

ГЕНЕЗИС
И ГЕОГРАФИЯ ПОЧВ

УДК 631.48

ДИСТАНЦИОННАЯ ДИАГНОСТИКА СОДЕРЖАНИЯ КАРБОНАТОВ
В ОРОШАЕМЫХ ПОЧВАХ СУХОСТЕПНОЙ ЗОНЫ
ВОЛГОГРАДСКОЙ ОБЛАСТИ¹

© 2021 г. Н. Б. Хитров^а, *, И. Н. Горохова^а, Е. И. Панкова^а

^аПочвенный институт им. В.В. Докучаева, Пыжжевский пер., 7, стр. 2, Москва, 119017 Россия

*e-mail: khitrovnb@gmail.com

Поступила в редакцию 23.07.2020 г.

После доработки 13.10.2020 г.

Принята к публикации 27.10.2020 г.

Представлено пространственное распределение карбонатов кальция (CaCO_3) в поверхностном слое и их профильное распределение в орошаемых почвах двух ключевых участков Светлоярской оросительной системы Волгоградской области. Ключевые участки находятся в разных природных районах сухостепной зоны: на возвышенности Ергени и Прикаспийской низменности. Поля на обоих участках имеют пятнистый рисунок на космических снимках как открытой поверхности почвы, так и растительного покрова. Одной из главных причин пятнистого изображения является разное содержание карбонатов в поверхностном слое почвы. Установлено два механизма появления карбонатов возле поверхности орошаемых почв. Первый – срезка почв выпуклых участков микро- и мезорельефа при планировке полей во время строительства оросительной системы с обнажением карбонатных горизонтов средней части почвенного профиля и перемещением срезанного материала, включающего карбонаты, на соседние ареалы. Второй – восходящее подтягивание почвенных растворов в поверхностный слой с осаждением карбонатов при длительном периоде орошения в сухом жарком климате. Совместное использование данных дистанционного зондирования и наземного полевого обследования почв вдоль трансект, пересекающих ареалы с разной пятнистостью и спектральной яркостью на снимках, позволяет выявлять почвы с разным содержанием карбонатов в пахотном горизонте почв.

Ключевые слова: пятнистость орошаемых полей, космические снимки, содержание карбонатов кальция

DOI: 10.31857/S0032180X21060071

ВВЕДЕНИЕ

Одной из особенностей почвообразования в аридных и семиаридных условиях является аккумуляция карбонатов кальция (CaCO_3). В руководствах по описанию почв ФАО (1979–2015 гг.) выделяется группа слабокарбонатных почв, содержащих от следовых количеств до 2% карбонатов; карбонатные – при аккумуляции CaCO_3 до 15%, далее выделяются почвы средне- (15–25%) и сильнокарбонатные (>25%). Отмечается, что карбонатные почвы создают проблемы для сельскохозяйственного использования. Кальцисоли (Calcisols) (почвы с содержанием карбонатов >15%) отличаются низким содержанием органического вещества и доступного азота. Высокие значения pH создают условия, ограничивающие подвижность и доступность для растений соединений фосфора из-за образования нерастворимо-

го фосфата кальция. Чем мельче кристаллы карбонатов, тем активнее они влияют на свойства почвы. Наиболее активная фракция карбонатов размером ≤ 0.02 мм. При содержании CaCO_3 до 10–15% считается, что они положительно влияют на свойства почв: способствуют образованию стабильных крупнопористых агрегатов, улучшают водно-физические свойства. При увеличении содержания CaCO_3 до 25% карбонаты могут оседать в порах, снижая водопроницаемость почв. При содержании карбонатов >25% в почвах увеличивается плотность (до 1.6 г/см³ и больше); при высыхании орошаемых карбонатных почв образуется плотная корка. Карбонатные горизонты, даже оставаясь проницаемыми для воды, могут препятствовать росту корней [36].

Донер, Линн [27] выделили основные источники и механизмы поступления карбонатов в почвы: 1) наследование от материнской породы; 2) осаждение из растворов, образованных в резуль-

¹ К статье имеются дополнительные материалы.

тате выветривания содержащих кальций минералов; 3) осаждение карбонатов, вызванное увеличением концентрации Ca^{2+} при дегазации за счет эмиссии CO_2 ; 4) отложение карбонатной пыли на поверхность почвы с последующим перемещением карбонатов вглубь профиля в составе растворов; 5) осаждение в результате объединения Ca^{2+} , поступающего с атмосферными осадками, с HCO_3^- , находящимся в составе почвенных растворов; 6) приток с грунтовыми водами.

Наиболее широко распространено явление, когда аккумуляция CaCO_3 обусловлена притоком их с грунтовыми водами [10, 14, 22]. По мнению Ковды [15], обилие и разнообразие карбонатных новообразований зависит от характера почвообразующих пород и карбонатов больше в почвах, сформированных на лёссовидных отложениях, чем на глинистых, за исключением почв гильгаинового комплекса. Кроме того, карбонатные новообразования (нодулы) могут отличаться разновременностью формирования в почвах единого почвенного комплекса.

В зарубежной литературе одни ученые объясняют присутствие карбонатов переотложением их в качестве материала, сформированного вне данного почвенного профиля [35]. Другие считают, что источниками карбоната и гипса в аридных почвах являются атмосферные выпадения в виде пыли или карбоната, растворенного в дождевой воде [29, 31]. Есть работы, где отмечается, что в формировании горизонтов *calcic* и *gypsic* участвуют биологические процессы, когда за счет минерализации мертвого растительного материала в почву вносится значительное количество карбонатов и гипса [30]. Амит, Харрисон [24] показали, что кальциевые горизонты почв Израиля часто связаны с волокнистой структурой некоторых грибов, приносящих кальций в почву при отмирании.

Карбонатные почвы с содержанием $\text{CaCO}_3 > 15\%$ (*calcareous soils*) встречаются во многих странах с засушливым климатом [25].

Каври [33] подчеркивает, что основными проблемами землепользования в Ближневосточном регионе являются: образование поверхностной корки, цементация горизонтов, низкая доступность фосфора, нарушение калиевого и магниевого питания растений, низкая доступность микроэлементов. В статье Диксона [28] дается характеристика почв аридных условий и отмечается, что увеличению концентрации карбонатов и гипса сопутствует уплотнение почв и формирование горизонтов *petrocalcic* и *petrogypsic*.

Впервые подробно процесс ирригационного окарбонирования почв в сухостепной зоне России описан Барановской и Азовцевым [1, 2]. По результатам их исследований, практически за 40-летний период орошения произошло накопле-

ние массы карбонатов более чем в 3 раза в верхнем 0.5 м слое. Причем происходило это независимо от глубины залегания грунтовых вод и при промыве легкорастворимых солей на значительную глубину. По мнению авторов, своеобразный ритм миграции CaCO_3 в профиле обеспечивает ему устойчивость к выщелачиванию. При этом они не исключают частичный приток CaCO_3 с поливными водами (из р. Волги), хотя они являются пресными гидрокарбонатно-кальциевого состава.

Ву с соавт. [37] также считают возможным поступление карбонатов в почвы вместе с поливной водой в орошаемых районах Калифорнии. де Сало с соавт. [26] исследовали распределение карбонатов по гранулометрическим фракциям в пахотном слое (0–20 см) орошаемых сельскохозяйственных угодий Наварры (Испания). В результате эксперимента выяснили, что в песчаной фракции почв количество карбонатов систематически уменьшается, и стабилизировать их количество удается только за счет внесения удобрений и глубокой вспашки.

Процесс подтягивания карбонатов в пахотных почвах сухостепной зоны России отмечался многими исследователями [1, 6, 17, 18]. Считается, что значительное поступление карбонатного материала в почвы происходит в результате распашки и орошения земель, которые помимо положительного влияния создают многочисленные проблемы при сельскохозяйственном использовании земель. Так, большое содержание карбонатов в корнеобитаемом слое каштановых почв, карбонатных черноземах и особенно в почвах, сформированных на продуктах выветривания известняков и мергелей, вызывает нарушение минерального питания виноградников, что выражается в заболевании их хлорозом [20]. Ларби с соавт. [34] напротив, отмечают положительное влияние карбонатов в почвах на произрастание оливковых растений в прибрежных средиземноморских засоленных землях.

Таким образом, причины появления и механизмы распределения карбонатов в почвах зависят от их наличия в почвообразующих породах, зонального и регионального характера почвообразовательных процессов, антропогенного воздействия на почвы, типа использования земель и возделываемых культур, поэтому изучение карбонатных почв должно проводиться с учетом особенностей каждой территории.

Волгоградская область – важный район орошаемого земледелия в России. Орошение на территории области началось еще в конце XIX в., пик ирригационного освоения отмечался во второй половине XX в. В 1989 г. в орошение было вовлечено 345.2 тыс. га [19], к началу 2018 г. – 180.7 тыс. га [4].

Одним из этапов создания оросительных систем под использование поверхностных способов полива являлась планировка территории. Это ан-

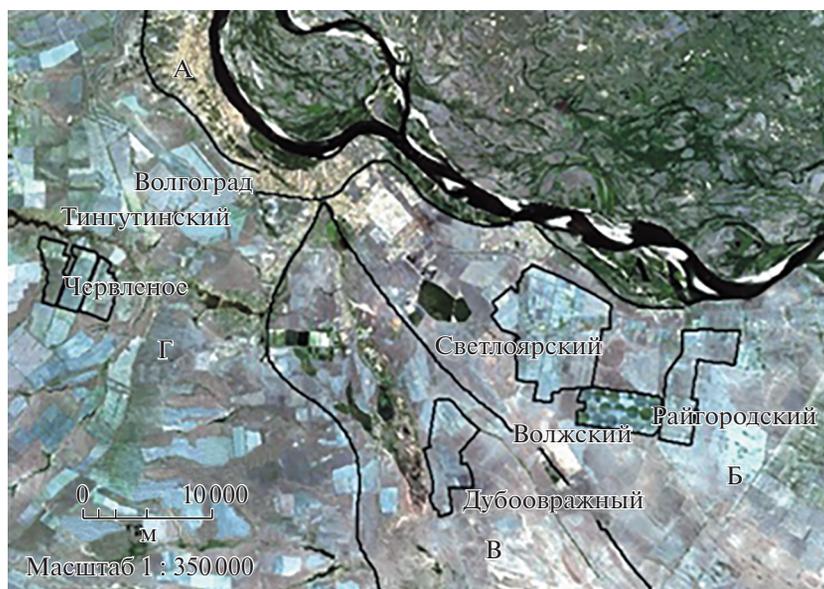


Рис. 1. Природные районы и участки орошения Светлоярской оросительной системы на фоне RGB-снимка Landsat 8 OLI (19.06.2015): А – долина Волги, Б – северная Сарпинская низменная равнина, В – Сарпинская ложбина, Г – северная часть Ергенинской возвышенности (районирование по [9]).

тропический фактор воздействия на почвы при орошении, который чаще всего отсутствует при богарном использовании земель. Повышения микро- и мезорельефа срезают, а понижения заполняют материалом срезанных почв. Неоднородность почвенного покрова резко возрастает после строительных планировок. По данным [16] насыпные слои новых почв могут представлять собой смесь материалов 2–16 генетических горизонтов исходных почв в самых произвольных соотношениях. Новые почвы коренным образом отличаются по строению и свойствам от исходных и представляют собой почвы с особенно сложными профилями.

