

===== МЕТОДЫ ИЗУЧЕНИЯ, ПОДДЕРЖАНИЯ И СОХРАНЕНИЯ ЭКОСИСТЕМ =====
И ИХ КОМПОНЕНТОВ

УДК 631.4

**МЕТОДИЧЕСКИЕ ПОДХОДЫ К ОЦЕНКЕ СОСТОЯНИЯ
ОРОШАЕМЫХ ЗЕМЕЛЬ СУХОСТЕПНОЙ ЗОНЫ ВОЛГОГРАДСКОЙ ОБЛАСТИ
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КОСМИЧЕСКИХ СНИМКОВ**

© 2023 г. И.Н. Горохова, Е.И. Панкова

Почвенный институт им. В.В. Докучаева

Россия, 119017, г. Москва, Пыжевский пер., стр. 7. E-mail: g-irina14@yandex.ru

Поступила в редакцию 16.12.2022. После доработки 01.02.2023. Принята к публикации 02.02.2023.

В статье представлены материалы исследований в Волгоградской области, которые могут быть положены в основу методических рекомендаций для картографирования, определения площадей и состояния орошаемых земель с использованием космических снимков. Эти материалы опираются на многолетний опыт, полученный при изучении орошаемых земель в зоне солонцовых комплексов сухой степи. Привлечение материалов космической съемки поможет картографировать и определить: 1) площади орошаемых земель, 2) площади и возраст залежных земель на орошаемых массивах, 3) состояние орошаемых почв и факторы, ограничивающих их плодородие. Сельскохозяйственные культуры в различных гидрогеологических условиях по-разному реагируют на лимитирующие факторы, поэтому при составлении карт рекомендуется придерживаться следующих этапов картографирования: выделять поля с разными культурами и залежью; выявлять наличие пятен с разреженностью или отсутствием сельскохозяйственных культур на снимках; в полевых условиях и на базе проведенных анализов отобранных почвенных образцов устанавливать причину пятен, выявленных по изображению; используя результаты полевых исследований, подбирать алгоритм для обработки космических снимков. Пятнистость орошаемых полей, отраженная на космических снимках, имеет разную природу, поэтому интерпретация дистанционных материалов требует обязательного изучения особенностей района исследований. Пятнистость, связанная с вторичным и остаточным засолением почв, определяется по состоянию растительности, поэтому важен период проведения космической съемки, отражающий высокую вегетационную активность растений. Необходимы также сведения об уровне грунтовых вод, поскольку их критический уровень является основной причиной возникновения процесса вторичного засоления почв. Для глубокозасоленных почв стоит построить солевую карту с помощью интерполяции точечных данных, полученных в полевых условиях и на основе лабораторных анализов. Пятнистость, связанная с карбонатностью поверхностного горизонта почв, не зависит от уровня грунтовых вод и лучше всего просматривается на космических снимках с открытой поверхностью почв. Проверка и оценка точности карты может проводиться путем сравнения с картами более крупного масштаба и данными полевых наблюдений и путем оценки точности проведенной классификации космического изображения, посредством определения проверочных индексов. Представленные материалы предназначены для широкого круга специалистов, использующих космическую информацию в работе, а также для специалистов (почвоведов, агрономов, агрохимиков), работающих в аграрном секторе южных регионов России.

Ключевые слова: сухостепная зона, орошаемые земли, засоленные почвы, космические снимки, картографирование орошаемых почв.

DOI: 10.24412/2542-2006-2023-1-5-37

EDN: DTKKMP

Волгоградская область является крупнейшим сельскохозяйственным регионом России. По данным Минсельхоза (Доклада о состоянии ..., 2022), общая площадь пашни в области на 01.01.2021 составила 5794 тыс. га, из которой орошается 178.840 тыс. га.

Орошение на территории Волгоградской области началось еще в дореволюционный период, и в XIX веке площадь орошаемых земель составляла 8.7 тыс. га (Приходько, 2012). Широкое регулярное орошение стало развиваться в 50-60-х годах XX века. Пик ирригационного освоения отмечался в 1989 г., когда в орошение было вовлечено 345.2 тыс. га или 4.6% от площади сельскохозяйственных земель Волгоградской области (Панкова, Новикова, 2004). В 90-х годах в связи с общей сложной экономической ситуацией в стране площади орошаемых земель в области резко сократились. В 2001 г. они составили 259.4 тыс. га или 3.2% от площади угодий, в 2015 г. осталось только около 179 тыс. га (Панкова, Новикова, 2004; Горохова и др., 2019). Почти такой же площадь сохранилась в 2021 г. – 178.840 тыс. га.

Земли сухостепной зоны Волгоградской области активно используются в сельском хозяйстве под пашню, сенокосы и пастбища. Почвенный покров зоны представлен разнообразными почвенными комбинациями, включающими комплексы каштановых несолонцеватых и солонцеватых почв на водосборных пространствах с хорошей дренированностью, каштановые солонцовые комплексы с разным долевым участием солонцов в автоморфных, полугидроморфных и гидроморфных условиях, сочетания и пятнистости лугово-каштановых, луговых почв разной степени засоления и солонцеватости, аллювиальные почвы в долинах рек. В работах многих советских и российских исследователей были установлены основные закономерности природного состояния почв сухостепной зоны в целинных условиях на начальных и последующих этапах их активного сельскохозяйственного освоения (Антипов-Каратаев, 1953; Иванова, 1928; Иванова, Фридланд, 1954; Ковда, 1937; Роде, Польский, 1961; Фридланд, 1964; Минашина, 1978; Зимовец, 1991).

К классическим методам исследования почв солонцовых комплексов с 60-х годов XX века и по настоящее время активно добавляются такие, как дистанционное зондирование (аэро- и космическая съемки). Космический метод сегодня является одним из главных методов изучения орошаемых земель и составления карт, отражающих их состояние. Получаемые с помощью космических снимков изображения представляют собой высокоточные пространственно-временные модели. Они дают представление о динамике процесса деградации и структуры использования земель во времени. Дешифрирование космических снимков позволяет определить, с одной стороны, многообразные природные свойства орошаемых земель; с другой, важные элементы сельскохозяйственного производства: севообороты, способ орошения, мелиоративные мероприятия и т.д. Параллельно возможно распознавание ряда динамических состояний природных комплексов естественной и антропогенной обусловленности.

Активно проводится привлечение космической информации для картографирования залежных земель в России, т.к. наличие значительных площадей забрасываемых земель – современная проблема страны (Курбанов, 2010; Канатъева, 2013; Фазылова, 2014; Алдошин и др., 2015; Рухович, Шаповалов, 2015). Проводится также изучение засоленности орошаемых почв (Новикова и др., 2009; Савин и др., 2014; Конюшкова, 2014).

Оценка современного состояния орошаемых почв дистанционными методами особенно важна для малодоступных районов, что улучшает стратегию управления всем орошаемым комплексом, позволяет сократить временные и материальные затраты на наземные и лабораторные исследования.

Интерпретация дистанционных материалов требует обязательного изучения особенностей района исследований на основе полевых работ и лабораторных анализов почвенных образцов. Многолетний опыт наших исследований орошаемых земель подтверждает необходимость совместного использования наземных и дистанционных методов.

Цель данной статьи – изложить опыт и материалы многолетних исследований орошаемых земель Волгоградской области с привлечением дистанционной информации, отражающей специфику региона и представляющую интерес для разработки методических рекомендаций.

Методы исследований. В работе применяли разные методы исследования: использовалась космическая информация, а также современные приемы ее обработки. Применяли полевые исследования почв, а также лабораторные методы определения состава легкорастворимых солей (водная вытяжка (1:5) для определения суммы токсичных солей (%) и ионометрический метод: измерение активности ионов Ca^{2+} , Na^+ , Cl^- в почвенных пастах с постоянной влажностью 40% ионоселективными электродами (ммоль/л), определение CaCO_3 (%) в профиле почв (Аринушкина, 1970; Хитров, Понизовский, 1990).

