, высота 3.0 м над ур. м.; В, Г – чек 9, высота 3.7 м над ур. м.; Д, Е – чек 25, высота 5.3 м над ур. м. Обозначения: 1, 3, 5 – медиана, 2, 4, 6 – пределы варьирования в слое. Даты: 1, 2 – июль 2015 г.; 3, 4 – июль 2017 г.; 5, 6 – июль 2018 г.

началось накопление солей натрия, соответствующее слабой степени засоления. На рис. 4, А значения активности  $\text{Na}^+$  на глубине 3–5 м в 2017 г. и особенно в 2018 г. превышают 20 ммоль/л, увеличиваясь с глубиной.

Отмеченное явление сопровождалось увеличением в 2 раза активности хлоридов в этих же го-

ризонтах (рис. 4, Б). Обратим внимание также на небольшой локальный максимум активности хлоридов на глубине около 150 см, соответствующей верхней части капиллярной каймы, и максимум в поверхностных горизонтах. Хлориды – несорбирующиеся легкоподвижные ионы. Обычно их используют как метки при моделировании





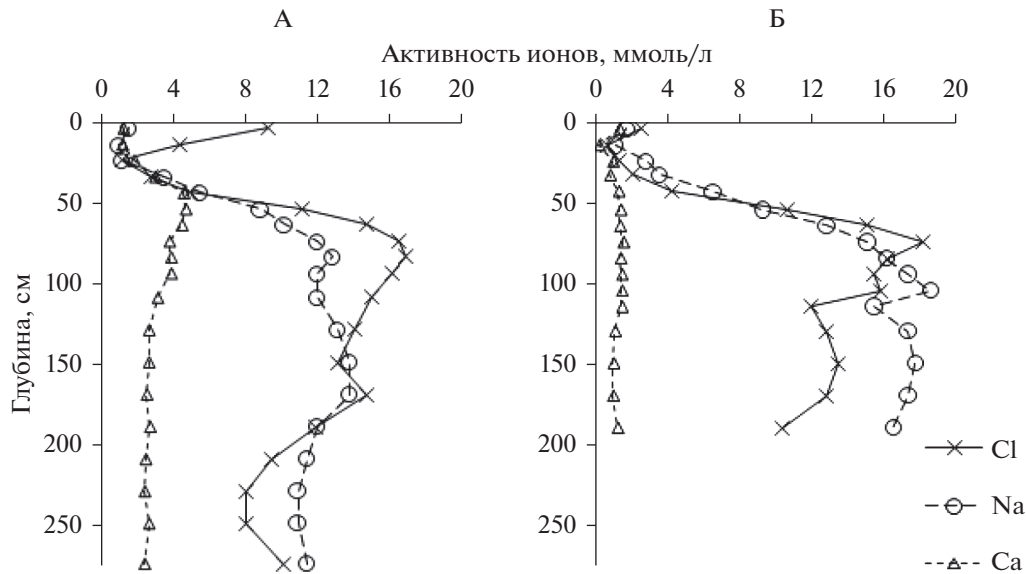
**Рис. 5.** Изменение профильного распределения активности ионов натрия (А, В) и хлорид-ионов (Б, Г) на динамических площадках низких чеков: А, Б – чек 1, высота 1.9 м над ур. м.; В, Г – чек 2, высота 2.4 м над ур. м. Обозначения: 1, 3 – медиана, 2, 4 – пределы варьирования в слое. Даты: 1, 2 – июль 2017 г.; 3, 4 – июль 2018 г.

движения воды в почвах. Для рассматриваемого объекта положение максимумов активности  $\text{Cl}^-$  становится индикатором начальной стадии накопления легкорастворимых солей, пока еще не приведшей к реальному засолению.

На чеках с высотой поверхности 2.4 м над ур. м. в 2017–2018 гг. солевое состояние почв и грунтов похоже на таковое чеков с высотой 3.0 м. Количественные отличия небольшие. Дренажные грунты в депрессионной воронке глубже 3 м от поверхности имеют слабую степень засоления (рис. 5, В). Активность  $\text{Na}^+$  составляла 20–44 ммоль/л, что в пересчете на массу твердой фазы соответствует содержанию натрия в жидкой фазе 1.1–2.7 смоль(экв)/кг. Вертикальное распределение активности хлоридов характеризовалось отчетливым широким локальным максимумом в слое 100–200 см с экстремумом на глубине около 150 см (рис. 5, Г). При этом профили 2017 и 2018 гг. статистически не различаются в связи с заметным пространственным варьированием.

Критическая ситуация развивалась на самом нижнем чеке 1 с высотой 1.9 м над ур. м. Вертикальное распределение солей имело срединно-аккумулятивный тип с максимумом на глубине 100–150 см (рис. 5, А, Б; S01 А). В 2017 г. формально почва и грунты оставались еще незасоленными. Активности  $\text{Na}^+$  и  $\text{Cl}^-$  в области максимума были близки между собой, изменяясь в диапазоне 10–17 ммоль/л (при влажности 50%), или 0.5–0.7 смоль(экв)/кг в пересчете на массу твердой фазы, или 0.03–0.04% NaCl. В 2018 г. медиана активности  $\text{Na}^+$  в области максимума уже соответствовала нижней границе слабой степени засоления (20 ммоль/л).