Поскольку на Светлоярской оросительной системе (ОС) в 1950–1960 гг. проектировалось использовать поверхностные способы полива, при строительстве была выполнена планировка всех участков. Значительная часть выпуклых элементов мезорельефа была срезана, в результате карбонатный горизонт почвенного профиля оказался расположенным ближе к поверхности. О таком явлении упоминалось в работах Зимовца [11] по Кисловской ОС, а позже было отмечено, что поверхностно-карбонатные почвы выделяются на дистанционных материалах Светлоярской ОС [5, 6].

Цель исследования – определить количество и распределение карбонатов (CaCO_3) в почвенном профиле орошаемых почв сухостепной зоны Волгоградской области на примере двух орошаемых участков Светлоярской ОС, находящихся в разных природных районах, и увязать распростране-

ние поверхностно-окарбончатых почв с изображением на космических снимках.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Объектом изучения стали два участка орошения Светлоярской ОС в Волгоградской области, расположенные в разных природных районах. Орошаемый участок (ОУ) Чervlenoe расположен на севере возвышенности Ергени, а Светлоярский ОУ – на Северной Сарпинской низменной равнине (рис. 1).

Представим природные особенности районов исследования и состояние участков орошения в настоящее время.

Ергенинская возвышенность, служащая водоразделом Черного и Каспийского морей, в Волгоградскую область заходит северной частью. Возвышенность Ергени с поверхности покрыта толщей скифских красноцветных пород и лёссовидных суглинков мощностью до 40–60 м, но выходы красноцветных (морских) пород встречаются лишь в самых глубоких балках. Отметки поверхности здесь не превышают 150–180 м, преобладают волнистые водоразделы и плавные склоны речных долин и балок. Грунтовые воды залегают на глубине 30–40 м, но в балках глубина их уменьшается до 1 м.

Для территории Ергенинской возвышенности характерны ландшафты сухостепной зоны. Светло-каштановые почвы сформировались в основном на лёссовидных суглинках и глинах. Среди светло-каштановых почв доминируют солонцеватые разновидности, площадь их распространения

значительно превышает площадь других почв. Несолонцеватые светло-каштановые почвы встречаются редко. Солонцы составляют до 50% площади и более, пестроту почвенного покрова дополняют лугово-, луговато-каштановые почвы потяжин и блюдцеобразных западин [8].

ОУ Червленое находится на северном склоне возвышенности Ергени, недалеко от Волго-Донского канала. До орошения на светло-каштановых почвах глубина вскипания от НСІ колебалась от 29 до 46 см, в среднем составляла 38 см, выделения карбонатов наблюдались на глубине 39–60 см, в среднем 49 см [8]. В настоящее время вскипание почв часто отмечается с поверхности.

Участок орошался и орошается водами из Волго-Донского канала. Первоначально орошение проводилось поверхностным способом, начиная с 2000-х годов применяется полив дождеванием. В настоящее время орошается группа полей, остальная часть массива используется под богарное земледелие.

Уровень грунтовых вод (**УГВ**) в начале 90-х годов прошлого столетия на ОУ Червленое доходил до критических значений 3–2.5 м, а на отдельных участках достигал 1.5–2 м. Это привело к вторичному засолению почв на значительной площади массива. Динамика вторичного засоления почв и осолонцевание почв на ОУ Червленое рассмотрено ранее [7]. С середины 1990-х годов массив не орошался, а в 2000-х годах началось постепенное использование отдельных полей. В настоящее время УГВ залегает на глубине более 5 м.

Светлоярский ОУ расположен на Северной Сарпинской низменной равнине Прикаспийской низменности. Северная Сарпинская низменная равнина – это морская равнина раннехвалынской трансгрессии, которая заключена в треугольнике между Волгой и Сарпинской ложбиной. Абсолютная высота колеблется от 50–40 м на севере до 30–15 м в центральной части района. В целом район слабо дренирован. Общий тип ландшафта – суглинистая комплексная равнина, на фоне которой выделяются полосы лиманных и палинных лугов по ложбинам. Увлажнение поверхностными водами скудное и крайне неравномерное. Оно лишь изредка осуществляется за счет ливневых осадков, а основной источник – талые снеговые воды. Почвы – светло-каштановые солонцеватые, в комплексе с солонцами (25–50 и >50%). В депрессиях почвы лугово-степные и луговые, в разной степени опресненные [9].

Почвообразующие породы Сарпинской низменной равнины – это осадки Хвалынского моря, представленные глинами, суглинками с повышенной концентрацией легкорастворимых солей, подстилаемые сильнозасоленными шоколадными глинами. При более близком залегании шоколадных глин они являются почвообразующими породами.

Выровненный рельеф, в сочетании с плохой водопроницаемостью шоколадных глин, определяют относительно высокий естественный УГВ: 7–10 м, иногда 5–7 м, в понижениях 1–3 м, с минерализацией от 1–3 до 5–10 и 10–15 г/л. Воды хлоридно-натриевые и хлоридно-сульфатно-натриево-магниевые [8].

Светлоярский ОУ в период строительства оросительной системы прошел жесткую планировку. В бывших светло-каштановых почвах глубина вскипания от НСІ варьировала от 18 до 30 см. В настоящее время такие почвы вскипают с поверхности, за счет наличия дисперсных карбонатов по всему профилю.

Участок орошается водами р. Волги гидрокарбонатно-кальциевого состава. Орошение проводится капельным способом и дождеванием, но на отдельных полях сохранился поверхностный полив. УГВ на данном участке не поднимался выше 3 м на протяжении всего периода эксплуатации массива. В настоящее время УГВ около 10 лет составляет более 5 м.

Методы исследований: использование космической информации и современных приемов ее обработки, включая статистические; полевые исследования почв, лабораторные методы определения CaCO_3 в профиле почв.

Полевые исследования проводили в августе 2017 и 2019 гг. на ОУ Червленое и в июне–июле 2015–2016 гг. на Светлоярском ОУ. На ОУ Червленое сделано 38 (2017 г.) и 19 (2019 г.) почвенных прикопок глубиной 50–60 см, углубленных бурением до 100 см, отобрано более 300 образцов. На Светлоярском ОУ сделано 28 аналогичных точек опробования на глубину 0–100 и 0–200 см и отобрано 168 образцов. Дополнительно было взято по трансектам (1Т, 3Т) 77 образцов на глубину 0–25 см (рис. 2).

Название почв давали по трем классификациям: СССР [13] (далее К-1977), России [12, 21] (далее РК-2004(8)) и международной WRB [32] (далее WRB-2014). Содержание карбонатов определяли ацидометрически по Козловскому с пересчетом CO_2 карбонатов в CaCO_3 [23].

Построение интерполяционных карт и двумерных профилей распределения карбонатов в почве выполняли в пакете программ Surfer-13 методом интерполяции kriging, учитывая координаты на местности и анизотропию расположения точек по вертикали и горизонтали. Классификацию космического изображения проводили в программе ENVI 5.1 классификатором ISODATA.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В настоящей статье рассматривается пятнистость полей, вызванная окарбоначиванием орошаемых почв. Такая пятнистость не зависит от

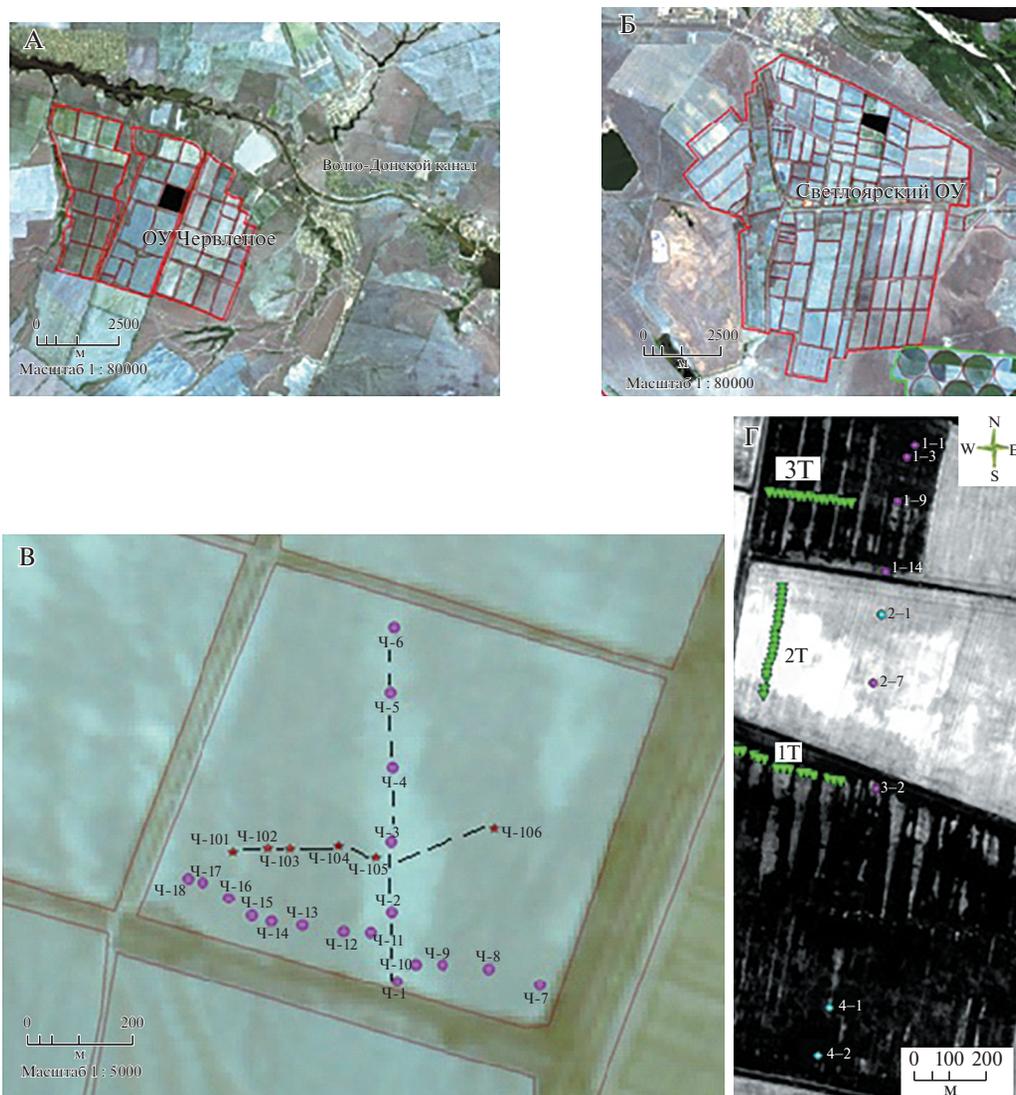


Рис. 2. Орошаемые участки Червленое (А, В) и Светлойрский (Б, Г), ключевые участки полевых исследований (черные четырехугольники); В, Г – трансекты и точки отбора почвенных образцов на ключевых участках в 2015–2019 гг. на фоне (В) космических снимков высокого разрешения RGB Канопус-В (август, 2015) и (Г) панхром Pleiades (20.05.2015).