1. Материалы космической съемки для оценки состояния орошаемых земель сухостепной зоны Волгоградской области

1.1. Требования к материалам космической съемки

Известно, что материалы космической съемки на протяжении последних нескольких десятилетий помогают получить объективную информацию о многих объектах исследования, об их однородности или неоднородности, об антропогенной нарушенности и характере использования.

Основными характеристиками космических снимков являются их тип. Они могут быть панхроматические, мультиспектральные в видимом, инфракрасном или радио-диапазоне спектра электромагнитных колебаний. Помимо типа важны пространственное разрешение, сезон и время съемки. Выбор космических снимков с определенными характеристиками зависит от цели исследований и свойств территории, которую предстоит изучить.

Разрешение съемки. На сегодня имеется достаточный выбор снимков высокого (до 15 м) и сверхвысокого (до 1 м) пространственного разрешения, которые могут быть заказаны для проведения работ. Для решения задач по обследованию орошаемых земель хорошо зарекомендовали себя космические мультиспектральные снимки открытого доступа съемочной системы Landsat, с разрешением 30 м в мультиспектральном и 15 м в панхроматическом диапазонах на 1 пиксел и Sentinel-2 с разрешением 10 м на 1 пиксел в мультиспектральном диапазоне.

Тип съемки. Серия зональных снимков представляет собой спектральный образ изучаемого объекта. Исходя из нашего опыта работ, для орошаемых почв рекомендуется использовать мультиспектральные (включающие RGB и инфракрасную зоны съемки) и панхроматические снимки, т.к. наиболее информативными для анализа состояния возделываемых сельскохозяйственных культур и почв являются красная и инфракрасная зоны спектра, а для повышения разрешения изображения необходимо панхроматическое изображение.

При работе с цифровыми космическими снимками необходимо использовать изображения, прошедшие следующие уровни обработки: пространственную привязку к системе координат (геокодирование), перевод в стандартный тип проекции и ортотрансформирование. При скачивании снимков Landsat и Sentinel следует иметь в виду, что они проходят оба уровня обработки – первичную радиометрическую, геометрическую коррекцию и геокодирование, перевод в стандартный тип проекции WGS-84. В таблице 1 представлены наиболее употребляемые в России проекции.

Космические цифровые снимки, поставляемые зарубежными фирмами-распространителями, уже преобразованы в систему координат WGS-84, в то время как

отечественные топографические карты составляются в государственной системе координат СК-42. Разница в значениях координат точки в этих двух системах на территории нашей страны может достигать 2 км по оси Y в системе WGS-84 (X в системе СК-42), а по другой оси – нескольких сотен метров (Лабутина, Балдина, 2011). Поэтому при совместном использовании (наложении) снимков и отечественных карт необходимо приводить их в единую систему.

Таблица 1. Наиболее распространенные геодезические системы координат и проекции.
Table 1. Main geodetic coordinate systems and projections.

Геодезическая система координат	Проекция	Эллипсоид
СК-42 (Пулково)	Гаусса-Крюгера	Красовского
WGS-84	UTM (поперечно-цилиндрическая Меркатора)	WGS-84

Согласование систем координат необходимо также в процессе наземных работ, когда координаты точек наземных наблюдений определяются приемником спутникового позиционирования (GPS, ГЛОНАСС). Однако во многих современных GPS-приемниках уже предусмотрен переход от WGS-84 к СК-42 (Пулково).

Третьим уровнем обработки снимков является ортотрансформирование. Ортотрансформирование либо заказывают как дополнительную услугу у специалистов, либо проводят самостоятельно. Оно является необходимым условием для гористой местности в связи с искажениями, возникающими из-за отклонения оптической оси камеры спутника от вертикального положения в момент съемки, а также смещения из-за рельефа. Чтобы контуры, выделенные по снимку, ложились точно на топографическую карту, необходимо их преобразовать. Даже для равнинной местности, не говоря уже о гористой, погрешность планового положения точек может составлять нескольких метров. Ниже представлена таблица 2, показывающая отклонения точек на плане от средней высоты местности и в зависимости от угла съемки.

Таблица 2. Величина ошибки на плане (карте) в зависимости от характера рельефа местности и угла отклонения съемки от нодира (Руководство пользователя ENVI ..., 2014).
Table 2. The error severity on the plan/map depending on the terrain and angle of deviation from the nadir (ENVI User Manual ..., 2014).

Угол отклонения от нодира, градусы	Отклонение высоты на плане (карте) от среднего значения рельефа на местности (м)				
	2	10	50	100	500
5	0	1	4	9	44
15	0.5	3	13	27	134
25	1	5	23	47	233

Ортотрансформирование также проводится с учетом различных моделей рельефа (ЦМР). Наиболее часто используется современная цифровая модель – SRTM (Shuttle Radar Topography Mission), которая создана на основе радиолокационной съемки с космического челнока Shuttle, выполнявшего съемку в 2000 г. SRTM – это международный проект по формированию цифровой модели рельефа части земного шара (от 56° ю.ш. до 60° с.ш.).

Изначально детальность сетки этой ЦМР составляла около 30 м. В дальнейшем в открытом доступе были представлены данные, огрубленные до 90 м. Последняя версия этой модели за 2009 г. обеспечивает абсолютную точность по высоте около 16 м и относительную по высоте 10 м (Лабутина, Балдина, 2011).

Период и сезон съемки. Рекомендуется, чтобы год съемки соответствовал году исследований. Сезон должен соответствовать периоду, когда изучаемые объекты (в нашем случае – орошаемые земли) на снимках будут наиболее контрастными. Для выделения орошаемых земель лучше использовать снимки за весенне-летний период (май – начало июня). На снимках данного периода хорошо видно, какие земли возделываются, а какие – нет. Кроме того, в этот период хорошо разделяются разные сельскохозяйственные культуры (созревшие озимые зерновые, кормовые травы) и залежь (рис. 1).



А) 01.05.2016.



Б) 08.07.2016.

Рис. 1 А, Б. Изображение орошаемых земель и возделываемых на них сельскохозяйственных культур со спутника Landsat OLI-8 в разные месяцы. А (01.05.2016) – в начале мая хорошо выделяются вызревшие озимые зерновые культуры и кормовые травы; Б (08.07.2016) – в июне озимые зерновые культуры уже убраны, но еще хорошо выделяются кормовые травы.

Fig. 1 А, Б. Irrigated lands and crops on the Landsat OLI-8 images for different months:

A (01/05/2016) – in the early May winter cereals and fodder are well defined, B (08/07/2016) – in June winter cereals have been harvested, but fodder is still well defined.



В) 08.09.2016.

Рис. 1 В. Изображение орошаемых земель и возделываемых на них сельскохозяйственных культур со спутника Landsat OLI-8 в разные месяцы. В (08.09.2016) – все культуры убраны, выделяются поля со стерней озимых зерновых культур и распаханые поля. **Fig. 1 В.** Irrigated lands and crops on the Landsat OLI-8 images for different months: С (08/09/2016) – in September crops are already harvested, but the harvested fields where the winter cereals were and the plowed fields are well defined.

1.2. Предварительная обработка снимков

В настоящее время обработка снимков ведется средствами программных пакетов, специально предназначенных для такой работы. Часто такие программы обеспечивают не только извлечение информации из снимков, но и интеграцию с данными ГИС. Программные продукты для обработки снимков довольно многочисленны и различны по сложности. Среди пакетов высокого уровня наибольшее распространение получили ENVI, ERDAS Imagine и PCI Geomatica. Они обеспечивают полный комплекс обработки всех существующих в настоящее время видов съемки.

Существуют также программные комплексы в свободном доступе, обеспечивающие выполнение основных операций по обработке изображений.

Программа MultiSpec позволяет открывать, просматривать и обрабатывать многозональные, а также гиперспектральные снимки.

ILWIS, QGIS – свободно распространяемые ГИС-пакеты, которые обеспечивают не только операции по обработке снимков, включая их геометрические преобразования и координатную привязку, но также работу с картами в векторном формате. В системе предусмотрен импорт и экспорт широко используемых форматов растровых и векторных данных.