Вместе с тем в двух из пяти скважин в 2017 г. на глубине 50–150 см наблюдалась более высокая активность хлоридов по сравнению с активностью натрия в пастах на 2–4.5 ммоль/л, что означало наличие хлоридов кальция и магния в почвенных растворах еще формально незасоленных горизонтов (рис. 6). В 2018 г. подобная ситуация



**Рис. 6.** Два выборочных примера профильного распределения активности ионов натрия (Na), хлоридов (Cl) и кальция (Ca), измеренных в пастах с влажностью 50 мас. %, в почвах и грунтах чека 1, расположенного на высоте 1.9 м: А – скв. КР-199, 2017 г.; Б – скв. КР-334, 2018 г.

сохранилась в слое 50–80 см с меньшим превышением хлоридов над натрием (<3 ммоль/л) на фоне общего увеличения активности обоих ионов. Появление хлоридов кальция – это признак развития вторичного засоления незасоленных почв. Для исследуемых рассоленных за полвека исходно засоленных почв наличие таких признаков означает начальные стадии восстановления засоленности, протекающих аналогично вторичному засолению.

Присутствие новообразований гипса в разных морфологических формах [39, 60] – одна из характерных особенностей многих горизонтов почв аридных и семиаридных регионов, имеющих сульфатный или хлоридно-сульфатный химизм засоления. Исследуемые объекты не являются исключением. В целинных почвах лугово-каштановых солонцовых комплексов Северо-Крымской низменности скопления мелкокристаллического гипса встречаются, прежде всего, в грунтах зоны аэрации глубже 1.5 м всего комплекса и дифференцированно в профиле почв [2, 4, 25]. В лугово-каштановых почвах гипс обычно отсутствует во всем профиле до гор. ВСса. В целинных солонцах новообразования гипса чаще всего обнаруживаются в подсолонцовом карбонатном засоленном гор. ВСАпс,сs, начиная с 30–50 см и глубже [4, 37].

Полувековая ежегодная промывка почв солонцового комплекса при выращивании риса способствовала не только удалению легкорастворимых солей из почв и грунтов зоны аэрации, но и частичному растворению и удалению гипса. По данным обследования 2015 г., на второй год после прекращения орошения, морфологическое проявление гипса отмечалось только в половине разрезов и скважин. В большинстве точек опробова-

ния он встречался в небольших количествах на глубине от 90–110 до 130–150 см в агроземах текстурно-дифференцированных, которые до орошения были солонцами. Глубже в грунтах зоны аэрации до грунтовой воды, как правило, гипс не обнаруживался. Исключением были три скважины, в которых гипс присутствовал во всей толще от 110–120 см до грунтовой воды на глубине 260–300 см.

Гипсовые новообразования имели остаточный характер. Они были представлены скоплениями мелких (0.5–1.5 мм) чечевицеобразных кристаллов. Скопления кристаллов имели округлую форму диаметром 5–15 мм или форму червеобразных и уплощенных прожилок толщиной до 2–3 мм и длиной до 1–3 см. В последующие годы (2016–2018) новообразования гипса стали встречаться чаще, они стали обильнее, прежде всего, в грунтах зоны аэрации под агроземами текстурно-дифференцированными (бывшими солонцами) и реже под агроземами аккумулятивно-карбонатными (бывшими лугово-каштановыми почвами). По морфологической оценке обилия, наблюдались два максимума скоплений гипса: один на глубине 120–160 см и второй – на 200–350 см. Оба диапазона глубины соответствуют верхней части капиллярной каймы при глубине грунтовых вод 250–350 см в 2015–2016 гг. и 350–500 см в 2017–2018 гг. соответственно. В горизонтах с максимальным обилием гипса существенно увеличились размеры скоплений кристаллов до 3–5 см, размеры отдельных кристаллов до 2–3 мм, иногда до 5–7 мм, появились сростки кристаллов до 1 см и в отдельных горизонтах даже плотные округлые друзы диаметром 3–4 см.

**Таблица 3.** Усредненные оценки среднеквадратического отклонения ( $s_{cp}$ ) в зависимости от диапазона средних значений активности ионов в слое

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 <sup>+</sup>	0–2.00	0–0.11	0.10–0.68	0.33	108	33
	2.01–3.00	0.11–0.16	0.17–0.90	0.58	96	23
	3.01–4.00	0.16–0.21	0.51–1.60	1.06	112	30
	4.01–6.00	0.21–0.33	0.57–1.67	1.11	64	22
	6.01–8.00	0.33–0.44	0.94–4.19	2.59	36	37
	8.01–22.00	0.44–1.27	1.00–6.09	3.36	236	22
Cl <sup>-</sup>	0–1.00	0–0.05	0.08–0.97	0.39	108	78
	1.01–2.00	0.05–0.11	0.19–2.52	0.87	184	58
	2.01–3.00	0.11–0.16	0.45–1.70	1.01	116	40
	3.01–4.00	0.16–0.21	0.52–4.77	1.96	136	56
	4.01–8.00	0.21–0.44	0.87–5.39	2.46	112	41
	8.01–20.00	0.44–1.15	0.87–5.25	3.04	112	22
Ca <sup>2+</sup>	0–1.00	0–0.06	0.19–0.46	0.39	24	78
	1.01–2.00	0.06–0.12	0.25–1.28	0.68	220	45
	2.01–5.00	0.12–0.34	0.43–4.44	1.59	408	45

Подобные морфологические формы новообразований гипса свидетельствуют о сравнительно медленном расходе воды корневыми системами растений из капиллярной каймы с непрекращающимся капиллярным пополнением запаса воды в слое из нижележащего водоносного горизонта. В этих условиях происходит медленный и непрерывный процесс увеличения общей концентрации солей в слое, сопровождающийся частичным осаждением сульфата кальция в виде гипса. Дополнительным источником ионов кальция в растворе являлся обменный кальций, который вытеснялся в раствор поступающими ионами Na<sup>+</sup> и Mg<sup>2+</sup> с поднимающимися солевыми растворами.