УГВ. Пятна хорошо проявляются на космических снимках с открытой поверхностью почвы, а также на полях под пологом озимых зерновых культур. Они достигают размеров 10–20 тыс. м².

На полях с люцерной на поверхностно-окarbonаченных почвах из-за недостатка влаги возникают выпадения культуры площадью до 2–3 тыс. м². Аккумуляция дисперсных карбонатов возле поверхности способствует образованию корки на отдельных участках. При поверхностном способе полива вода обтекает такие участки за счет большей плотности пахотного слоя и чуть приподнятой поверхности. В результате покров люцерны становится сильно изреженным.

Мелиоративные мероприятия, выполненные при строительстве Светлойрской ОС, такие как срезка повышенный микро- и мезорельефа на глу-

бину 30–70 см и насыпка в понижения срезанного материала мощностью 20–30 см, гипсование солонцов, плантажная вспашка (40–45 см), последующая ежегодная вспашка (25–30 см) и орошение в течение 60 лет существенно изменили почвенный покров, в том числе перераспределение карбонатов в почвах.

Встречается два варианта формирования карбонатного профиля. В первом из них вторичное окarbonачивание поверхностных горизонтов происходит за счет восходящего подтягивания почвенных растворов к поверхности в корнеобитаемый слой. Второй вариант окarbonачивания почв – срезка гумусового горизонта с последующей насыпкой смеси разных горизонтов во время производства планировки полей. Насыпанный материал обычно становится карбонатным. В некоторых случа-

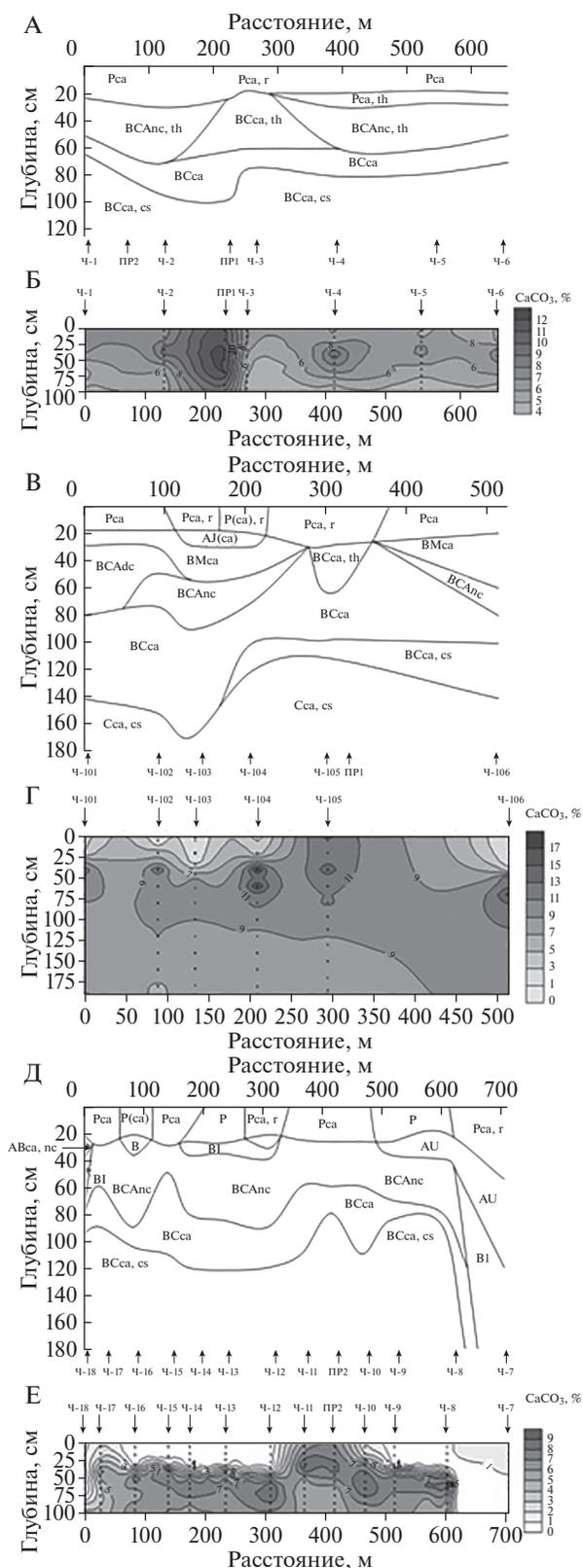


Рис. 3. Строение почвенных комбинаций (А, В, Д) и двумерное распределение количества CaCO_3 в почвах (Б, Г, Е) вдоль трех трансект ключевого участка Червлёное с точками Ч-1...Ч-6 (А, Б), Ч-101...Ч-106 (В, Г), Ч-7...Ч-18 (Д, Е); индексация горизонтов по РК-2004(8)). ПР1 и ПР2 – точки пересечения трансект.

ях при планировке была срезана большая часть почвенного профиля почв, включая горизонт с белоглазкой (BCAnc).

Срезка повышенных участков почв, помимо выравнивания поверхности, была направлена на удаление солонцовых горизонтов у корковых и мелких солонцов, которые занимали, как правило, повышенные формы микро- и мезорельефа. В результате солонцы на орошаемых полях практически не встречаются, иногда встречаются фрагменты солонцовых горизонтов.

Ключевой участок на ОУ Червлёное Светлярской ОС имеет пятнисто-полосчатый рисунок на космическом снимке (рис. 2). Рассмотрим строение почвенного покрова и современное распределение карбонатов в нем по трем трансектам: одной вдоль светлого сильно вытянутого пятна и двум поперечным к нему (рис. 3).

Наземные исследования ключевого участка Червлёное. По результатам обследования 24 разрезов, расположенных тремя трансектами, на поле ОУ Червлёное не обнаружены солонцы. Согласно классификации К-1977, на участке вскрыты светло-каштановые пахотные карбонатные солонцеватые и несолонцеватые солончаковатые и глубокосолончаковатые среднесуглинистые почвы на лёссовидных суглинках, луговато-каштановые и лугово-каштановые почвы пахотные не вскипающие с поверхности и с насыпанным карбонатным пахотным горизонтом. По субстантивным классификациям те же почвы представляются более разнообразными (рис. 3, табл. 1).

В семи из девяти точек опробования (разр. Ч-1, Ч-2, Ч-4, Ч-5, Ч-6, Ч-10, Ч-11), расположенных в пределах вытянутого широкого светлого пятна на космическом снимке, строение почвенного профиля однотипное: Pca–BCAnc,th–BCca–BCca,cs. Почва – агрозем аккумулятивно-карбонатный сегрегационный солонцеватый солончаковатый гипсодержащий среднесуглинистый на лёссовидных суглинках, или по WRB-2014 Luvic Gypsic Kastanozem (Loamic, Aric, Densic, Endoprotosalic, Sodic). Пахотный горизонт Pca с дисперсными карбонатами, пропитывающими его целиком, имеет мощность от 23 до 31 см (в среднем 27 см) и обычно разделен на две части: верхнюю P1ca мощностью 12–20 см (в среднем 18 см) и нижнюю P2ca мощностью 6–11 см (в среднем 9.5 см). Под ним непосредственно начинается аккумулятивно-карбонатный горизонт BCAnc,th с белоглазкой и бурыми и серовато-бурыми гумусово-глинистыми кутанами на вертикальных гранях призматических отдельных высшейей порядка, сбранных из ореховато-призматических агрегатов. Нижняя его граница залегает на глубине 50–70 см (в среднем 58 см). Глубже горизонта BCAnc,th расположен переходный к породе горизонт BCca с дисперсными карбонатами, не содер-

жащий карбонатных новообразований, а в нижней его части с глубины 63–110 см (в среднем 86 см) наблюдаются прожилки и скопления мелкокристаллического гипса (ВСса,с).

Наличие хорошо выраженных кутан (признак th) свидетельствует об активном иллювиировании илистого вещества в щелочных условиях, что позволяет утверждать о развитии солонцового процесса, по крайней мере, в период орошения почв. Следует отметить, что гумусово-глинистые кутаны наблюдались и в нижней части пахотного горизонта P2ca,th в разр. Ч-4, Ч-5 и Ч-6, расположенных в северной половине вытянутого светлого пятна. Это означает, что солонцовый процесс сохраняется в современных условиях. Здесь (в P2ca) в разр. Ч-5 и Ч-6 встречались сохранившиеся редкие мелкие (до 1–2 см) фрагменты солонцового горизонта.

Сочетание морфологических признаков строения профиля, включающее резкую границу между Pca и ВСAnc,th, наличие редких фрагментов солонцового горизонта в нижней части пахотного слоя, расположение нижней границы горизонта ВСAnc на 20–30 см выше по сравнению с таковой в профилях солонцов, позволяет утверждать, что светлая полоса на космическом снимке соответствует ареалу срезанных почв во время строительной планировки поля перед началом орошения.

В пользу этого утверждения свидетельствуют и два других разреза (Ч-3 и Ч-105), расположенных в центре рассматриваемого светлого пятна. В них профиль почвы еще проще: Pca–ВСса,th–ВСса,с. Мощность пахотного горизонта на краю пятна (разр. Ч-105) равна 30 см, в центре полосы (разр. Ч-3) – всего 18 см. Аккумулятивно-карбонатный горизонт ВСА отсутствует полностью. Непосредственно под горизонтом Pca залегает преобразованная часть переходного горизонта к породе ВСса,th, в которой на боковых гранях призматических отдельностей обнаружены хорошо выраженные гумусово-глинистые кутаны. Следовательно, почвенный профиль был срезан до горизонта ВС. Название почв по РК-2004(8) – агрозем солонцоватый карбонатный глубокосолончаковый гипсосодержащий среднесуглинистый на лёссовидных суглинках, или по WRB-2014 – Calcaric Protosodic Cambisol (Loamic, Aric, Ochric).

До планировки на месте светлого вытянутого пятна на космическом снимке был комплекс солонцов каштановых и светло-каштановых солонцеватых почв.

На поперечной трансекте по центральной диагонали поля (разр. Ч-101–Ч-106) в терминах РК-2004(8) в каждой точке опробования отмечались особенности строения почвенного профиля.

Основные различия между почвами наблюдаются в верхней части почвенного профиля. В первых, агрогумусовый (пахотный) горизонт Р в

пяти из шести разрезов имел сплошное бурное вскипание от HCl (индекс са), а в одном – локальное (индекс са в круглых скобках).

Во-вторых, этот же горизонт Р в трех разрезах (Ч-103...Ч-105) имел признаки частично или полностью насыпанного материала (индекс г – стратифицированный), подвергавшегося ежегодному перемешиванию вспашкой в течение почти 60 лет. Это следует из соотнесения свойств горизонта Р с нижележащими горизонтами АJ(са) или ВСса.

В-третьих, почвенный профиль разр. Ч-105 срезан при строительной планировке – сразу под горизонтом Pca,г обнаружен переходный к почвообразующей породе горизонт ВСса.