В большинстве ГИС-пакетов (AutoCADMap, MapInfo, ArcGISDesktop/Workstation и в его наиболее распространенных модулях Arc/Info, ArcView) есть возможность создания векторных карт по растровой подложке, но не предусматриваются разного вида

классификации, вычисление индексов и пр. Однако в них можно создавать векторные карты по изображениям, полученным в результате предварительной обработки снимков в специализированных программных пакетах.

Подготовка снимка. Обработка снимка включает большое множество яркостных преобразований, которые направлены на улучшение качества изображения как для визуального дешифрирования на экране, так и последующей автоматизированной обработки. Среди наиболее часто применяемых преобразований используются повышение контрастности снимка, фильтрация изображения, синтезирование разных каналов, создание индексных изображений и классификация снимка по яркости.

Фильтрация данных дистанционного зондирования является необходимым этапом их предварительной обработки для последующего анализа. Часто задача заключается в том, чтобы узнать, как изменяются спектральные свойства почв и растительности во времени, или анализировать яркостные характеристики по снимкам с разных сенсоров. В этом случае космические снимки должны быть сопоставимы. Также необходимо исключить влияние атмосферы на изображения. Внесение соответствующих поправок называют радиометрической калибровкой и атмосферной коррекцией. Радиометрическая калибровка предназначена для устранения системных помех сенсоров, а атмосферная коррекция – для устранения влияния атмосферы (рис. 2).



А) Исходное изображение снимка.



Б) Радиометрическая калибровка снимка.



В) Атмосферная коррекция снимка на основе модели MODTRAN.

Рис. 2. Результат фильтрации изображения снимка Landsat OLI-8 (09.06.2015).

Fig. 2. Filtered Landsat OLI-8 images (09/06/2015).

Другая процедура улучшения изображения космического снимка заключается в увеличении геометрического размера пиксела изображения, обычно мультиспектрального (30 м у сенсора Landsat OLI-8), путем совмещения с изображением с более высоким пространственным разрешением, как правило, панхроматического (15 м у сенсора Landsat OLI-8). Для этого используемые образы должны быть получены одним сенсором или быть в одной системе координат и одинаковой проекции. Специализированные пакетные программы, перечисленные выше, имеют специальные опции по совмещению изображений различного разрешения (рис. 3).



Рис. 3. Изображение орошаемых земель со спутника Landsat OLI-8 (01.05.2016): А – мультиспектральное, Б – полученное в результате совмещения мультиспектрального изображения с панхроматическим каналом. **Fig. 3.** A – multispectral image of irrigated lands obtained from Landsat OLI-8 on 01/05/2016, B – combination of a multispectral image and a panchromatic channel.

1.3. Предполетный этап изучения орошаемых земель

Для изучения орошаемых земель предварительно проводится выделение оросительных систем по материалам космической съемки. Орошаемые земли, в отличие от богарных, имеют свои дешифровочные признаки. Из них можно выделить основные.

1. Поля орошаемых земель, как правило, меньше по площади сельскохозяйственных полей с богарным земледелием;
2. К орошаемым полям подходят головной оросительный канал и каналы-распределители, которые видны на снимке;
3. Орошаемые поля часто определяются по круговой форме (рис. 4).

Предварительно рекомендуется рассмотреть оросительные системы на топографических картах, а затем полученную информацию использовать для анализа космического снимка. Информация на карте поможет точно определить оросительные системы, которые функционировали в советское время, и выяснить по космическому снимку, что стало с ними в настоящий момент.

На рисунке 5 представлены оросительные системы, расположенные вдоль Волго-Донского канала. Сравнивая изображения на топографической карте (1984) и космическом снимке (2016), можно отметить, что в настоящее время не все системы функционируют, а также изменилась конфигурация некоторых массивов орошения за счет возделывания

дополнительных площадей.

Следует иметь ввиду, что зачастую орошаемые массивы используются как богарные земли, поэтому относить их к орошаемым не совсем верно (согласно кадастровому учету, они являются орошаемыми, а по факту используются как богара). Определить по космическому снимку и во время полевых рекогносцировочных маршрутов, являются ли земли на данный момент богарными или используются как влагозарядковые, можно только у хозяев наделов.

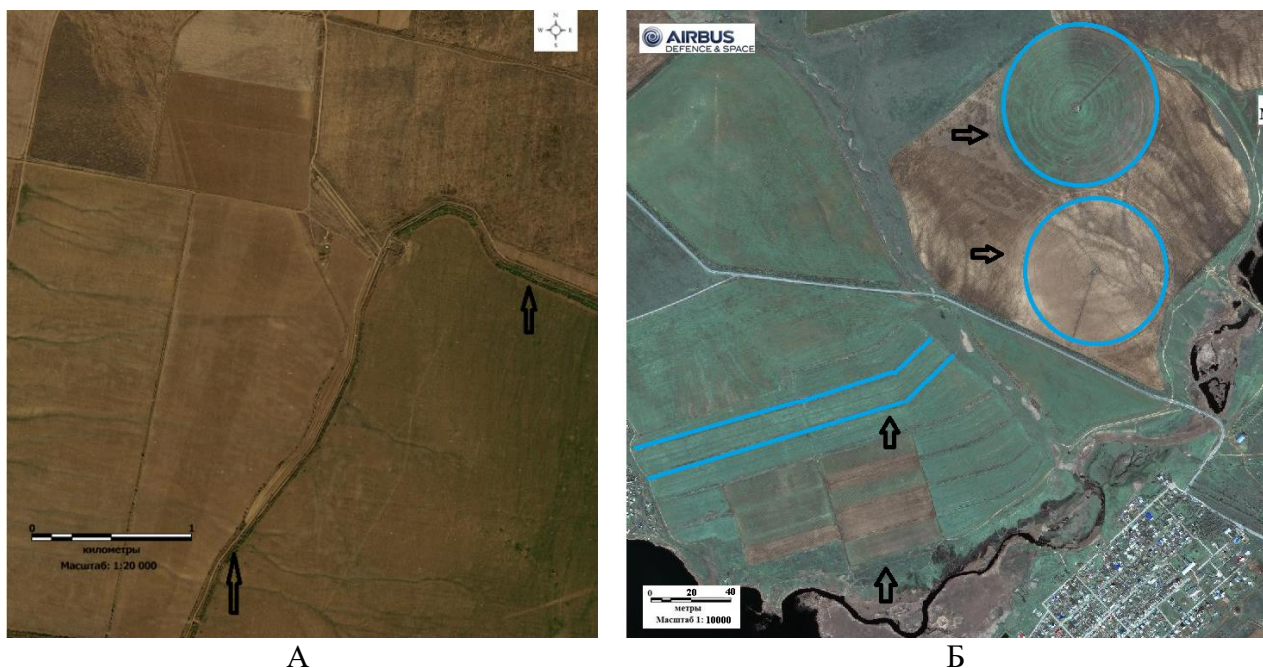


Рис. 4. Оросительные каналы на космических снимках: А – головной оросительный канал; Б – круговое орошение и временные оросители, отмеченные на космических снимках с портала Yandex.ru и Pliedas (18.04.2019) на территории орошаемых земель Волгоградской области. **Fig. 4.** Irrigation canals on satellite imagery: А – mail canal, Б – pivot irrigation and temporary sprinklers on the satellite images taken from Yandex.ru and Pliedas (18/04/2019) in the irrigated lands of the Volgograd Region.

Выделение возделываемых и залежных земель. Предварительный визуальный анализ RGB-изображения космического снимка позволяет установить, что оросительная система является частично или полностью заброшенной и стала многолетней залежью. Многолетняя залежь отличается от возделываемых полей в активный вегетационный период отсутствием сельскохозяйственной культуры, а также размытым рисунком изображения. Иногда на снимке видно, что подводящие каналы лишены воды или вовсе засыпаны.

Чтобы разделить орошаемые и неорошаемые поля на мультиспектральных космических снимках опытным путем, мы подбираем и используем сочетание разных каналов (рис. 6, 7).

При выделении многолетней залежи на изображении космического снимка со спутника Landsat-8 (04.04.2020) по сочетанию каналов 7, 5, 4 (коротковолновый инфракрасный, ближний инфракрасный, красный) более молодая залежь (до 5 лет) выделяется насыщенным розовым цветом, а более зрелая – бледно-розовым (рис. 6).