Наличие плотных друз гипса на первый взгляд может рассматриваться как унаследованный признак, довольно широко распространенный в целинных сильнозасоленных почвах солонцовых комплексов Прикаркинской и Присивашской низменностей. Вместе с тем исследуемые объекты имеют особенность – они были промыты пресной водой в течение полувека под культурой риса. Выше отмечался остаточный характер скоплений мелкокристаллического гипса в нижних горизонтах почв в некоторых разрезах и в породах зоны аэрации, но в 2015–2016 гг. друзы ни разу не были обнаружены. Они описаны только с 2018 г. на одном объекте – в почвах самого низкого чека (высота 1.9 м над ур. м.), где отмечается явное вторичное засоление от близко залегающих грунтовых вод на глубине 2.3–2.5 м (это критический уровень). Друзы встречаются в сравнительно тонком слое на глубине от 110 до 140 см, который соответствует верхней части капиллярной каймы.

Выше и ниже этого слоя друз нет, а обилие выделений гипса уменьшается в обе стороны. Поэтому с высокой вероятностью допускаем, что плотные друзы гипса в указанных условиях являются новообразованными при вторичном засолении участка после прекращения орошения.

На низких чеках в дополнение к описанным выше формам гипсовых новообразований, встречается еще одна форма – белые прожилки мучнистого гипса. Размеры кристаллов гипса трудно различимы невооруженным глазом. Скопление кристаллов выглядит как мука. Толщина прожилок варьирует от 0.5 до 2–4 мм, длина – от 5–7 до 25–50 мм. Прожилки часто имеют субвертикальную ориентацию. При увеличении обилия образуют прерывистую или сплошную сетку (рис. S4).

На самом низком чеке (высота 1.9 м над ур. м.) в 2017 и 2018 гг. обильные прожилки мучнистого гипса отмечались в диапазоне глубин от 34–50 до 100–120 см в аккумулятивно-карбонатном (BCAnc,cs) и переходном к породе (BCCa,cs) горизонтах агроземов текстурно-дифференцированных (бывших солонцов) и агроземов аккумулятивно-карбонатных (бывших лугово-каштановых почв). Во всех случаях глубже залегал гор. Cca,cs с очень обильными скоплениями мелкокристаллического гипса со сростками кристаллов и плотными друзами. На этом чеке УГВ залегал на глубине 2.5–2.6 м. Горизонты с максимальным обилием мелкокристаллического гипса соответствовали более или менее постоянно увлажненной верхней части капиллярной каймы, тогда как присутствие вертикальных прожилок мучнистого гипса является индикатором сравнительно корот-

кого периода капиллярного увлажнения снизу этих горизонтов с последующим высушиванием корневыми системами выращиваемых культур, в течение которого успевало образоваться большое число очень мелких кристаллов гипса, но было недостаточно времени для их роста и перекристаллизации.

Временное присутствие в почвенных растворах горизонтов с мучнистыми формами гипса хлоридов кальция дает основание утверждать, что важным механизмом осаждения гипса является вытеснение обменного кальция в жидкую фазу натрием из поднимающихся хлоридно-сульфатных растворов.

**Сравнение с другими объектами.** Похожие объекты исследованы нами на бывших рисовых системах Присивашской низменности в Нижнегорском районе [35]. На обоих участках исходный почвенный покров был представлен сильнозасоленными лугово-каштановыми солонцовыми комплексами, которые в течение полувекковой промывки пресными водами Северо-Крымского канала в условиях выращивания риса были рассолены до глубины 3–3.5 м. После прекращения орошения наблюдалось понижение УГВ за счет естественного растекания их купола и расхода грунтовых вод корневыми системами сельскохозяйственных культур, выращиваемых по технологиям сухого земледелия. На обоих участках на четвертый и пятый год (2017–2018) после прекращения орошения в береговой полосе Каркинитского залива и Сиваша сформировалась депрессионная воронка грунтовых вод. Наблюдается лишь вариация максимальной величины возникшего гидравлического напора со стороны морских вод: до 1.6 м в Нижнегорском и до 1.1 м в Красноперекопском районах. В обоих случаях происходит увеличение минерализации грунтовых вод по мере понижения их уровня, и отмечалась тенденция постепенного накопления легкорастворимых солей в грунтах на глубине более 3 м, а также мелкокристаллического гипса в слое от 1.2–1.5 до 3–4 м. Иными словами, после прекращения орошения рисовых систем на обоих участках на приморских низменностях Крымского полуострова наблюдаются сходные тенденции, свидетельствующие о начальных, пока еще скрытых, стадиях восстановления засоленности рассоленных почв солонцовых комплексов.