В-четвертых, два разреза (Ч-103 и Ч-104) вскрыли бывшую луговато-каштановую почву ложбины, засыпанную сверху при строительной планировке поверхности поля. Под горизонтом Pca,г или P(са),г найден светлогумусовый горизонт АJ(са), имеющий не сплошное, а локальное вскипание от HCl, ниже которого расположены структурно-метаморфический горизонт ВМса с пропиткой дисперсными карбонатами и аккумулятивно-карбонатный горизонт ВСAnc с белоглазкой (индекс пс – сегрегационные карбонаты).

В-пятых, в разр. Ч-101, Ч-102 и Ч-106 в средней части почвенного профиля наблюдались вариации карбонатных новообразований. В разр. Ч-106 под структурно-метаморфическим горизонтом ВМса сразу начинался аккумулятивно-карбонатный горизонт ВСAnc с белоглазкой. В разр. Ч-102 между ними вклинился аккумулятивно-карбонатный горизонт ВСAdc с диффузными пятнами карбонатов при отсутствии более компактно сегрегированных форм. А в разр. Ч-101 совсем не обнаружена сегрегация карбонатов в виде белоглазки, но ближе к поверхности в горизонте ВМса наблюдались несколько прерывистых горизонтальных вытянутых на 10–15 см и узких (0.5–1.5 см) неровных светлых полосок карбонатов. Очевидно, это результат гидрогенного накопления карбонатов при высоком УГВ.

Нижняя часть профиля постепенного перехода к почвообразующей породе (лёссовидным суглинкам) всех точек опробования имеет общие черты: горизонты ВСса и Сса,с. Наблюдалась лишь вариация глубины проявления признаков и обилия скоплений мелкокристаллического гипса. В частности, глубина верхней границы появления гипсовых скоплений изменялась от 100 до 168 см, что в названии почв отмечено, как “глубокогипсосодержащие”. Карбонатные новообразования в этих горизонтах не зафиксированы.

Другая поперечная трансекта (рис. 3, Д), расположенная в северной, самой возвышенной части поля, расположенном на пологом склоне, вскрыла более контрастные изменения почв. На четы-

Таблица 1. Названия почв ключевого участка по трем классификациям. Все почвы среднесуглинистые на лёссовидных суглинках

Разрез	К-1977	Формула профиля	PK-2004(8)	WRB-2014
Ч-1, Ч-2	Светло-каштановая пахотная карбонатная солонцеватая солончаковатая высокозагипсованная	$P_{ca}-BC_{anc,th}-BC_{ca}-C_{ca},cs$	Агрозем аккумулятивно-карбонатный сегрегационный солонцеватый солончаковатый гипссодержащий	Luvic Gypsic Kastanozem (Loamic, Aric, Densic, Endoprotosalic, Sodic)
Ч-3	Светло-каштановая карбонатная солонцеватая пахотная высокозагипсованная	$P_{ca,r}-BC_{ca,th}-BC_{ca}-C_{ca},cs$	Агрозем солонцеватый гипссодержащий	Calcaric Protosodic Cambisol (Loamic, Aric, Ochric, Bathyprotosalic)
Ч-4, Ч-5, Ч-6	Светло-каштановая пахотная карбонатная солонцеватая солончаковатая высокозагипсованная	$P1_{ca}-P2_{ca,th}-BC_{anc,th}-BC_{ca}-C_{ca},cs$	Агрозем аккумулятивно-карбонатный сегрегационный солонцеватый солончаковатый гипссодержащий	Luvic Gypsic Kastanozem (Loamic, Aric, Densic, Endoprotosalic, Sodic)
Ч-7	Лугово-каштановая с насыпанным карбонатным слоем	$P_{ca,r}-AU-BI$	Агростратозем светлогумусовый на погребенной темногумусовой глинисто-иллювиальной почве	Calcaric Luvic Phaeozem (Loamic, Aric, Densic, Novic)
Ч-8	Лугово-каштановая пахотная глубокосолончаковатая	$P-AU-BC_{anc}$	Агро-темно-каштановая сегрегационная гипссодержащая глубококвизиглееватая	Gypsic Kastanozem (Loamic, Aric, Protosodic, Bathyprotosalic)
Ч-9	Лугово-каштановая пахотная солончаковатая	$P-AU-BC_{anc}$	Агро-темно-каштановая сегрегационная гипссодержащая глубококвизиглееватая	Gypsic Kastanozem (Loamic, Aric, Endoprotosalic, Protosodic)
Ч-10, Ч-11	Светло-каштановая карбонатная солонцеватая пахотная солончаковатая	$P_{ca}-BC_{anc,th}-BC_{ca}-C_{ca},cs$	Агрозем аккумулятивно-карбонатный сегрегационный солонцеватый глубоко ипссодержащий	Luvic Kastanozem (Loamic, Aric, Densic, Endoprotosalic, Sodic, Bathygyptic)
Ч-12	Луговато-каштановая слабовыщелоченная с насыпанным пахотным карбонатным слоем глубокосолончаковатая	$P_{ca,r}-AJ-BI-BC_{anc}-BC_{ca}-C_{ca},cs$	Агросветло-гумусовая глинисто-иллювиальная карбонатно-стратифицированная глубокосолончаковатая	Luvic Kastanozem (Loamic, Aric, Novic, Protosodic, Bathyprotosalic)
Ч-13	Луговато-каштановая пахотная глубокосолончаковатая	$P-BI-BC_{anc}-BC_{ca}-C_{ca},cs$	Агрозем глинисто-иллювиальный сегрегационно-карбонатный глубокосолончаковатый	Luvic Kastanozem (Loamic, Aric, Protosodic, Bathyprotosalic)
Ч-14	Луговато-каштановая пахотная с насыпанным карбонатным горизонтом глубокосолончаковатая	$P1_{ca}-P2-BI-BC_{anc}-BC_{ca}-C_{ca},cs$	Агрозем глинисто-иллювиальный карбонатно-стратифицированный сегрегационно-карбонатный глубокосолончаковатый	Luvic Kastanozem (Loamic, Aric, Novic, Protosodic, Bathyprotosalic)
Ч-15	Светло-каштановая пахотная глубокосолончаковатая	$P_{ca}-BC_{anc}-BC_{ca}-C_{ca},cs$	Агрозем аккумулятивно-карбонатный уплотненный глубокосолончаковатый	Haplic Kastanozem (Loamic, Aric, Densic, Bathyprotosalic)

Таблица 1. Окончание

Разрез	К-1977	Формула профиля	РК-2004(8)	WRB-2014
Ч-16	Луговато-каштановая вторично окарбоначенная глубокосолончаковатая пахотная	$P(ca) - VI - BC_{Anc} - BC_{Ca} - C_{Ca}, cs$	Агрозем глинисто-иллювиальный сегрегационно-карбонатный глубокосолончаковатый	Luvic Kastanozem (Loamic, Aric, Bathyprotosalic)
Ч-17	Светло-каштановая карбонатная пахотная солончаковатая	$P_{Ca} - BC_{Anc} - BC_{Ca} - C_{Ca}, cs$	Агрозем аккумулятивно-карбонатный сегрегационный солончаковатый гипсодержащий	Gypsic Kastanozem (Loamic, Aric, Endoprotosalic, Protosodic)
Ч-18	Луговато-каштановая вторично окарбоначенная пахотная солончаковатая	$P_{Ca} - AB_{Ca}, nc - VI - BC_{Anc} - BC_{Ca} - C_{Ca}, cs$	Агрозем карбонатный глинисто-иллювиальный солончаковатый	Luvic Gypsic Kastanozem (Loamic, Aric, Novic, Endoprotosalic)
Ч-101	Светло-каштановая пахотная карбонатная солончаковатая	$P_{Ca} - BM_{Ca} - BC_{Adc} - BC_{Ca} - C_{Ca}, cs$	Агрозем аккумулятивно-карбонатный дисперсно-карбонатный солончаковатый глубокогипсодержащий	Haplic Kastanozem (Loamic, Aric, Protosalic, Sodic)
Ч-102	Светло-каштановая пахотная карбонатная солончаковатая	$P_{Ca} - BM_{Ca} - BC_{Adc} - BC_{Anc} - BC_{Ca} - C_{Ca}, cs$	Агрозем аккумулятивно-карбонатный сегрегационный солончаковатый глубокогипсодержащий	Haplic Kastanozem (Loamic, Aric, Protosalic, Sodic)
Ч-103	Светло-каштановая пахотная с насыпанным слоем глубокосолончаковатая	$P_{Ca}, r - AJ(ca) - BM_{Ca} - BC_{Anc} - BC_{Ca} - C_{Ca}, cs$	Агросветлогумусовая аккумулятивно-карбонатная сегрегационная стратифицированная глубокосолончаковатая глубокогипсодержащая почва	Haplic Kastanozem (Loamic, Aric, Protosalic, Protosodic)
Ч-104	Светло-каштановая пахотная с насыпанным слоем солончаковатая	$P(ca), r - AJ(ca) - BM_{Ca} - BC_{Anc} - BC_{Ca} - C_{Ca}, cs$	Агросветлогумусовая аккумулятивно-карбонатная сегрегационная стратифицированная солончаковатая глубокогипсодержащая почва	Calcic Kastanozem (Loamic, Aric, Protosalic, Sodic)
Ч-105	Светло-каштановая карбонатная солонцеватая пахотная высокозагипсованная среднесуглинистая на лёссовидных суглинках	$P_{Ca}, r - BC_{Ca}, th - BC_{Ca} - C_{Ca}, cs$	Агрозем карбонатный солонцеватый глубокосолончаковатый глубокогипсодержащий	Calcaric Protosodic Cambisol (Loamic, Aric, Ochric, Bathyprotosalic)
Ч-106	Светло-каштановая пахотная карбонатная солончаковатая	$P_{Ca} - BM_{Ca} - BC_{Anc} - BC_{Ca} - C_{Ca}, cs$	Агрозем аккумулятивно-карбонатный сегрегационный солончаковатый глубокогипсодержащий	Calcic Kastanozem (Loamic, Aric, Protosalic, Sodic)

рех отрезках обнаружены луговато- и лугово-каштановые почвы с выщелоченным от карбонатов срединным горизонтом, который по РК-2004(8) соответствует глинисто-иллювиальному горизонту VI. В пределах этих ареалов пахотные гори-

зонты качественно отличаются по вскипанию от HCl. В разр. Ч-13 вскипание отсутствует в горизонте P. В разр. Ч-14 верхняя часть пахотного горизонт P1ca содержит дисперсные карбонаты, а нижняя P2 не имеет вскипания от HCl. В разр. Ч-16 по

всему пахотному горизонту P(ca) наблюдается только локальное вскипание. В разр. Ч-18, наоборот, пахотный горизонт полностью имеет бурное вскипание от HCl. Эти почвы чередуются с ареалами агроземов аккумулятивно-карбонатных, имеющих сплошное вскипание от HCl по всему профилю.

Согласно международной классификации WRB-2014 (update 2015), большинство почв участка относятся к реферативной почвенной группе Kastanozems, два разреза — к Cambisols, один — к Rhaeozems. Группа Kastanozems диагностирована по сочетанию горизонта mollic и карбонатного горизонта с белоглазкой (protocalcic properties). Горизонт mollic соответствуют пахотные горизонты, содержащие 1.4–1.6% гумуса ($C_{орг}$ 0.8–0.9%).