Орошаемые массивы хорошо отображаются на изображении космического снимка со спутника Sentinel-2 (27.07.2020) в сочетании каналов 2, 3, 4 (зеленый, красный, ближний инфракрасный) ярким фиолетовым цветом (рис. 7).

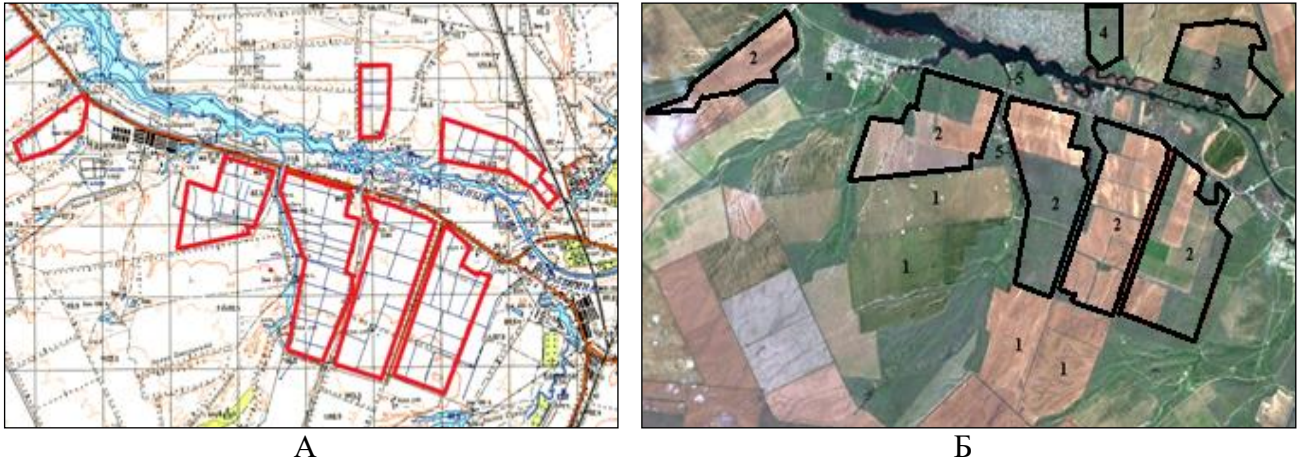


Рис. 5. Оросительные системы вдоль Волго-Донского канала: А – выделенные на топографической карте (М 1: 100000, 1984 г.) и Б – на космическом снимке (RGB; изображение со спутника Landsat OLI-8 (01.05.2016.)). *Условные обозначения.* Б: 1 – богарные земли, 2 – орошаемые массивы; 3 – орошаемые массивы с увеличенной площадью, 4 – заброшенный орошаемый массив (Горохова и др., 2020), 5 – оросительный канал.
Fig. 5. Irrigation systems along the Volga-Don Canal. *Legend:* А – on a topographic map of 1984 (scale 1: 100,000); Б – on a satellite image (RGB; obtained from the Landsat OLI-8 Satellite on 01/05/2016; 1 – lands for dry farming, 2 – irrigated lands, 3 – irrigated areas with an increased area, 4 – abandoned irrigated lands (Gorokhova et al., 2020), 5 – irrigation channel.

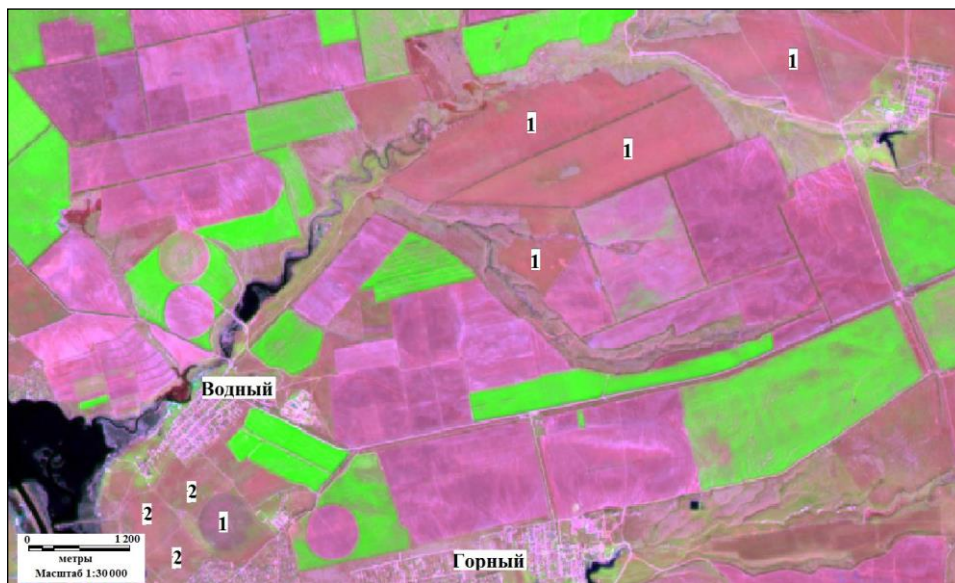


Рис. 6. Выделение многолетней залежи на изображении космического снимка со спутника Landsat-8 (04.04.2020) центральной части Волго-Донской ОС в сочетании каналов 7, 5, 4 (коротковолновый инфракрасный, ближний инфракрасный, красный; Горохова и др., 2021). *Условные обозначения:* 1 – залежь возрастом до 5 лет; 2 – залежь возрастом более 5 лет.
Fig. 6. Long-term fallow lands on a satellite imagery obtained from the Landsat-8 (04/04/2020) for the central part of the Volga-Don irrigation system in the channels 7, 5 and 4 (short-wave, infrared, near infrared and red; Gorokhova et al., 2021). *Legend:* 1 – fallows up to 5 years old, 2 – fallows over 5 years old.



Рис. 7. Выделение орошаемых массивов на изображении космического снимка со спутника Sentinel-2 (27.07.2020) в сочетании каналов 2, 3, 4 (зеленый, красный, ближний инфракрасный; Горохова и др., 2021). *Условные обозначения:* 1 – орошаемые массивы.
Fig. 7. Irrigated areas (1) on a Sentinel-2 image obtained on 27/07/2020, channels 2, 3 and 4 (green, red and near infrared; Gorokhova et al., 2021).

В период съемки орошаемых земель в мае-июне находящиеся в стадии зрелости озимые зерновые культуры на изображении хорошо отличаются от полей с кормовыми травами (рис. 8).



Рис. 8. Визуальное выделение полей с разными сельскохозяйственными культурами и многолетней залежью на космическом снимке (RGB, Landsat OLI-8, 01.05.2016; Горохова и др., 2020). *Условные обозначения:* 1 – озимые зерновые, 2 – кормовые травы, 3 – скошенные кормовые травы, 4 – пашня под паром, 5 – многолетняя залежь.
Fig. 8. Fields with different crops and perennial fallow lands on a RGB satellite image obtained from Landsat OLI-8 on 01/05/2016 (Gorokhova et al., 2020). *Legend:* 1 – winter cereals, 2 – fodder, 3 – mown fodder, 4 – fallow arable land, 5 – perennial fallow.

Результат выделения сельскохозяйственных культур на орошаемых землях в автоматическом режиме при обработке многозонального космического снимка сверхвысокого разрешения Pliedas (0.5 м) представлен на рисунке 9. Необходимо было разделить поля с разными культурами, для чего использовался алгоритм неконтролируемой классификации ISODATA (классификация изображения без обучения). Основным параметр, задаваемый перед обработкой, – число классов (3), которое необходимо было получить в итоге. В результате автоматической обработки снимка были определены поля с вызревшими озимыми культурами, убранные озимые культуры и кормовые травы (рис. 9).