В литературе нам не удалось найти информации об аналогичных ситуациях использования земель, то есть о поведении почв после прекращения орошения ранее активно эксплуатировавшихся рисовых систем. Встречается информация о двух группах ситуаций, наиболее близко имеющих отношение к исследуемым нами объектам: 1 – изменение засоленности при выращивании риса на сильнозасоленных почвах; 2 – изменение минера-

лизации и состава грунтовых вод в приморских районах при избыточной их откачке для сельскохозяйственных или иных нужд.

В практике вовлечения сильнозасоленных почв в сельскохозяйственный оборот в аридных регионах мира одним из подходов к мелиорации считают выращивание риса – сравнительно солеустойчивой культуры, для роста и развития которой почву затопляют, обеспечивая частичную промывку. При этом следует учитывать поступление солей в водосточники ниже по течению, что уменьшает объемы пресных вод [57].

Выращивание риса затоплением на засоленных щелочных суглинистых почвах в Пакистане (район Файзалабад, Пенджаб) на фоне применения гипса в дозе 50% от потребности (расчет по обменному натрию) и остатков соломы пшеницы и риса оказалось наиболее эффективным приемом повышения урожайности риса с одновременным уменьшением засоленности, рН и доли обменного натрия в почвах [42]. В других экспериментах, выполненных на подобных почвах в том же районе, была показана возможность частичного рассоления и уменьшения щелочности исходно сильнощелочных почв при их орошении солеными щелочными водами с более низкими показателями удельной электропроводности и SAR по сравнению с вытяжками из почв [53]. При этом важным условием является наличие достаточного количества ионов кальция в воде или обязательное применение гипса. Аналогичные результаты были получены для разных почв Индии [45, 50].

В обзорных публикациях [36, 59] отмечается, что в последние десятилетия актуальность процесса интрузии морских вод в прибрежные водоносные горизонты возросла в связи увеличением потребности в пресных водах в прибрежных районах, приводящей к экстенсивной откачке грунтовых вод, и предполагаемым подъемом уровня моря и изменением климата. Обсуждаются вопросы моделирования этого процесса.

В Омани на приморской равнине Аль-Батинах в последние десятилетия интенсивно развивалось орошаемое земледелие с использованием полива грунтовыми водами. Откачка грунтовых вод, превышающая естественное восстановление их запаса, привела к интрузии морских вод в прибрежные водоносные горизонты, вторичному засолению многих районов равнины, потере от 25 до 50% урожая, разорению многих фермеров и заброшенности земель. С 2005 г. в стране осуществляют программу, направленную на уменьшение засоленности почв и вод [43].

В статье [55] приведены экспериментальные данные по интрузии морских вод в прибрежные водоносные горизонты в Ливане. Активный расход воды из колодцев населением Бейрута в период 2004–2014 гг. привел к увеличению кон-

центрации солей до 10–30 г/л в грунтовых водах в прибрежной полосе до 400 м. В колодцах, расположенных дальше от берега до 2 км, минерализация увеличилась до 1.0–2.0 г/л в 2014 г.

Для условий района Газа в Палестине на основе модели Guo [48] взаимодействия морских и грунтовых вод сделан прогноз интрузии морских вод в прибрежные водоносные горизонты до 0.5 км при условном подъеме уровня моря на 1 м и до 1.0 км при совместном сценарии подъема уровня моря и избыточной откачки грунтовых вод на побережье [41]. Более сложный прогноз на основе похожей модели выполнен для побережья Китая [46].

Некоторые исследователи для оценки интрузии морских вод в прибрежные грунтовые воды используют разные геохимические индексы, основанные либо на соотношении разных ионов, либо на отношении разницы концентрации хлоридов, натрия, сульфатов и магния в исследуемых и пресных водах к разнице концентраций этих ионов в морских и пресных водах [44, 47, 51, 52]. По данным такой информации сделаны выводы о возможном влиянии морских вод на состав грунтовых вод прибрежных регионов в Индии, Корее, Иордании. Вместе с тем более разносторонний анализ химического состава грунтовых вод прибрежных районов между морскими лагунами возле Рио-де-Жанейро продемонстрировал преимущественное влияние на их состав поступления бытовых сточных вод, а не интрузии морских вод [56].

Приведенные примеры демонстрируют реальную опасность развития аналогичных процессов на бывших рисовых системах Крыма в условиях возникших депрессионных воронок грунтовых вод в береговой полосе Сиваша и Каркинитского залива. Одним из возможных решений по защите таких земель является устройство инъекционных экранов в береговой полосе для предотвращения поступления соленых морских вод в прибрежные водоносные горизонты [26].

## ВЫВОДЫ

1. В течение пяти лет после прекращения орошения (2014–2018 гг.) бывших рисовых систем исследованной части Прикаркинитской низменности почвы и грунты в 85–90% случаев оставались незасоленными до глубины 2–3 м.

2. Грунтовые воды под массивами бывших рисовых систем ежегодно понижались с 2015 по 2018 гг. На всех мониторинговых площадках, имеющих высоту дневной поверхности более 2.5 м от уровня Каркинитского залива, грунтовые воды залегали глубже 3 м от поверхности, находясь ниже критического уровня.

3. На более низких (<2.5 м) поверхностях ближе к Черному морю глубина грунтовых вод со-

ставляла в разных местах от 1.8 до 2.8 м, преимущественно находясь выше критического уровня.