Наличие пахотного горизонта P во всех почвах является критерием использования классификатора Agic, а наличие хорошо выраженных гумусово-глинистых кутан на боковых гранях агрегатов — классификатора Luvis. Все почвы средне- и тяжелосуглинистые, что соответствует классификатору Loamic. Наличие насыпанного материала в разрезах позволяет применить классификатор Novic. Содержание обменного натрия более 15% от емкости катионного обмена в засоленных горизонтах в пределах первого метра является основанием для использования классификатора Sodisic. В нескольких разрезах, в которых доля обменного натрия составляет 5–14%, используется классификатор Protosodic. Солончаковатые почвы с засоленными горизонтами на глубине 30–100 см имеют признаки, удовлетворяющие классификатору Endoprotosalic, глубокосолончаковатые с засоленными горизонтами на глубине 100–150 см — Bathyprotosalic. Наличие белоглазки в аккумулятивно-карбонатном горизонте BCAnс соответствует классификатору Protocalcic. Содержание $CaCO_3$ более 15% в горизонтах BMca и BCAnс в разр. Ч-104 и Ч-106 на глубине от 30 до 80 см является признаком горизонта calcic. Полностью карбонатный почвенный профиль при отсутствии свойств protocalcic или горизонта calcic позволяет применить классификатор Calcaric. Присутствие гипсовых новообразований только глубже 100 см соответствует классификатору Bathygypsic, а в разрезах с появлением гипса в пределах 64–90 см — классификатору Gypsic.

В общей выборке (82 образца) переходных к почвообразующей породе (лёссовидным суглинкам) горизонтах (BCsa и BCsa,cs) содержание $CaCO_3$ в 88% случаев изменяется в диапазоне от 4 до 9% с медианой 6.6, минимумом 3.4 и максимумом 14.3%. Сегрегаций карбонатов не наблюдается. Только в сильновыщелоченной лугово-каштановой почве (разр. Ч-7) не удалось достигнуть горизонта BCsa, до глубины 200 см вскипание от HCl отсутствовало.

Аккумулятивно-карбонатные горизонты (BCAnс) рассматриваемых почв отличаются наличием карбонатных сегрегаций в виде мягкой округлой или иногда вертикально вытянутой белоглазки. Статистическое распределение карбонатов в BCAnс смещено в область больших значений по сравнению с таковым для горизонта BC. В 89% случаев (объем выборки — 62 образца) содержание $CaCO_3$ варьирует от 5 до 11% с медианой 7.8, минимумом 4.2 и максимумом 16.4%. В большинстве разрезов максимум карбонатов в почвенном профиле отмечался именно в горизонте BCAnс.

Пахотные горизонты отличаются наибольшим варьированием содержания карбонатов. Статистическое распределение этого показателя (объем выборки 57 образцов) имеет два максимума: один в области малых значений (56% случаев с содержанием $CaCO_3 < 3%$, в том числе 33% случаев с $CaCO_3 < 1%$), второй в области больших значений (28% случаев с $CaCO_3$ 6–13%). Диапазон промежуточных значений содержания карбонатов (3–6%) отмечался только в 16% случаев.

Полученные результаты свидетельствуют, что наибольшее содержание $CaCO_3$ (7–13%) в поверхностном горизонте приурочено к светлым полосам (разр. Ч-105, Ч-1, Ч-2, Ч-3). Сильное осветление поверхности отчетливо проявлялось в полевых условиях при визуальном наблюдении. Почвы более темных участков поля (и на снимке) характеризовались содержанием $CaCO_3$ в пределах от 0 до 3–4%. Контраст по содержанию карбонатов между темными и светлой полосами представлен 5–10-кратным увеличением показателя в пахотном слое светлой полосы.

Дистанционные исследования ключевого участка Червленое. Содержание карбонатов в верхних горизонтах почвы (0–25 см) может оказывать существенное влияние на всхожесть сельскохозяйственных культур из-за образования плотной корки, поэтому желательно знать их количество в пахотном слое. Обнаружив, что изображение орошаемых полей на космических снимках имеет пятнистый рисунок в виде чередования светлых и темных пятен, встала задача определить в какой мере пятнистость связана с количеством $CaCO_3$ в верхних горизонтах почвы, увязав ее с полевыми исследованиями. Для этого была проведена классификация изображения ключевого участка Червленое на спектрально-космическом снимке высокого разрешения Канопус-В (август, 2015).

Предварительно, для исследования возможностей распознавания и картографирования по спутниковым изображениям почв с разным количеством карбонатов, а также для подбора нужного алгоритма классификации космического снимка, рассматривалась информативность спектральных каналов мультиспектрального изображения. Были составлены диаграммы рассеяния яркости

Таблица 2. Группировка почв по содержанию карбонатов в слое 0–25 см

Класс	Группа почв	Количество CaCO ₃ , %	Число точек	Номер точки (номинальное значение CaCO ₃ , %)	Доля не совпадающих по классам значений CaCO ₃ , %
1	Лугово- и луговато-каштановые некарбонатные и слабокарбонатные почвы	0–1	5	Ч-8 (0), Ч-12 (0.5), Ч-13 (0.13), Ч-14 (0.1), Ч-16 (0)	0
2	Луговато- и светло-каштановые слабокарбонатные и карбонатные почвы	1–4	10	Ч-7 (1.55), Ч-9 (0.5), Ч-15 (1.0), Ч-17 (2.5), Ч-18 (0.27), Ч-101 (1.1), Ч-102 (1.6), Ч-103 (0.35), Ч-104 (2.4), Ч-106 (1.0)	30
3	Светло-каштановые солонцеватые карбонатные почвы	4–6	4	Ч-4(6.0), Ч-5 (5.9), Ч-6 (4.8), Ч-10 (2.8)	25
4	Светло-каштановые солонцеватые карбонатные почвы	>6	5	Ч-1(7.1), Ч-2 (7.8), Ч-3 (7.1), Ч-11(7.1), Ч-105 (12.0)	0

пикселей (0–255) поверхности почв в четырех каналах: Blue (B1), Green (B2), Red (B3), NIR (B4).

На рис. S1 представлены диаграммы рассеяния, по которым видно, как распределились точки почв с разным количеством карбонатов по значениям яркости пикселей и относительно друг друга. По диаграммам можно выделить следующее: во всех каналах с увеличением яркости отмечается увеличение содержания карбонатов в почвах; почвы с одинаковым количеством карбонатов группируются, и такие группы имеют свои диапазоны яркостей, а значит могут быть классифицированы, но вместе с тем они пересекаются друг с другом. Поскольку группы почв пересекаются, необходимо использовать метод минимального расстояния. Так как выявленные тенденции характерны для всех каналов, для классификации может быть выбран любой из них. В итоге для классификации изображения был выбран канал Blue (B1) и определен оптимальный для обработки данного снимка алгоритм ISODATA, основанный на кластерном анализе. Данный алгоритм отвечает следующим существующим условиям: 1) объекты (кластеры, группы, классы) классифицируются на основе их различий без какой-либо точной предварительной информации о количестве и составе классов; 2) области значений яркости пикселей объектов пересекаются.

ISODATA (Iterative Self-Organizing Data Analysis Technique – итерационная самоорганизующаяся методика анализа данных) – алгоритм, основанный на статистическом кластерном анализе k-means (k-среднее). Задача кластерного анализа – выделение “сгущений” точек и разбиение совокупности на однородные подмножества объектов (кластеров, классов). К одному классу относятся пиксели, значения яркости которых наиболее близки в пространстве спектральных признаков.

Производится расчет статистических параметров распределения яркостей выделенного фрагмента снимка (в нашем случае ключевого участка) в одной из спектральных зон. При этом каждый пиксел относится к тому классу, к центру (центроиду) которого он ближе всего. В качестве меры близости используется Евклидово расстояние. Классификатор ISODATA осуществляет разделение по классам, используя максимальное, среднее и минимальное значения яркости и стандартное отклонение в первой итерации, затем классификация проводится по средним значениям и минимальному евклидову расстоянию до получения оптимального разделения классов. Оценкой качества кластеризации выбран предел сходимости (convergence threshold) 95%, при котором процесс кластеризации заканчивается и количество пикселей, не поменявших свой класс между итерациями, достигает 95%. Всего при обработке изображения ключевого участка на снимке проведено 15 итераций с заданным количеством классов 3–10, максимальным стандартным отклонением от среднего 1 (в яркостных значениях, DN) и максимальной ошибкой расстояния 5 DN, что позволило провести статистически значимую кластеризацию и выделить 4 класса. Выявлено, что каждый выделенный класс соответствует определенной группе почв, с определенным количеством карбонатов в слое 0–25 см (табл. 2).

Для первой группы почв характерно отсутствие карбонатов в пахотном горизонте (P) или присутствие небольшого количества карбонатов (Pca) за счет насыпного горизонта на профиль с темногомусовым (AU) или глинисто-иллювиальным (BI) горизонтами без карбонатов.

Для второй группы почв характерно присутствие карбонатов в пахотном горизонте (Pca) у светло-каштановых почв или небольшого коли-

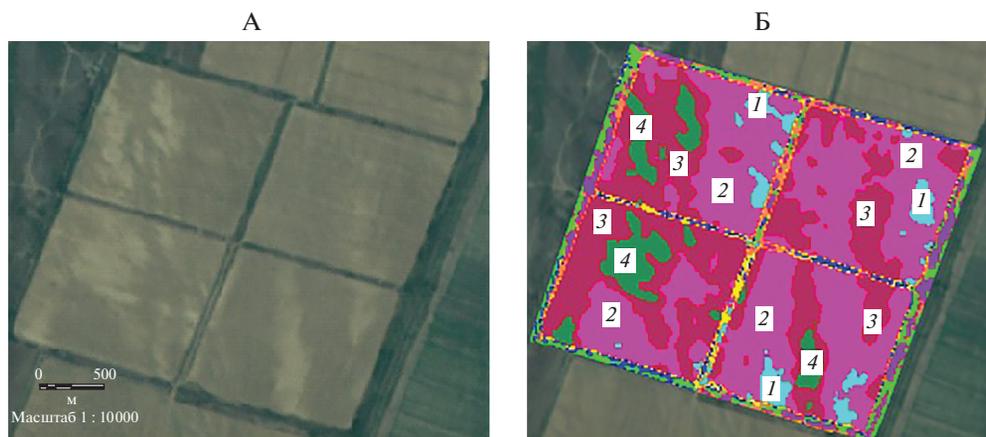


Рис. 4. Поэтапная обработка космического снимка высокого разрешения Канопус-В (август, 2015) в программе ENVI 5.1 классификатором ISODATA и выделение поверхностно окarbonатных почв по содержанию карбонатов на ключевом участке Червленое: А – космический снимок; Б – классификация изображения на 4 класса в канале Blue (B1) по открытой поверхности почв с выделением пятнистости почв по количеству CaCO_3 в слое 0–25 см: 1 – некарбонатные и слабокарбонатные (0–1%); 2 – слабокарбонатные и карбонатные (1–4%); 3 – карбонатные с количеством CaCO_3 4–6%; 4 – карбонатные с количеством $\text{CaCO}_3 > 6\%$.