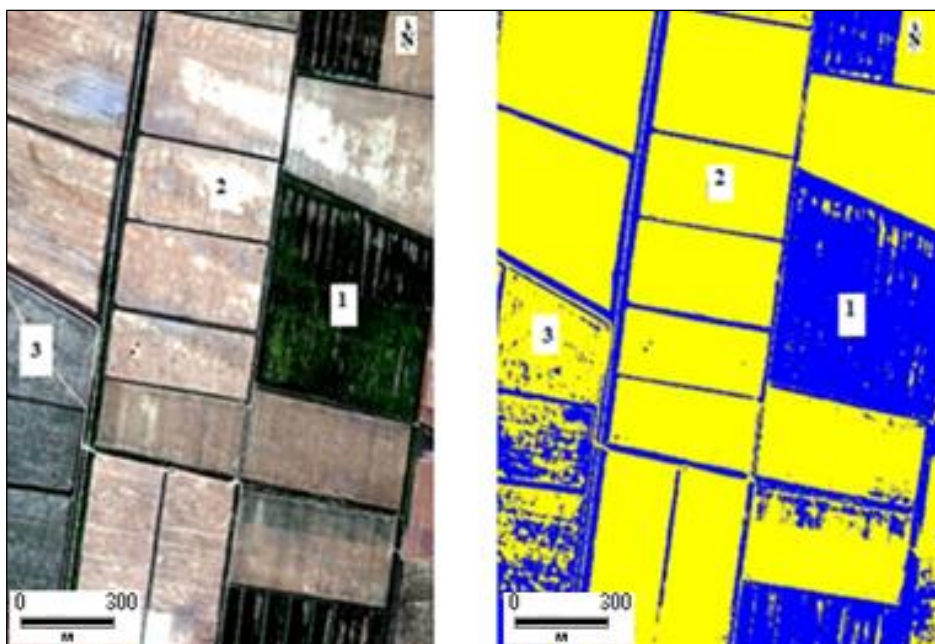
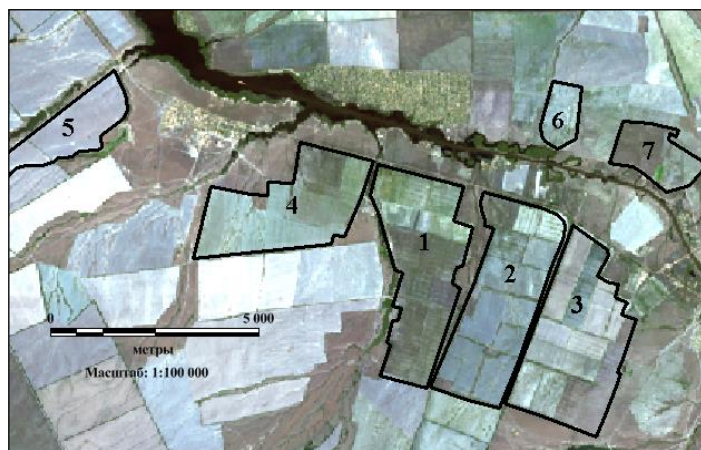


Рис. 9. Фрагмент космического изображения после неконтролируемой классификации (ISODATA) для выделения полей с различными сельскохозяйственными культурами по многозональному космическому снимку Pliedas (20.05.2015) на территории Волгоградской области (Горохова и др., 2018). *Условные обозначения:* 1 – кормовые травы; 2 – вызревшие озимые культуры; 3 – поля с убранными озимыми культурами. **Fig. 9.** Part of a multispectral Pliedas image (20/05/2015) after an unsupervised classification (ISODATA) to identify the fields with different crops in the Volgograd Region (Gorokhova et al., 2018). *Legend:* 1 – fodder field, 2 – ripe winter cereals, 3 – harvested winter cereals.

Выполнив визуально или с помощью специальных программ векторизацию массивов орошения, полей с разными сельскохозяйственными культурами и залежью, можно автоматизировано подсчитать площади всех объектов (рис. 10, 11).

Распознавание почвенных свойств орошаемых земель. Поверхность орошаемых полей часто характеризуется неоднородностью (пятнистостью), которая четко фиксируется на дистанционных материалах. В зависимости от свойств почв изображение полей различаются.

В качестве объектов изучения представлены массивы орошения Светлоярской оросительной системы в Волгоградской области, расположенные в разных природных районах: орошаемый массив Червленое находится на севере возвышенности Ергени, а массивы Светлоярский и Райгородский – в районе Северной Сарпинской низменной равнины Прикаспийской низменности (Доскач, 1979). Рассмотрим природные особенности районов исследования и состояние массивов орошения в прошлом и в настоящее время.

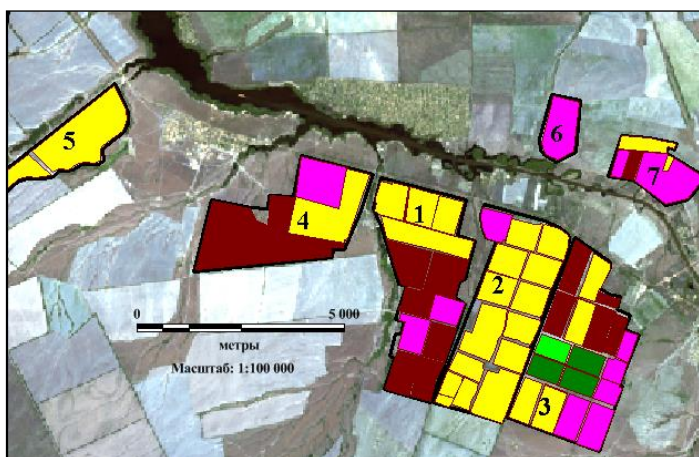


А

Номер_массива	Код	Объект	Площадь_га
1	0	Орошаемый массив	682,00
2	0	Орошаемый массив	749,00
3	0	Орошаемый массив	758,00
4	0	Орошаемый массив	612,00
5	0	Орошаемый массив	300,00
6	0	Орошаемый массив	100,00
7	0	Орошаемый массив	212,00
Всего			3 413,00

Б

Рис. 10. Орошаемые массивы вдоль Волго-Донского канала (А) и их площади (Б) (выделенные и просчитанные по синтезированному RGB-снимку Landsat-8 OLI (19.06.2015)) (Горохова и др., 2020). **Fig. 10.** Irrigated territory along the Volga-Don Canal (A) and its area (B), marked and calculated on a synthesized Landsat-8 OLI RGB-image obtained on 19/06/2015 (Gorokhova et al., 2020). *Legend:* 1-7 – irrigated areas; right column – their area, ha; bottom line – total area, ha.



А

Номер_массива	Код	Объект	Площадь_га
Всего	1	Озимые зерновые	1 708,00
	2	Кормовые травы	38,00
	3	Скошенные кормовые травы	126,00
	4	Пашня под паром	853,00
	5	Залежь	678,00

Б

Рис. 11. Поля с разными сельскохозяйственными культурами и залежью на орошаемых массивах вдоль Волго-Донского канала (А) и их площади (Б) (выделенные и просчитанные по синтезированному RGB-снимку Landsat-8 OLI (19.06.2015); Горохова и др., 2020).

Fig. 11. Fields with different crops and fallow lands in the irrigated territory along the Volga-Don Canal (A) and their area (B), marked and calculated on a synthesized Landsat-8 OLI RGB-image obtained on 19/06/2015 (Gorokhova et al., 2020). *Legend:* 1 – winter cereals, 2 – fodder fields, 3 – harvested fodder fields, 4 – leys, 5 – fallow lands; right column – their area, ha.

Для всей территории Волгоградской области характерно скудное и крайне неравномерное увлажнение почв за счет ливневых осадков; основной источник влаги – талые снеговые воды.

Ергенинская возвышенность в Волгоградскую область заходит своей северной частью.

Отметки поверхности здесь не превышают 150-180 м, преобладают водосборы и склоны речных долин и балок. Грунтовые воды до орошения на водосборах залегают на глубине 18-20 м, в понижениях – до 5 м. Минерализация воды составляла 1-10 г/л, меняясь от хлоридно-натриево-магниевых до сульфатно-кальциевых составов.