4. В засушливом 2017 г. в береговой полосе шириной 1–2 км возникла депрессионная воронка зеркала грунтовых вод, то есть уровень грунтовой воды опустился ниже уровня воды в Черном море. Это привело к появлению гидравлического напора до 0.7–1.0 м со стороны морских вод. В 2018 г. ширина и глубина депрессионной воронки грунтовых вод увеличились. Ширина стала 2–3 км, максимальная глубина депрессионной воронки, то есть гидравлический напор морских вод по отношению к грунтовым водам, в 2018 г. составляла 1.1 м.

5. Понижение грунтовых вод под бывшими рисовыми системами сопровождалось постепенным увеличением минерализации вод. На участках с положительными значениями высоты УГВ вариация их минерализации определялась неоднородностью полувековой промывки исходно засоленных грунтов солонцовых комплексов. На участках с отрицательными значениями высоты УГВ наиболее вероятной причиной является увеличение засоленности вмещающих пород по мере углубления слоя относительно уровня моря.

6. Отмечается начало восстановления засоленности грунтов зоны аэрации в депрессионной воронке на глубине 3.5–4.5 м по увеличению активности ионов натрия и хлорид-ионов, измеренных в пастах с влажностью 50 мас. %, в 2018 г. по сравнению с 2017 г. и увеличению частоты встречи горизонтов зоны аэрации, содержащих скопления мелкокристаллического гипса, во времени.

7. На пятый год после прекращения орошения на чеках с высотой поверхности <2 м от уровня моря появилось слабое засоление в средней и нижней частях почвенного профиля, сопровождающееся наличием хлоридов кальция и магния в поровых растворах и накоплением мучнистых форм гипса.

## БЛАГОДАРНОСТЬ

Авторы благодарят директора Научно-исследовательского института сельского хозяйства Крыма В.С. Паштецкого и директора ООО “Штурм Перекопа” Краснопереконского района Республики Крым А.В. Положий за организационную помощь, а также водителя И.Ю. Бочарова за неоценимую разностороннюю помощь при проведении полевых исследований.

## ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

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.

## КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

## ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

**Рис. S1.** Распределение солей по профилю почв и грунтов зоны аэрации по данным водной вытяжки 1 : 5. Объекты в 2018 г.: А–В – чек 1, высота 1.9 м над ур. м., скв. КР-331; Г–Е – чек 2, высота 2.4 м над ур. м., скв. КР-336; Ж–И – чек 3, высота 3.0 м над ур. м., скв. КР-342; К–М – чек 9, высота 3.7 м над ур. м., скв. КР-347; Н–П – чек 25, высота 5.3 м над ур. м., скв. КР-351; А, Г, Ж, К, Н – двусторонний солевой график; Б, Д, З, Л, О – содержание общей суммы (1) и суммы токсичных солей (2); В, Е, И, М, П – содержание общей токсичной щелочности (3) и токсической щелочности, связанной с натрием (4).

**Рис. S2.** Изменение профильного распределения активности ионов кальция на динамических площадках: А – чек 1, высота 1.9 м над ур. м.; Б – чек 3, высота 3.0 м над ур. м.; В – чек 25, высота 5.3 м над ур. м.; показатели: 1, 3, 5 – медиана, 2, 4, 6 – пределы варьирования в слое; даты: 1, 2 – июль 2015 г.; 3, 4 – июль 2017 г.; 5, 6 – июль 2018 г.

**Рис. S3.** Распределение доли обменного натрия (% от ЕКО) по профилю почв и грунтов зоны аэрации. Объекты в 2018 г.: 1, 2 – чек 1, высота 1.9 м над ур. м.; 3, 4 – чек 2, высота 2.4 м над ур. м.; 5, 6 – чек 3, высота 3.0 м над ур. м.; 7, 8 – чек 9, высота 3.7 м над ур. м.; 9, 10 – чек 25, высота 5.3 м над ур. м.; показатели: 1, 3, 5, 7, 9 – медиана; 2, 4, 6, 8, 10 – пределы варьирования.