чества карбонатов (P_{Ca}) за счет насыпного горизонта на глинисто-иллювиальный (В1) профиль луговато-каштановых почв.

Для третьей группы почв характерно присутствие карбонатов в пахотном горизонте (P_{Ca}) и наличие признаков солонцеватости в виде гумусово-глинистых кутан на боковых гранях агрегатов (th) в горизонтах Р и ВСА.

Для четвертой группы почв характерно наличие в горизонте ВСА признаков солонцеватости (th) или полное отсутствие горизонта ВСА.

Определенное несоответствие (25–30%) названия почвы (разр. Ч-7) и количества карбонатов в почвах (разр. Ч-9, Ч-103) с выделенными на снимке классами (2, 3) связано преимущественно с луговато-каштановыми почвами, которые не всегда классифицируются самостоятельно из-за малых размеров, и у почв, находящихся на границе классов, или близко к краю поля (разр. Ч-10, Ч-7).

В целом неоднородное изображение почв на космическом снимке в виде чередующихся более темных и более светлых пятен и полос на исследуемом участке и обусловленное разным содержанием карбонатов кальция в пахотном горизонте (0–25 см), может быть классифицировано с выделением следующих групп почв: некарбонатные и слабокарбонатные (0–1%); слабокарбонатные и карбонатные (1–4%); карбонатные с CaCO_3 4–6%; карбонатные с $\text{CaCO}_3 > 6\%$.

На рис. 4 представлена поэтапная обработка космического снимка в программе ENVI 5.1 классификатором ISODATA.

На Светлоярском ОУ до строительства ОС почвенный покров был представлен светло-каштановыми солонцовыми комплексами, включавшими

преимущественно светло-каштановые солонцеватые и несолонцеватые, солонцы солончаковатые, луговато- и лугово-каштановые почвы.

Наземные исследования ключевого участка Светлоярский. Солонцы занимали повышенные участки мезорельефа, солонцовые горизонты которых были практически полностью срезаны во время строительной планировки. В результате в настоящее время почвы имеют пахотный карбонатный горизонт, лежащий на оставшейся после срезки части профиля, начиная с аккумулятивно-карбонатного горизонта (формула профиля $P_{\text{r,Ca}}-BCA-BCAc_s$). По К-1977 – почва бывший солонец глубокий, со срезанным солонцовым и гумусовым горизонтом (до ВСА), с насыпным пахотным карбонатным горизонтом, орошаемый, среднесуглинистый на среднехвалынских отложениях. По РК-2004(8) – агрозем стратифицированный карбонатный аккумулятивно-карбонатный гипсодержащий среднесуглинистый на морских отложениях. По WRB-2014: Eutric Cambisol (Loamic, Aric, Novic, Protocalcic, Bathygypsic) (разр. 2Т-50).

Современный почвенный профиль бывших светло-каштановых почв в большинстве случаев имеет вид: $P_{\text{Ca}}-BCA-BCAnc-BC_{\text{Ca,nc}}$ (разр. 2Т16, 2Т20). Отличается от разр. 2Т-50 отсутствием гипсовых новообразований. По РК-2004(8) название почвы – агрозем аккумулятивно-карбонатный сегрегационный, по WRB-2014 – Eutric Cambisol (Siltic, Aric, Protocalcic). Иногда на светло-каштановых почвах с насыпанным в ходе планировки карбонатным материалом профиль почв становится следующим: $P_{\text{r,Ca}}-A_{\text{JCa}}-BCA-BCAnc-BC_{\text{Ca,nc}}$. Название почвы по РК-2004(8) – агросветлогумусовая аккумулятивно-карбонатная стратифи-

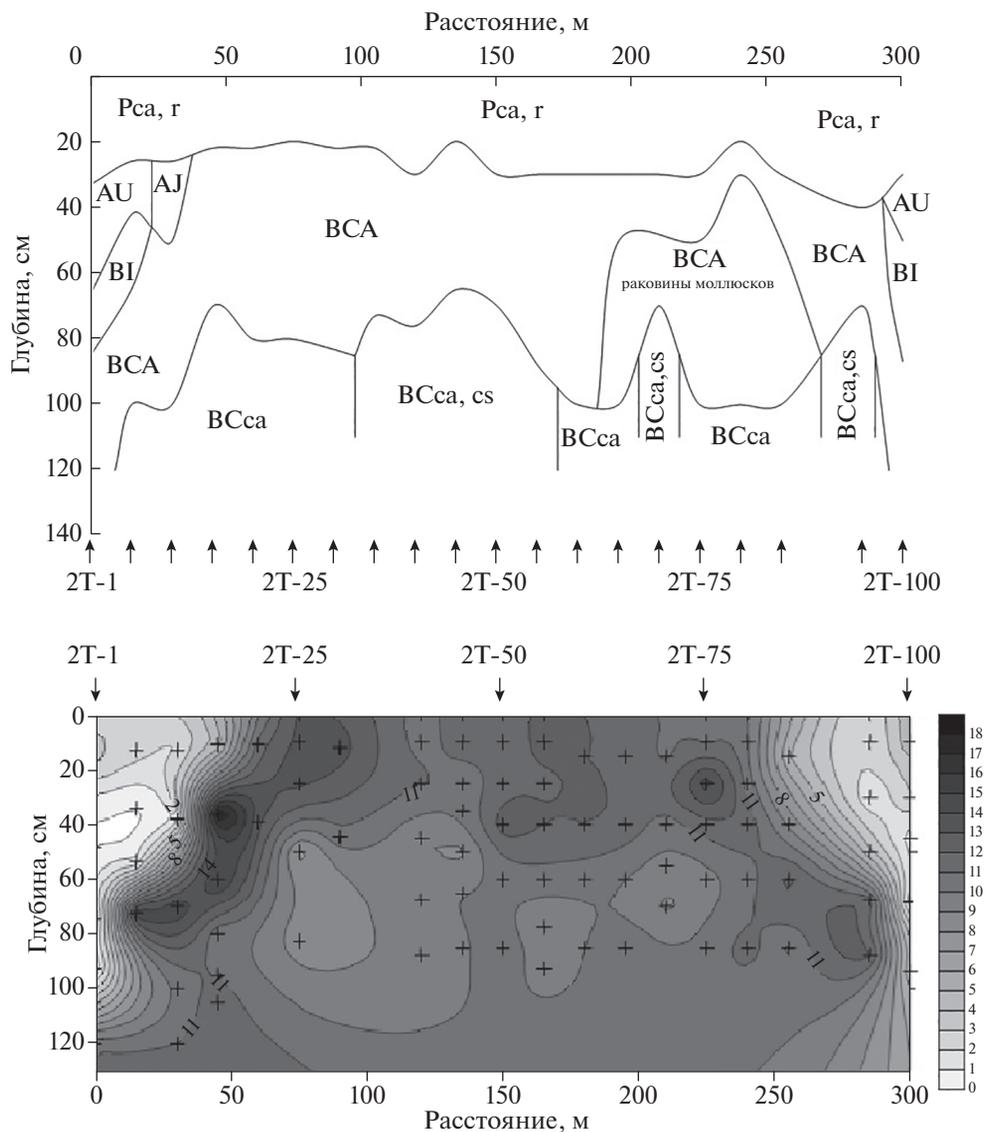


Рис. 5. Двумерный профиль распределения содержания карбонатов в орошаемых почвах, поперек срезки мезорельефа на Светлоярском ОУ (трансекта 2Т). Расстояние 300 м, глубина 130 см, почвенные скважины закладывали через каждые 15 м.

цированная сегрегационная среднесуглинистая на средневальнских суглинках, по WRB-2014 – добавляется квалификатор Novic: Eutric Cambisol (Siltic, Aric, Novic, Protocalcic) (разр. 2Т-11).

Наименьшие изменения претерпели бывшие лугово-каштановые почвы, которые не подвергались срезке, но после планировки были засыпаны карбонатным материалом смеси срезанных горизонтов разных почв. В результате сейчас имеются ареалы почв с профилем P_gca (насыпанный карбонатный пахотный горизонт)–AUq–BIq–BCA–BCanc–BCca,nc – агрозем карбонатный стратифицированный на погребенной темногумусовой глинисто-иллювиальной квазиглееватой почве

по РК-2004(8) или Luvic Kastanozem (Siltic, Aric, Novic) (разр. 2Т-1, 2Т-100).

Рассмотрим распределение содержания CaCO₃ на Светлоярском ОУ в почвах трансекты 2Т, которая пересекала светлое пятно, соответствующее срезке мезорельефа (рис. 5). С поверхности (0–25 см) содержание карбонатов в центре профиля, в районе срезки почвы, составляет 4–18% (2Т20...2Т-80), а за пределами ареала срезки почв (по окраинам профиля) уменьшается до 1–4% (2Т1...2Т16, 2Т95...2Т100). Последнее связано с ареалами луговых почв с глинисто-иллювиальным (BI) горизонтом, выщелоченном от карбонатов. В целом по трансекте в пахотном горизонте

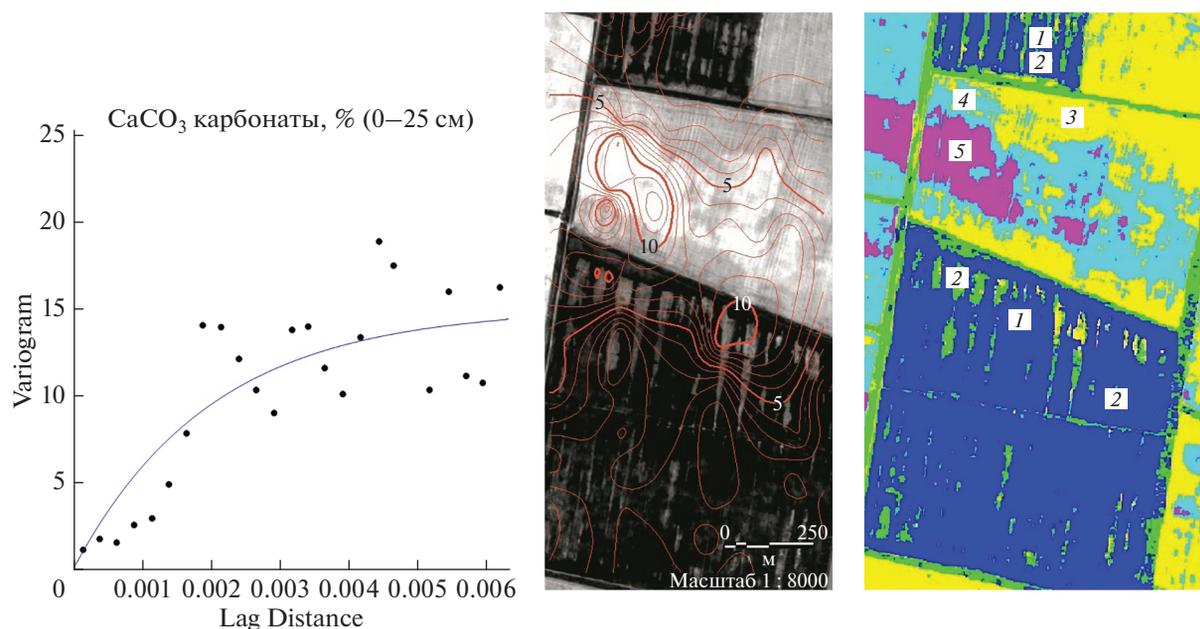


Рис. 6. Распределение карбонатов в поверхностном слое (0–25) см почв на территории Светлоярского орошаемого участка. А – вариограмма распределения; Б – карта распределения содержания карбонатов на фоне панхроматического снимка высокого разрешения Pleiades (20.05.2015), составленная методом kriging; В – классификация космического снимка Pleiades (20.05.2015) в канале Blue (B1) с выделением почв по количеству CaCO_3 на полях с люцерной и открытой поверхности почв. 1 – слабокарбонатные и карбонатные (0–4%) на полях с люцерной; 2 – карбонатные с количеством $\text{CaCO}_3 > 4\%$ на полях с люцерной; 3 – слабокарбонатные и карбонатные (1–2%) на открытой поверхности почв; 4 – карбонатные с количеством CaCO_3 2–4% на открытой поверхности почв; 5 – карбонатные с количеством $\text{CaCO}_3 > 4\%$ на открытой поверхности почв.