Почвенный покров до орошения был представлен комплексом светло-каштановых солонцеватых почв и солонцов (25-50 и > 50%) с невысокой долей участия лугово-каштановых почв. Почвообразующие породы – засоленные карбонатные лёссовидные суглинки и глины. Среди солонцов преобладали солонцы средние и глубокие, засоленные с 20-40 см преимущественно сульфатно-магниевых засоления, часто с участием соды в солонцовом горизонте (Дегтярева, Жулидова, 1970).

Начало освоения всех участков исследования под орошение относится к 60-м годам XX столетия.

В процессе орошения на массиве Червленое в конце 80-х и в начале 90-х годов уровень грунтовых вод (УГВ) доходил до критических значений и составлял 3-2.5 м, а на отдельных участках достигал 1.5-2 м. Это привело к развитию вторичного засоления почв на значительной площади. С середины 1990-х годов массив не орошался, а в 2000-х годах началось постепенное использование отдельных полей под орошение. В настоящее время УГВ залегают глубже 5 м.

Массив Червленое орошался и орошается водами из Волго-Донского канала. Минерализация его вод – гидрокарбонатно-натриевого состава, варьирует в диапазоне 0.72-0.84 г/л. Первоначально орошение проводилось поверхностным способом, но с 2000-х годов и по настоящее время применяется полив дождеванием.

Светлоярский и Райгородский массивы расположены в районе Северной Сарпинской низменной на равнине Прикаспийской низменности. Северная Сарпинская низменная равнина – это морская равнина раннехвалынской трансгрессии. Ее абсолютные высоты колеблются от 40-50 м на севере до 15-30 м в центральной части. В целом, район слабо дренирован. Общий тип ландшафта – суглинистая комплексная равнина, на фоне которой выделяются полосы лиманных и палинных лугов по ложбинам. Почвы преимущественно светло-каштановые солонцеватые в комплексе с солонцами (25-50% и >50%). В депрессиях почвы лугово-степные и луговые, в разной степени опресненные (Доскач, 1979).

Почвообразующие породы 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 (Дегтярева, Жулидова, 1970).

Светлоярский и Райгородский массивы орошались и орошаются водами из р. Волги гидрокарбонатно-кальциевых составов с минерализацией 0.4-0.5 г/л.

На Светлоярском массиве орошение в настоящее время проводится капельным способом и дождеванием, хотя на отдельных полях сохранился поверхностный полив. УГВ на данном участке не поднимался выше 3 м на протяжении всего периода эксплуатации. В настоящее время УГВ более 10 лет составляет >5 м.

На Райгородском массиве УГВ в начале 90-х годов доходил до критических значений и составлял 3-2.5 м, а на юге достигал 1.5-2 м. Это привело к возникновению на некоторых участках вторичного засоления почв в средней и сильной степени в метровой толще. В первую очередь засолялись почвы бывших палин, которые при близком залегании грунтовых вод подверглись процессу вторичного засоления. С середины 1990-х годов и по настоящее время массив не орошается и представляет собой многолетнюю залежь.

Все массивы в период строительства оросительной системы прошли жесткую планировку полей.

В ходе многолетних исследований на орошаемом массиве Червленое установлено, что пятнистость, связанная с вторичным засолением почв, проявляется в условиях высокого уровня грунтовых вод (2.5-1.5 м) и сопровождается образованием выпадов кормовых трав в виде светлых пятен различного размера и характеризует засоление почв до глубины 1 м в сильной степени, независимо от размера пятен. Темный тон на снимке с кормовыми травами отражает слабо-среднее засоление почв у полей с крупнопятнистым рисунком (100-500 м²) и незасоленные и слабозасоленные почвы на полях с мелко- и средне-пятнистым рисунком выпадов (<50 м² и 50-100 м² соответственно; рис. 12).

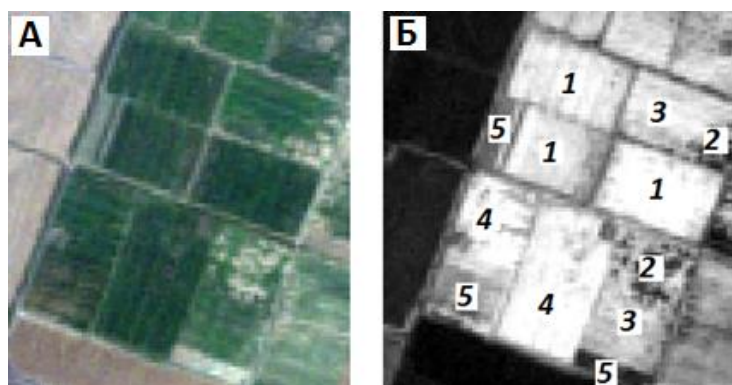


Рис. 12. Участок орошаемого массива Червленое (Светлоярская оросительная система, сухая степь Волгоградской области, возвышенность Ергени). *Условные обозначения:* А – RGB-снимок Landsat-8 OLI (август 1989 г.), Б – классифицированное по NDVI изображение с полями люцерны (уровень грунтовых вод – 2.5-1.5 м, Gorokhova, Pankova, 2021), 1 – незасоленные почвы, кормовая культура без пятен и выпадов (NDVI = 0.74-0.75), 2 – пятна вторично-засоленных почв в сильной степени (до 1 м) и лишённые растительности (NDVI = 0.18-0.27), 3 – слабо-средне засоленные почвы на полях вокруг крупных пятен выпадов культуры (NDVI = 0.59-0.66), 4 – незасоленные и слабозасоленные почвы на полях вокруг мелких и средних по размеру пятен выпадов культуры (NDVI = 0.65-0.71), 5 – скошенная культура. **Fig. 12.** Part of the “Chervlenoye” irrigated area (Svetloyarsk irrigation system, dry steppe of the Volgograd Region, Yergeni Upland). *Legend:* A – Landsat-8 OLI RGB-image obtained in August 1989, B – image of burclover fields, classified according to NDVI, with the groundwater level equal 2.5-1.5 m (Gorokhova, Pankova, 2021), 1 – nonsaline soils, fodder crop without any patches (NDVI = 0.74-0.75), 2 – bare patches of secondary heavily saline soils up to 1 m (NDVI = 0.18-0.27), 3 – weakly and averagely saline soils in the fields around large patches of absent crops (NDVI = 0.59-0.66), 4 – nonsaline and weakly saline soils in the fields around small and average patches of absent crops (NDVI = 0.65-0.71), 5 – harvested crops.

Также на орошаемых массивах Червленое и Светлоярский было определено, что светлая пятнистость, отражающаяся на снимках, может быть связана с карбонатностью пахотного горизонта почв. Выявлено, что в районе исследований встречаются два варианта формирования карбонатного профиля. Первый вариант окарбонирования – это срезка гумусового горизонта с последующей насыпкой смеси разных горизонтов во время производства планировки полей при строительстве оросительной системы. Насыпанный материал обычно содержит карбонаты. В некоторых случаях при планировке была срезана большая часть почвенного профиля почв, включая горизонт с белоглазкой. При втором варианте вторичное окарбонирование поверхностных горизонтов происходит за счет восходящего подтягивания почвенных растворов к поверхности в корнеобитаемый слой.

Оба варианта формирования карбонатного с поверхности горизонта почв рассматривались в более ранних работах (Барановская, Азовцев, 1981; Зимовец, 1991; Любимова, Дегтярева, 2000; Сиземская, 2013).

Срезка повышенных участков почв помимо выравнивания поверхности приводила к удалению 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.

Установлено, что пятнистость поверхностно-карбонатных почв стабильна, не зависит от уровня грунтовых вод и хорошо просматривается в полевых условиях и на космических снимках любого периода съемки и может параллельно встречаться с пятнами вторично-засоленных почв. Она отображается на открытой поверхности почвы, на полях с озимыми зерновыми культурами и достигает размеров 10-20 тыс. м². На полях с люцерной (полив по бороздам) поверхностно-окарбончатые почвы вызывают выпадения культуры площадью до 2-3 тыс. м². Согласно руководству (Soil Survey investigations ..., 1979), орошаемые почвы с повышенным содержанием карбонатов (>2-4%) способствуют образованию корки при высыхании. Корка влияет на агрофизические и агрохимические свойства почвы и препятствует появлению всходов культуры, поэтому важно знать содержание карбонатов в пахотном горизонте.