**Рис. S4.** Агрозем поверхностно окисленно-глеевый текстурно-дифференцированный аккумулятивно-карбонатный глубокосолончаковатый слабозасоленный гипс-содержащий тяжелосуглинистый на лёссовидных суглинках (Luvis Gypsic Kastanozem (Loamic, Aric, Protosodic, Stagnic) – бывший лугово-каштановый солонец, промытый от солей в течение полувека в условиях ежегодного затопления при выращивании риса, вторично засоленный через пять лет после прекращения орошения; чек 1, высота 1.9 м над ур. м.: А – верхняя часть почвенного профиля (до 45 см); Б – фрагмент горизонтов ВТ<sub>q</sub>ox и ВС<sub>Aq</sub>cs; В – увеличенный фрагмент аккумулятивно-карбонатного горизонта с сеткой белых прожилок мучнистого гипса.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Балюк С.А., Ладних В.Я., Гаврилович Н.Ю., Носоненко А.О., Захарова М.А., Мошник Л.И., Лисняк А.А., Дрозд О.М. Сучасна еволюція зрошуваних ґрунтів: екологічні проблеми та шляхи їх вирішення // Вісник аграрної науки. Київ, 2006. № 6. С. 60–65.
2. Гусев В.П., Колесниченко В.Т. Особенности почвообразования на Северо-Крымской низменности // Известия Крымского отдела Географического общества Союза ССР. 1958. Вып. 5. С. 141–161.
3. Гусев П.Г., Титков А.А. Солевой режим пойменных почв низовой р. Салгира под культурой затопляемого риса // Мелиорация и водное хозяйство. Киев, 1973. Вып. 24. С. 41–48.
4. Дзенс-Литовская Н.Н. О процессе засоления почв в природных условиях степного Крыма // Вестник Ленинградского университета. Сер. биологии, географии и геологии. 1953. № 7. С. 125–136.
5. Дзенс-Литовская Н.Н. Почвы и растительность степного Крыма. Л.: Наука, 1970. 157 с.
6. Дмитриев Е.А. Математическая статистика в почвоведении. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1995. 320 с.
7. Драган Н.А. Почвенные ресурсы Крыма. Симферополь: ДОЛЯ, 2004. 208 с.
8. Кизяков Ю.Е. Физико-химические свойства солонцов Северного Приднестрия, их вариабельность и изменение при длительном последствии различных способов мелиорации // Почвоведение. 1977. № 12. С. 20–30.
9. 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. Харків, 2001. № 3. С. 127–133.
10. 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.
11. 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. Харків, 2002. № 1. С. 144–149.
12. Кизяков Ю.Е., Тронза Г.Е. Состав поглощенных катионов в солонцах луговых Крымского Причерноморья // Вісник Харківського НАУ ім. В.В. Докучаєва. Харків, 2004. № 1. С. 136–141.
13. Кизяков Ю.Е. Солонці та солонцюваті ґрунти // Ґрунтознавство. Київ: Вища освіта, 2005. С. 525–535.
14. Классификация и диагностика почв России. Смоленск: Ойкумена, 2004. 342 с.
15. Клепинин Н.Н. Почвы Крыма. Симферополь: Гос. Изд-во Крым. АССР, 1935. 118 с.
16. Кольцов С.А. Органическое вещество и агрофизическое состояние рисовых почв Крымского Приднестрия. Симферополь: ИТ “АРИАЛ”, 2010. 176 с.
17. Лактионов Б.И., Карпович А.В. Мелиоративная роль культуры затопляемого риса на солонцах юга Украины // Мелиорация солонцов: Тр. Почв. ин-та им. В.В. Докучаева. М., 1967. С. 251–259.
18. Лактионов Б.И., Малеев В.А. Влияние длительного орошения на свойства почв рисовых полей юга Украины и пути повышения их плодородия // Тр. III съезда почвоведов и агрохимиков Украинской ССР. “Мелиорация и охрана почв”. Харьков: Общество почвоведов, 1990. С. 61–63.
19. Наукові основи охорони та раціонального використання зрошуваних земель України / Под ред. Балюка С.А. и др. Киев: Аграрна наука, 2009. 620 с.
20. 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. Бедрицкого А.И. М.: Почв. ин-т им. В.В. Докучаева, 2018. 357 с.
21. Новикова А.В. О мелиорации солонцов Крыма // Вопросы мелиорации солонцов. М: Изд-во АН СССР, 1958. С. 176–192.
  22. Полевой определитель почв России. М.: Почв. ин-т им. В.В. Докучаева, 2008. 182 с.
  23. Половицкий И.Я., Гусев П.Г. Почвы Крыма и повышение их плодородия. Симферополь: Таврия, 1987. 152 с.
  24. Руководство по лабораторным методам исследования ионно-солевого состава нейтральных и щелочных минеральных почв / Составители: Хитров Н.Б., Понизовский А.А. М.: Почв. ин-т им. В.В. Докучаева, 1990. 236 с.
  25. Севастьянов Н.Ф. Почвы Северо-Крымской низменности и их сельскохозяйственное использование // Тр. Украинского научно-исследовательского института почвоведения. Т. IV. Проблемы плодородия почв Украинской ССР. Харьков, 1959. С. 201–241.
  26. Сергеев В.И., Шимко Т.Г., Кулешова М.Л., Степанова Н.Ю. Развитие инъекционного закрепления как основного метода технической мелиорации грунтов // Инженерная геология. 2012. № 4. С. 6–12.
  27. 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.
  28. Титков А.А. Оросительные мелиорации южных степей Украины. Симферополь: ИТ “Ариал”, 2011. 812 с.
  29. Титков А.А., Гусев П.Г. Изменение почвенно-мелиоративных условий Восточного Присивашья под рисом и другими культурами рисового севооборота // Повышение эффективности орошаемого земледелия. Одесса, 1975. С. 49–53.
  30. Титков А.А., Гусев П.Г. Состав и свойства почв рисовых севооборотов в Крымском Присивашье // Почвоведение. 1988. № 12. С. 104–110.
  31. Титков А.А., Кольцов А.В. Влияние орошения затоплением на мелиоративные условия и почвенный покров Присивашья. Симферополь, 1995. 167 с.
  32. Тронза Г.Е. Солевой режим солонцов луговых Крымского Причерноморья, освоенных под культурой риса // Тр. Крымского ГАТУ: Сельскохозяйственные науки. Симферополь, 2002. Вып. 91. С. 242–247.
  33. Тронза Г.Е. Вплив тривалого рисосіяння на фізико-хімічні властивості I сольовий режим солонців лучних зони сухих степів. Дис. ... канд. с.-х. н., Харків, 2008.
  34. 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. Симферополь. 2016. № 3(7). С. 140–154.
  35. Хитров Н.Б., Роговнева Л.В. Изменение засоленности почв и грунтовых вод рисовых систем Присивашской низменности после прекращения орошения // Бюл. Почв. ин-та им. В.В. Докучаева. 2020.
  36. Хубларян М.Г., Фролов А.П., Юшманов И.О. Интрузия морских вод в прибрежные водоносные горизонты // Водные ресурсы. 2008. Т. 35. № 3. С. 288–301.
  37. Чижикина Н.П., Хитров Н.Б., Варламов Е.Б., Чурилин Н.А. Распределение минералов по профилю солонча Присивашья // Таврический вестник аграрной науки. 2017. № 2(10). С. 103–116.
  38. Чижикина Н.П., Хитров Н.Б., Тронза Г.Е., Кольцов С.А., Варламов Е.Б., Четченко Е.С., Чурилин Н.А. Минералогический состав гранулометрических фракций солонцов Северо-Крымской низменности // Почвоведение. 2017. №12. С. 1499–1513. <https://doi.org/10.7868/S0032180X17120061>
  39. Ямнова И.А., Панкова Е.И. Гипсовые новообразования и формирующие их почвообразовательные процессы // Почвоведение. 2013. № 12. С. 1423–1436. <https://doi.org/10.7868/S0032180X13120125>
  40. Янчковский Ю.Ф. Солевой режим на рисовых полях // Гидротехника и мелиорация. 1973. № 9. С. 63–67.
  41. Abdelhamid H.F., Javadi A.A., Qahman K.A. Impact of over-pumping and sea level rise on seawater intrusion in Gaza aquifer (Palestine) // J. Water Climate Change. 2015. V. 06.4. P. 891–902. <https://doi.org/10.2166/wcc.2015.055>
  42. Ahmad M.J., Arif M., Iqbal A., Khalid M., Akhtar N. Chapter 18. Rice Production in Salt-Affected Soils of Pakistan Using Different Reclamation Techniques // Developments in Soil Salinity Assessment and Reclamation: Innovative Thinking and Use of Marginal Soil and Water Resources in Irrigated Agriculture / Eds. Shahid S.A. et al. Springer Science + Business Media Dordrecht. 2013. P. 282–293. [https://doi.org/10.1007/978-94-007-5684-7\\_18](https://doi.org/10.1007/978-94-007-5684-7_18)
  43. Ahmed M., Hussain N., Al-Rawahy S.A. Ch. 17. Management of Saline Lands in Oman: Learning to Live with Salinity // Developments in Soil Salinity Assessment and Reclamation: Innovative Thinking and Use of Marginal Soil and Water Resources in Irrigated Agriculture / Eds. Shahid S.A. et al. Springer Science + Business Media Dordrecht. 2013. P. 265–281. [https://doi.org/10.1007/978-94-007-5684-7\\_17](https://doi.org/10.1007/978-94-007-5684-7_17)
  44. Batayneh A., Zaman H., Zumlot T., Ghrefat H., Mogren S., Nazzal Y., Al-Taani A. Hydrochemical facies and ionic ratios of the coastal groundwater aquifer of Saudi Gulf of Aqaba: implication for seawater intrusion // J. Coastal Res. 2014. V. 293. P. 75–87. <https://doi.org/10.2112/jcoastres-d-13-00021.1>
  45. Byju G., Misra R.S., Nair R.R., Anand M.H., Jeeva M.L., Ravindran C.S. Reclamation of Degraded Vertisols Under Cassava in Arid Environments of India // Developments in Soil Salinity Assessment and Reclamation: Innovative Thinking and Use of Marginal Soil and Water Resources in Irrigated Agriculture / Eds. Shahid S.A. et al. Springer Science + Business Media Dordrecht, 2013. P. 313–326. [https://doi.org/10.1007/978-94-007-5684-7\\_20](https://doi.org/10.1007/978-94-007-5684-7_20)
  46. Chang Y., Hu B.X., Li X. Modeling Seawater Intrusion to Coastal Aquifers in South Coast of Laizhou Bay, China // E3S Web of Conferences. 2018. V. 54. 00004 <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20185400004>
  47. El Moujabber E., Bou Samra M., Darwish B., Atallah T. Comparison of different indicators for groundwater contamination by seawater intrusion on the Lebanese Coast // Water Resources Management. 2006. V. 20. № 2. P. 161–180. <https://doi.org/10.1007/s11269-006-7376-4>