средняя величина составляет 9.1%, медиана 11.0%, минимум 1.2 и максимум 14.6% ($n = 24$).

Наибольшее содержание CaCO_3 (8–16%) отмечено на глубине 25–80 см в аккумулятивно-карбонатных горизонтах ВСапс, ВСапс,th (среднее 10.5%, медиана 10.4%, минимум 4.2%, максимум 18.2% при объеме выборки $n = 42$). Глубже, в горизонте ВСа, ВСа,cs, при переходе к почвообразующей породе, представленной преимущественно хвалынскими суглинками, содержание карбонатов варьирует от 4.4 до 15.0%, в среднем составляя 10.4% (медиана 10.4%) ($n = 12$).

Дистанционные исследования ключевого участка Светлоярский. Для создания карты распределения поверхностно-карбонатных почв на Светлоярский ОУ использовались два подхода – метод интерполяции kriging и классификация мультиспектрального космического снимка высокого разрешения Pleiades (20.05.2015) в канале Blue (B1) методом ISODATA.

На рис. 6 представлены вариограмма и карта (kriging), привязанная к космическому снимку, где отражено распределение содержания карбонатов (CaCO_3) в поверхностном слое (0–25 см) почв. Анализ карты показывает, что больше всего карбонатов (5–10 и $>10\%$) встречается в местах срезов мезорельефа, которые выделяются на снимке яркими светлыми пятнами на открытой

поверхности почв и светлыми пятнами выпадов люцерны на общем темном фоне возделываемых полей, а за пределами светлых пятен содержание карбонатов уменьшается до $<5\%$. Однако метод интерполяции kriging не позволяет четко выделить все пятна поверхностно-окарбонатных почв, что заметнее всего проявляется на полях с люцерной, где пятна плохо дифференцированы, несмотря на использование при картографировании большого количество наземных данных ($n = 105$).

На рис. S2 даны диаграммы рассеяния яркости пикселей (0–255) изображения поверхности почв, а на рис. 6, В представлен результат классификации космического снимка Pleiades, проведенный аналогично классификации ОУ Червленое, который описан выше. В отличие от ОУ Червленое на рис. 6, В отражено два вида поверхности почв – поля с люцерной и открытая поверхность почв, что привело к делению изображения по цвету отдельно для каждой поверхности. В процессе анализа наземных данных и яркостной классификации снимка были выделены следующие классы: 1 – слабокарбонатные и карбонатные (0–4%) почвы на участках с люцерной без пятен и характерные для лугово-, луговато- и светло-каштановых насыпных почв; 2 – карбонатные с количеством $\text{CaCO}_3 > 4\%$ на пятнах разреживания и выпадов культуры на полях с люцерной у светло-каштановых насыпных почв; 3 – слабокарбонат-

Таблица 3. Содержание карбонатов в орошаемых почвах участков Червленое и Светлоярский, %

Почва	Горизонты почв	Глубина, см	Червленое			Светлоярский		
			скважины, шт.	среднее	диапазон	скважины, шт.	среднее	диапазон
Лугово-каштановая	P, Pca, Pr(ca)	0–25(40)	3	0.7	0–1.6	5	2.5	1.4–3.9
	AU, AUq	25–50(70)	3	1.2	0–2.7	5	0.2	0–0.6
	BI, BIq, BIq,ca	30–70(85)	3	0	0	5	0.3	0–1.2
	BCAnc, BCAnc,dc	50–70(80)	2	7.2	7.0–7.3	5	7.9	4.2–14.8
	BCca, nc	70–100	2	5.9	5.4–6.4	3	10.9	7.8–12.6
Луговато-каштановая	P, Pca, Pr(ca)	0–25(40)	4	0.2	0–0.5	2	1.4	0.8–2.0
	AJ, AJau, AJca, au	10–30(50)	1	0.2	–	1	1.2	–
	BI	50–70	4	0.7	0–1.8	1	0	–
	BMca, BCAnc	30–70(80)	4	7.1	6.9–7.8	2	11.4	10.5–12.3
	BCca, nc	70–100	4	6.5	5.9–7.0	2	11.8	11.0–12.6
Светло-каштановая	P, Pca, Pr(ca)	0–25(30)	15	2.6	0.35–9.5	16	7.3	0–13.4
	AJ, AJca	30–40	4	2.9	0.35–4.6	1	0.5	0.5
	BMca, BCAnc, BCAnc,dc	30–70(80)	15	10.6	5.9–17.3	16	10.1	3.9–14.7
	BCnc, BCca, nc	70–100	15	7.8	3.5–10.4	10	8.2	0–11.4
	Pca, Pr(ca), Pca,th	0–25(30)	9	6.8	2.8–13.0	6	9.6	1.6–12.1
Светло-каштановая солонцеватая, солонцы	BCA, BCAnc,th	30–70(80)	8	8.0	7.0–9.2	6	9.8	9.5–11.5
	BCca, BCca,th	70–100	9	5.0	4.8–7.7	5	9.9	9.2–12.2

ные и карбонатные (1–2%) почвы на открытой поверхности, характерные для лугово-, луговато- и светло-каштановых насыпных почв; 4 – карбонатные с количеством CaCO_3 2–4% на открытой поверхности также у лугово-, луговато- и светло-каштановых насыпных почв; 5 – карбонатные с количеством CaCO_3 > 4% на светлых пятнах у светло-каштановых насыпных, светло-каштановых солонцеватых почв и солонцов срезаемых. Классификация снимка на открытой поверхности почв проходит более дифференцированно, чем на полях с люцерной, где почвы скрыты под пологом возделываемой культуры.

Доля (%) не совпадающих по классам значений CaCO_3 , выделенных на снимке и наземным данным, составила 4.5% для первого класса ($n = 44$), 2.4% для второго ($n = 41$), 0% – для третьего ($n = 1$), 25% для четвертого ($n = 4$) и 6.5% для пятого ($n = 15$) классов. Отсутствие ошибки в третьем и значительная ошибка в четвертом классах связаны с малым количеством имеющихся наземных данных.

Таким образом, при сравнении разных методов картографирования поверхностно-карбонатных (0–25 см) почв на территории Светлоярского ОУ, следует выделить, что метод интерполяции kriging, базирующийся только на наземных данных, является менее четким, чем оптимально подобранный метод классификации мультиспектрального космического снимка, основанный на спектральной яркости изображения почв и наземных данных о почвах.

Сравнение орошаемых ключевых участков. Несмотря на то, что орошаемые участки Червленое (31 разрез) и Светлоярский (28 разрезов) расположены в природных районах с разными литолого-геоморфологическими условиями, они имеют общие черты почвенного покрова, обусловленные принадлежностью к единой природной зоне и подходами к проектированию ОС: ареалы со срезкой почв наблюдаются как непосредственно в поле, так и на космических снимках, их площадь составляет от 10–20 м² и более; большая часть почв вскипает с поверхности; в почвенном покрове преобладают светло-каштановые (48 и 57%), затем светло-каштановые солонцеватые (29 и 21%), луговые (9.7 и 17.8%), луговато-каштановые (12.9 и 7.1%) почвы.

В пахотном горизонте (P, Pca, P(ca),r) наибольшие значения содержания CaCO_3 (преимущественно 6–9%, максимум 12–13%) характерны, в первую очередь, для светло-каштановых солонцеватых почв, расположенных на срезках микро- и мезорельефа. В пахотных горизонтах, насыпанных на лугово- и луговато-каштановые почвы, содержание CaCO_3 чаще всего составляет 0.5–2.5% (максимум 3.4%).

Для горизонтов BCAnc, BCAnc,dc, BCAnc,th всех исследованных почв характерно максимальное содержание карбонатов, которое может составлять 7–10%, достигая максимума 14–17%. В переходных к породе горизонтах BCca,nc, BCca,cs оно уменьшается до 6–9% с максимумом 10–13% (табл. 3).

Особенности литолого-геоморфологических условий двух участков проявились в тенденции бóльшого содержания карбонатов на 0.7–4.9% в одинаковых почвенных горизонтах сопоставимых почв на ОУ Светлоярский по сравнению с ОУ Червленое.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представлены количество и пространственное распределение CaCO_3 в почвенном профиле орошаемых почв сухостепной зоны Волгоградской области, на примере двух орошаемых участков Светлоярской оросительной системы, находящихся в разных природных районах (возвышенность Ергени и Сарпинская низменная равнина).

Подтверждено, что для региона характерно два варианта формирования карбонатного профиля. В первом из них вторичное окарбонирование поверхностных горизонтов происходит за счет восходящего подтягивания почвенных растворов к поверхности почв, второй – это срезка гумусового горизонта с последующей насыпкой смеси разных горизонтов во время планировки полей. Срезка повышенных участков почв, помимо выравнивания поверхности, была направлена на удаление солонцовых горизонтов, в результате чего солонцы на орошаемых полях практически не встречаются, или встречаются отдельные фрагменты солонцовых горизонтов.

На ключевых участках Червленое и Светлоярский больше всего карбонатов 7–10% содержится в аккумулятивно-карбонатном горизонте BC_{Anc} , $\text{BC}_{\text{Anc,dc}}$, $\text{BC}_{\text{Anc,th}}$, достигая максимума 14–17%.

В пахотном горизонте (P, P_{ca} , $\text{P}_{\text{g,ca}}$) количество карбонатов сильно варьирует в зависимости от типа почв: меньше всего их в лугово-каштановых почвах (0.5–2.5%), а больше всего в светлокаштановых солонцеватых почвах (6–9%).