Чтобы отличить пятнистость, связанную с поверхностной карбонатностью почв, от пятен вторично-засоленных почв, необходимо проанализировать снимки с открытой поверхностью полей ранневесеннего периода, на которых карбонатные пятна хорошо идентифицируются в отличие от пятен засоления почв, которые не видны на открытой поверхности (кроме солончаков) и могут менять свои границы под кормовыми травами от сезона к сезону из-за динамичности процесса засоления.

Обнаружив, что изображение поверхностно-карбонатных почв на космических снимках имеет вид светлых пятен, встала задача определить, в какой мере пятнистость связана с количеством СаСО₃ в верхних горизонтах почвы, подтвердив ее полевыми исследованиями. Было определено, что содержание карбонатов в слое 0-25 см связано с изображением пятнистости на космическом снимке следующим образом: на крупных светлых пятнах (>1 тыс. м²) количество СаСО₃ в среднем по всем орошаемым участкам достигает >6% и 4-6% на мелких пятнах (от 100 м²), а в пределах остального фона – 0-4%. С глубиной содержание карбонатов может как снижаться, так и увеличиваться (рис. 13).

Оценка остаточного засоления по пятнам на полях проводилась на Райгородском орошаемом массиве. Райгородский массив в 90-х годах находился в сложных гидрогеологических условиях: на юге ключевого участка УГВ (воды сульфатно-натриевого состава) составлял 1.5-2 м, в результате чего образовались очаги вторично засоленных почв в сильной и средней степени. Это почвы бывших педин, которые при близком залегании грунтовых вод из-за более тесной связи с ними быстро подвергаются процессу вторичного засоления.

На современных снимках за счет сорного разнотравья очаги бывшего вторичного засоления почв выглядят как крупные темные пятна на многолетней залежи размером до 3500 м² (рис. 14). В настоящий период, когда УГВ находится глубже 5 м, происходит процесс постепенного рассоления почв по окраине пятна с сохранением засоленности почв в центре.

Засоление почв на глубине 50-100 см и глубже не всегда отражается на космических снимках. В этом случае для картографирования засоления почв необходимо использовать метод интерполяции (Kriging), поскольку почвы, засоленные на глубине более 100 см, остаются потенциально опасными и информация о количестве и распределении солей в них является важной. Приведем пример, когда на ОУ Червленое в программе Surfer-13 были

построены интерполяционные карты распределения средневзвешенной суммы токсичных солей (%) в слое 100-200 см (рис. 15). Для этого были использованы данные, предоставленные Волгоградской гидрогеолого-мелиоративной партией (2017-2018 гг.) и наши собственные полевые исследования за 2017 г.

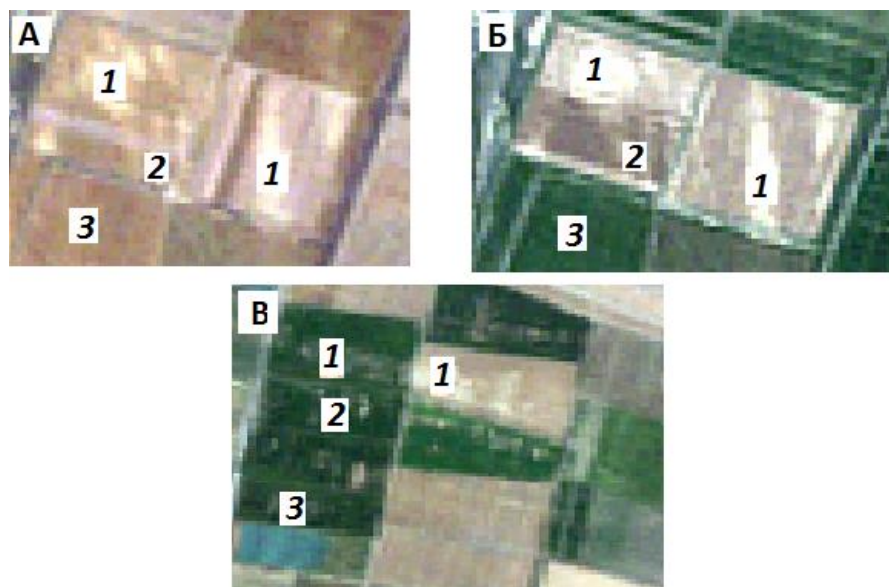


Рис. 13. Фрагменты RGB-снимков Landsat-8 OLI, отражающие поверхностно-окарбоначенные (0-25 см) почвы разных природных районов Светлоярской оросительной системы (сухая степь, Волгоградская область). *Условные обозначения:* А, Б – участок орошаемого массива Червленое, возвышенность Ергени (апрель 2018 г. – открытая поверхность почв, май 1989 г. – поля с озимыми зерновыми), В – участок орошаемого массива, Прикаспийская низменность (август 2018 г. – поля с озимыми зерновыми культурами и люцерной; Gorokhova, Pankova, 2021), 1 – крупные пятна с содержанием $\text{CaCO}_3 > 6\%$, 2 – мелкие пятна с содержанием $\text{CaCO}_3 = 4-6\%$, 3 – поле без пятен с содержанием $\text{CaCO}_3 = 0-4\%$. **Fig. 13.** Parts of the Landsat-8 OLI RGB-images with soils calcimorphic on the surface (0-25 cm) in different natural regions of Svetloyarsk irrigation system (dry steppe of the Volgograd Region). *Legend:* A, B – part of the “Chervlenoye” irrigated territory in the Yergeni Upland (April 2018 – open soil surface, May 1989 – fields with winter cereals), C – part of the irrigated territory in the Caspian Lowland (August 2018 – fields with winter cereals and burclover; Gorokhova, Pankova, 2021), 1 – large patches with $\text{CaCO}_3 > 6\%$, 2 – small patches with $\text{CaCO}_3 = 4-6\%$, 3 – field without any patches, $\text{CaCO}_3 = 0-4\%$.

На глубине 100-200 см на обоих массивах почвы имеют горизонты преимущественно средней и сильной степени засоления. Только в почвах на юго-востоке западного массива во втором метре засоление слабое или даже отсутствует. Иными словами, на большей части участка во втором метре почвенного профиля присутствует существенное количество легкорастворимых солей, которые в случае подъема УГВ могут переместиться выше по профилю.

По данным водной вытяжки 1:5, химизм засоления почв на орошаемых массивах преимущественно хлоридно-сульфатный, иногда сульфатный и сульфатно-хлоридный.

Таким образом, проведенные исследования на орошаемых участках Светлоярской оросительной системы, расположенные в разных природных районах сухостепной зоны Волгоградской области, в 90-х годах прошлого века и в настоящее время показали, что

неоднородность полей, отраженная на космических снимках, может носить диагностический характер, но имеет разные причины происхождения. Причина возникновения пятнистости связана с гидрогеологическими условиями и свойствами почв, планировкой полей во время строительства оросительной системы и длительным периодом орошения, а рисунок пятнистости зависит от того, возделывается ли на поле культура, является ли поле открытой поверхностью или залежью, поэтому интерпретация дистанционных материалов требует обязательного изучения современной обстановки района исследований и обоснования причин появления пятнистости на основе полевых и лабораторных исследований.



Рис. 14. Райгородский орошаемый участок. Многолетняя залежь на космическом снимке Landsat-8 (19.06.2015), УГВ > 5 м (А). Очаги бывшего вторичного засоления почв (Б) выглядят как крупные темные пятна (за счет проседания поверхности из-за отсутствия повторных планировок и бурного развития сорного разнотравья вследствие скопления атмосферных осадков). В настоящий период здесь происходит процесс постепенного рассоления почв по окраине пятна с сохранением засоленности почв в центре пятна в слабосредней степени (Горохова, Панкова, 2017). **Fig. 14.** Raygorod irrigated territory with a perennial fallow land (A) on a Landsat-8 image obtained on 19/06/2015 (groundwater level >5 m), and foci of the former secondary soil salinization (B) that look like large dark spots due to the sagging surface caused by the lack of secondary planning and by the intense growth of weeds after a precipitation accumulation. Currently, the soils in this undergo a gradual desalination on the edge of the patch, while remaining weakly and averagely saline in its center (Gorokhova, Pankova, 2017).