48. Guo Q., Huang J., Zhou Z., Wang J. Experiment and Numerical Simulation of Seawater Intrusion under the Influences of Tidal Fluctuation and Groundwater Exploitation in Coastal Multilayered Aquifers // *Geofluids*. 2019, Article ID 2316271. 17 p. <https://doi.org/10.1155/2019/2316271>
49. 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 № 106. FAO, Rome. 192 p.
50. Jalali V.K., Arora S. Mapping and Monitoring of Salt-Affected Soils Using Remote Sensing and Geographical Information System for the Reclamation of Canal Command Area of Jammu, India // *Developments in Soil Salinity Assessment and Reclamation: Innovative Thinking and Use of Marginal Soil and Water Resources in Irrigated Agriculture* / Eds. Shahid S.A. et al. Springer Science + Business Media Dordrecht. 2013. P. 251–261. [https://doi.org/10.1007/978-94-007-5684-7\\_16](https://doi.org/10.1007/978-94-007-5684-7_16)
51. Lee J.Y., Song S.H. Groundwater chemistry and ionic ratios in a western coastal aquifer of Buan, Korea: implication for seawater intrusion // *Geosciences J*. 2007. V. 11. № 3. P. 259–270.
52. Mondal N.C., Singh V.P., Singh V.S., Saxena V.K. Determining the interaction between groundwater and saline water through groundwater major ions chemistry // *J. Hydrol*. 2010. V. 388. № 1–2. P. 100–111. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2010.04.032>
53. Murtaza G., Ghafoor A., Zia-ur-Rehman M., Qadir M. Chapter 19. Marginal-Quality Water Use as an Ameliorant for Tile-Drained Saline-Sodic Soils in a Rice-Wheat Production System // *Developments in Soil Salinity Assessment and Reclamation: Innovative Thinking and Use of Marginal Soil and Water Resources in Irrigated Agriculture* / Eds. Shahid S.A. et al. Springer Science + Business Media Dordrecht. 2013. P. 295–311. [https://doi.org/10.1007/978-94-007-5684-7\\_19](https://doi.org/10.1007/978-94-007-5684-7_19)
54. Richards L.A. US Salinity Laboratory Staff. Diagnosis and improvement of saline and alkali soils. USDA Agr. Handbook № 60. Washington, 1954. 160 p.
55. Saadeh M., Wakim E. Deterioration of Groundwater in Beirut Due to Seawater Intrusion // *J. Geoscience and Environment Protection*. 2017. V. 5. P. 149–159. <https://doi.org/10.4236/gep.2017.511011>
56. Silva-Filho E.V., Sobral Barcellos R., Emblanch C., Blavoux B., Maria Sella S., Daniel M., Simler R., Cesar Wasserman J. Groundwater chemical characterization of a Rio de Janeiro coastal aquifer, SE-Brazil // *J. South American Earth Sciences*. 2009. V. 27. № 1. P. 100–108. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2008.11.004>
57. Suarez D.L. Use of Marginal-Quality Waters for Sustainable Crop Production // *Developments in Soil Salinity Assessment and Reclamation: Innovative Thinking and Use of Marginal Soil and Water Resources in Irrigated Agriculture* / Eds. Shahid S.A. et al. Springer Science + Business Media Dordrecht, 2013. P. 367–381. [https://doi.org/10.1007/978-94-007-5684-7\\_25](https://doi.org/10.1007/978-94-007-5684-7_25)
58. Swarup A. Sustainable Management of Salt-Affected Soils and Poor-Quality Ground Waters for Enhancing Crop Production // *Developments in Soil Salinity Assessment and Reclamation: Innovative Thinking and Use of Marginal Soil and Water Resources in Irrigated Agriculture* / Eds. Shahid S.A. et al. Springer Science + Business Media Dordrecht. 2013. P. 327–334. [https://doi.org/10.1007/978-94-007-5684-7\\_21](https://doi.org/10.1007/978-94-007-5684-7_21)
59. Werner A.D., Bakker M., Post V.E.A., Vandenbohede A., Lu C., Ataie-Ashtiani B., Simmons C.T., Barry D.A. Seawater Intrusion Processes, Investigation and Management: Recent Advances and Future Challenges // *Advances in Water Resources*. 2013. V. 51. № 1. P. 3–26. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2012.03.004>
60. Yamnova I.A. Salt and gypsum pedofeatures as indicators of soil processes // *Byulleten Pochvennogo instituta im. V.V. Dokuchaeva*. 2016. V. 86. P. 96–102. <https://doi.org/10.19047/0136-1694-2016-86-96-102>