На основе результатов полевых исследований установлено, что неоднородное изображение почв на космических снимках в виде чередующихся более темных и более светлых пятен и полос обусловлено разным содержанием карбонатов кальция в пахотном горизонте (0–25 см). При почвенном картографировании по результатам классификации космического снимка Канопус-В (канал B1) на территории ОУ Червленое выделены четыре группы почв по содержанию карбонатов: 0–1, 1–4, 4–6, >6%. При создании карты распределения поверхностно-карбонатных почв на территории Светлоярского ОУ использовались два варианта картографирования: метод интерполяции kriging, который хорошо выделяет крупные ареалы, но не различает мелкие пятна, и классификация космического снимка Pleiades (канал B1), по которому выделено 5 групп почв для разных видов поверхностей с содержанием карбонатов: 0–4 и > 4%

для полей с люцерной и 1–2, 2–4 и >4% для открытой поверхности почв. При сравнении разных вариантов карт выявлено, что метод интерполяции kriging, базирующийся только на наземных данных, является менее точным, чем оптимально подобранный метод классификации мультиспектрального космического снимка, основанный на спектральной яркости изображения почв и наземных данных о почвах.

Установлено, что положение ареалов с пятнистостью, обусловленной присутствием карбонатов в поверхностном слое почв, не связано с глубиной УГВ. Пятна хорошо проявляются на космических снимках открытой поверхности почвы и полей, занятых озимыми зерновыми культурами. На полях с люцерной при поверхностном способе полива в ареалах поверхностно-окарбонированных почв возникают выпадения культуры за счет образования корки и, как результат, уменьшение впитывания воды и препятствие появлению всходов. Таким образом, используя спутниковую информацию, возможно дистанционно определять участки почв с повышенным содержанием карбонатов и количество карбонатов в пахотном горизонте почв, которые особо нуждаются в мелиоративных мероприятиях.

ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Рис. S1. Диаграммы рассеяния яркости пикселей (0–255) изображения поверхности почв в каналах Blue (B1), Green (B2), Red (B3), NIR (B4) космического снимка высокого разрешения Канопус-В (август, 2015) и соответствующее содержание карбонатов (территория ключевого участка Червленое).

Рис. S2. Диаграммы рассеяния яркости пикселей (0–255) изображения поверхности почв в каналах Blue (B1), Green (B2), Red (B3), NIR (B4) космического снимка высокого разрешения Pleiades (20.05.2015) и соответствующее содержание карбонатов (территория Светлоярского ключевого участка).

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена в рамках государственного задания Почвенного института им. В.В. Докучаева (тема 0591-2019-0023) в области фундаментальных научных исследований.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Барановская В.А., Азовцев В.И. Влияние орошения на миграцию карбонатов в почвах Поволжья // Почвоведение. 1981. № 10. С. 17–27.

2. Барановская В.А., Азовцев В.И. СаСО₃ и его миграция в орошаемых почвах Заволжья // Совершенствование методов оценки засоленных почв, прогнозирование и предупреждение вторичного засоления. Тез. всес. сов. (Харьков, 23–26 октября 1972 г.). М.: Минсельхоз, 1972. С. 75–76.
3. Глазовская М.А. Геохимические основы типологии и методики исследований природных ландшафтов. Смоленск: Ойкумена, 2002. 288 с.
4. Государственный (Национальный) доклад о состоянии и использовании земель в Российской Федерации в 2018 г. Министерство экономического развития РФ, Федеральная служба государственной регистрации и картографии. М., 2019. 196 с.
5. Горохова И.Н., Панкова Е.И. Природа пятнистости орошаемых почв сухостепной зоны (на примере Светлоярской оросительной системы) // Аридные экосистемы. 2017. Т. 23. № 3. С. 44–54.
6. Горохова И.Н., Хитров Н.Б., Прокопьева К.О., Харланов В.А. Почвенный покров Светлоярской оросительной системы через полвека мелиоративных воздействий // Почвоведение. 2018. № 8. С. 1033–1044. <https://doi.org/10.1134/S0032180X18080130>
7. Горохова И.Н., Хитров Н.Б., Кравченко Е.П. Изменение засоленности орошаемых почв участка Червленое за четверть века (Волгоградская область) // Почвоведение. 2020. № 4. С. 463–472. <https://doi.org/10.31857/S0032180X20040061>
8. Дегтярева Е.Т., Жулидова А.Н. Почвы Волгоградской области. Волгоград: Нижне-Волжское книжное изд-во, 1970. 319 с.
9. Доскач А.Г. Природное районирование Прикаспийской полупустыни. М.: Наука, 1979. 142 с.
10. Зайдельман Ф.Р., Селищев А.А., Никифорова А.С. Карбонатные конкреции почв гумидных ландшафтов и их диагностическое значение // Почвоведение. 2000. № 4. С. 405–415.
11. Зимовец Б.А. Экология и мелиорация почв сухостепной зоны. М.: Почв. ин-т им. В.В. Докучаева, 1991. 248 с.
12. Классификация и диагностика почв России. Смоленск: Ойкумена, 2004. 342 с.
13. Классификация и диагностика почв СССР. М.: Колос, 1977. 223 с.
14. Ковда В.А. Основы учения о почвах. Общая теория почвообразовательного процесса. М.: Наука, 1973. Кн. 1. 447 с. Кн. 2. 468 с.
15. Ковда И.В. Карбонатные новообразования в почвах: старые и новые проблемы изучения // Почвы, биохимические циклы и биосфера. Развитие идей Виктора Абрамовича Ковды. М.: Товарищество научных изданий КМК, 2004. С. 115–136.
16. Корнблом Э.А., Мясников В.В. Способ классификации оценки разнообразия солонцовых почв, нарушенных строительными планировками // Новые методы исследования почв солонцовых комплексов. Науч. тр. Почв. ин-та им. В.В. Докучаева. М., 1982. С. 136–146.
17. Любимова И.Н., Дегтярева Е.Т. Изменение карбонатного профиля почв солонцовых комплексов при агрогенном воздействии // Почвоведение. 2000. № 7. С. 855–860.
18. Любимова И.Н., Новикова А.Ф. Влияние различных антропогенных воздействий на изменение почв солонцовых комплексов сухостепной зоны // Почвоведение. 2016. № 5. С. 633–643.
19. Панкова Е.И., Новикова А.Ф. Мелиоративное состояние и вторичное засоление орошаемых земель Волгоградской области // Почвоведение. 2004. № 6. С. 731–744.
20. Петров Н.Н. Система закладки и возделывания виноградников на карбонатных почвах России. Автореф. дис. ... с.-х. н. Новочеркасск, 2000. 60 с.
21. Полевой определитель почв России. М.: Почв. ин-т им. В.В. Докучаева, 2008. 182 с.
22. Розанов А.Б. Карбонатизация // Элементарные почвообразовательные процессы: опыт концептуального анализа, характеристика, систематика. М.: Наука, 1992. С. 23–25.
23. Руководство по лабораторным методам исследования ионно-солевого состава нейтральных и щелочных минеральных почв / Под ред. Н.Б. Хитрова, А.А. Понизовского. М.: Почв. ин-т им. В.В. Докучаева, 1990. 236 с.
24. Amit R.J., Harrison B.J. Biogenic calcite horizon development under extremely arid conditions // Adv. Geoeol. 1995. V. 28. P. 65–88.
25. Calcareous soils. FAO Soils Bulletin 21. Rome, 1972. 253 p.
26. de Soto, I.S., Virto I., Barre P., Fernandez-Ugalde O., Anton R., Martinez I., Chaduteau C., Enrique A., Bescansa P. A model for field-based evidences of the impact of irrigation on carbonates in the tilled layer of semi-arid Mediterranean soils // Geoderma. 2017. V. 297. P. 48–60. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.03.005>
27. Doner H.E., Lynn W.C. Carbonate, halide, sulfate, and sulfide minerals // Minerals in Soil Environments. Madison, 1989. P. 279–330.
28. Dixon J.C. Aridic Soils, Patterned Ground, and Desert Pavements // Geomorphol. Desert Environ. Springer Science + Business Media B.V., 2009. P. 101–122. 5 <https://doi.org/10.1007/978-1-4020-5719-9>
29. Dohrenwend J.C., Bull W.B., Mc Fadden L.D., Smith G.I. Quaternary geology of the Basin and Range Province in California // Quaternary non-glacial geology: conterminous United States. 1991. P. 321–352.
30. Dregne H.E. Soils of arid regions. Amsterdam: Elsevier, 1976.
31. Gustavson T.C., Baumgardner R.W., Caran S.C., Holliday V.T. Quaternary geology of the Southern Great Plains and an adjacent segment of the Rolling Plains // Quaternary non-glacial geology: conterminous United States. 1991. P. 477–501.
32. IUSS Working Group WRB. 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. 2015. № 106. FAO, Rome. 192 p.
33. Kadry L.T. Distribution of calcareous soils in the Near East Region, their reclamation and land use measures and achievements. FAO/UNDP Regional Seminar on Reclamation and Management of Calcareous Soils. 1972.

34. *Larbi A., Kchaou H., Gaaliche B., Gargouri K., Boulal H., Morales F.* Supplementary potassium and calcium improves salt tolerance in olive plants // *Scientia Horticulturae*. 2020. V. 260.
<https://doi.org/10.1016/j.scienta.2019.108912>
35. *Manchanda M.L., Abuja R.L., Khanna S.S.* Genesis of calcium carbonate accumulation Saskatchewan soils, Canada // *Geoderma*. 1984. V. 117. P. 143–156.
36. Soil Survey investigations for irrigation. FAO Soils Bulletin 42. Rome, 1979. 188 p.
37. *Wu L.S., Wood Y., Jiang P.P., Li L., Pan G., Lu L.Q., Pan G.X., Lu J.H., Chang A.C., Enloe H.A.* Carbon sequestration and dynamics of two irrigated agricultural soils in California // *Soil Sci. Soc. Am. J.* 2008. V. 72. P. 808–814.
<https://doi.org/10.2136/sssaj2007.0074>

Diagnostics of Distribution Patterns of Carbonates in Irrigated Soils of the Dry Steppe Zone (Volgograd Oblast) on Satellite Images

N. B. Khitrov^{1,*}, I. N. Gorokhova¹, and E. I. Pankova¹

¹*Dokuchaev Soil Science Institute, Moscow, 119017 Russia*

**e-mail: khitrovn@gmail.com*

Spatial distribution of carbonates (CaCO₃) in the surface layer and in the profiles of irrigated soils on two key sites of the Svetloyarsk irrigation system in Volgograd oblast are discussed. The key sites are found in different natural regions of the dry steppe zone: the Ergeni Upland and the Caspian Lowland. At both key sites, agricultural fields are characterized by spotty patterns on satellite images, both for bare soil surface and for soils under crops. One of the main reasons for this spottiness is the different contents of calcium carbonates in the surface soil layer. Two mechanisms of carbonate accumulation in the surface soil layer have been established. The first mechanism is related to topsoil cutting from convex positions of microtopography during surface leveling, so that carbonates from the middle-profile horizons outcrop to the surface; carbonate-bearing cutoff material is shifted towards surrounding area. The second mechanism is the upward migration of soil solutions to the surface horizon and precipitation of carbonates during long-term irrigation under dry hot climate. Combined use of remote sensing data and field soil surveys along transects crossing areas with different spectral brightness makes it possible to delineate soil areas with different carbonate contents in the plow layer.

Keywords: calcium carbonates in topsoil horizon, irrigated fields, spotty patterns on satellite images, carbonate content