## Five-Year-Long Change of Soil and Sediments Salinity at Rice Growing System in Karkinit Lowland after Irrigation Cease

N. B. Khitrov<sup>1,\*</sup> and L. V. Rogovneva<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Dokuchaev Soil Science Institute, Moscow, 119017 Russia*

\*e-mail: [khitrovn@gmail.com](mailto:khitrovn@gmail.com)

The aim of research was to submit data about salinity status of soils, sediments and ground waters within the irrigated rice growing systems at the Karkinit Lowland in Krasnoperekopskiy district of the Crimea in 2017–2018, 2–5 years after irrigation stopped. The majority of solonchic microcatenas modified into rice pads and irrigated by flooding during half a century became leached of soluble salts to the depth of 3–3.5 m. In 2015–2018, the ground water table dropped every year being deeper than the critical one. Since 2017, a depression cone of ground water table was formed at the seashore with the bottom water drive down to 0.8–1.1 m relative to sea level. Horizons with clusters of fine-grain gypsum crystals occurred more frequently in vadose zone, and weak salinity was restored in the depression cone sediments at the depth of 3.5–4.5 m. The contents of soluble salts exceeded the low boundary of weak salinity criteria in the middle and lower parts of soil profiles in rice pads located less than 2 m above the sea level in the fifth year after irrigation cease. Maximum of soluble salts in the profile is accompanied by appearance of calcium and magnesium chlorides in pore solutions and accumulation of flour-like gypsum varieties.

**Keywords:** sodium ion activity, chloride ion activity, groundwater table, depression cone of groundwater, salt-affected soils, vadose zone