1.4. Полевые исследования

Цель работ полевых исследований – изучение современного состояния почвенного покрова, подтверждение связи между изображением на снимке и почвами на местности, а также снятие вопросов, возникших при составлении предварительной карты по космическим снимкам.

На основе предварительной карты проводятся полевые работы по плану, намеченному в предполевой период. Рекогносцировочные маршрутные исследования сопровождаются заложением опорных разрезов для оценки свойства почв в пределах различных ландшафтов.

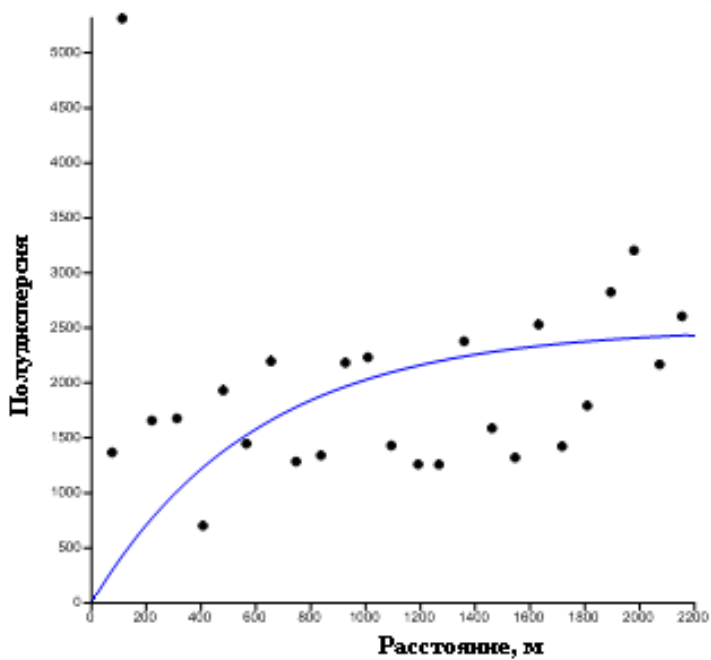
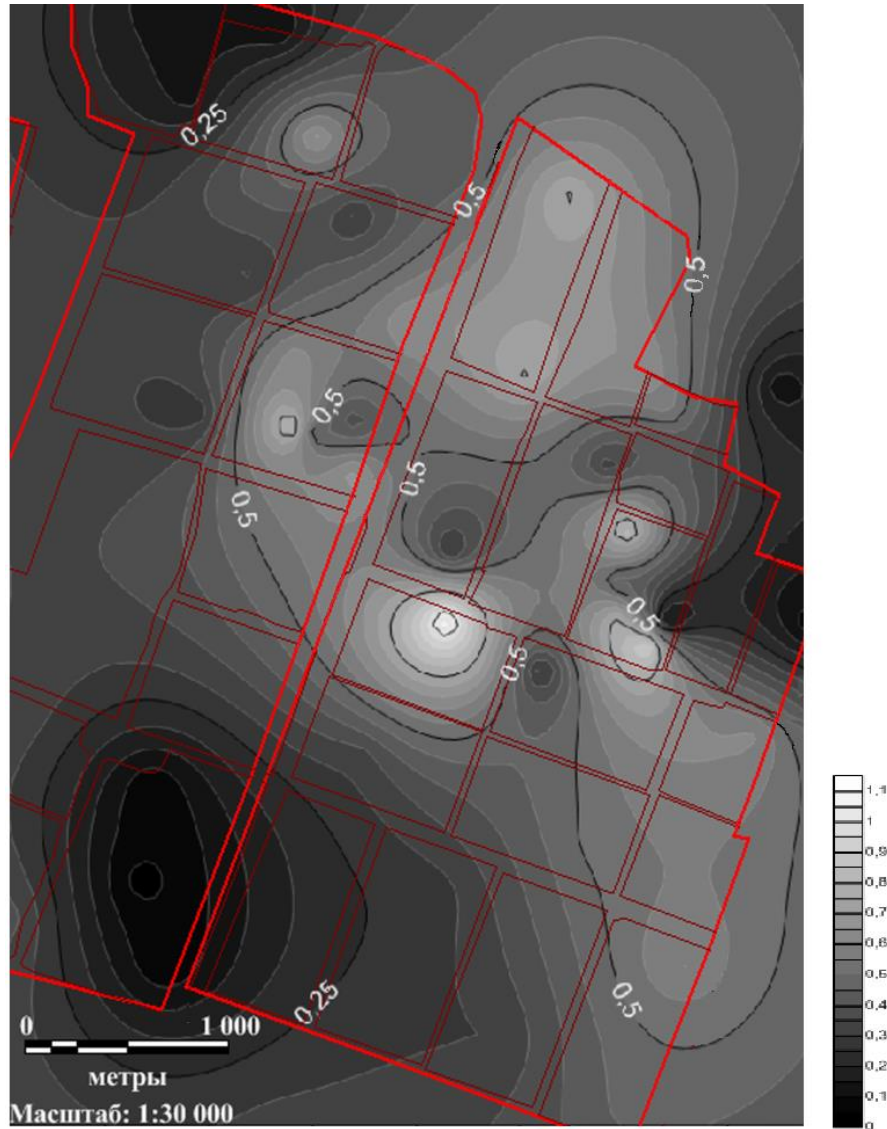


Рис. 15. Вариограмма и карта пространственного распределения содержания средневзвешенной суммы токсичных солей ($S_{\text{токс}}$, %) в слое 100-200 см (Горохова и др., 2020). **Fig. 15.** Variogram and map of the spatial distribution for the concentration of the weighted mean sum of toxic salts (S_{tox} , %) in a layer of 100-200 cm depth (Gorokhova et al., 2020).

В ходе маршрутных исследований определяются также места проведения более детальных ключевых и профильных исследований, цель которых – подтвердить тесноту связи между изображением на снимке и почвами, уточнить информацию, полученную в результате предварительного дешифрирования снимка. Профили и точки опробования необходимо привязывать при помощи спутниковых навигаторов. В пределах картографируемой территории количество почвенных разрезов должно примерно соответствовать утвержденным ранее нормативам: 1-1.5 разреза на 1 км² почвенной съемки в масштабе 1:50000, 2-3 разреза в масштабе 1:25000, 6-7 разрезов в масштабе 1:10000 (табл. 3).

Таблица 3. Количество основных почвенных выработок, закладываемых при почвенной съемке (Инструкция по почвенным изысканиям ..., 1975). **Table 3.** Number of main soil profiles for the soil survey (Instructions on soil surveys ..., 1975).

Масштаб	Категория сложности почвенного покрова*			1 разрез на площадь, га	1 разрез на площадь, га**
	1	2	3		
	Количество почвенных выработок на 1 км**				
1:200000	0.08	0.11	0.15	1250-670	–
1:100000	0.2	0.25	0.33	500-300	200
1:50000	0.75	0.90	1.20	134-83	50
1:25000	1.5	2.0	2.5	66-40	12.5
1:10000	3.0	5.6	6.7	33-14	2
1:5000	8.0	12.0	15.0	12-7	0.5
1:2000	20.0	25.0	35.0	5-3	–

Примечания к таблице 3: * – категория сложности определяется процентом участия неоднородных компонентов в почвенных контурах (1 категория – 15%, 2 категория – 15-30%, 3 категория – более 30%), ** – количество шурфов дано согласно руководству ФАО (Soil Survey Investigations for Irrigation FAO UN, 1979). **Notes to Table 3:** * – complexity is defined by the participation percentage of heterogeneous components in the soil (category 1 – 15%, category 2 – 15-30%, category 3 – more than 30%), ** – the number of profiles is given according to “Soil Survey Investigation for Irrigation” (1979).

Исследования предусматривают заложение трансект – почвенно-геоморфологических профилей, охватывающих все позиции ландшафта. По этим материалам на предварительных картах уточняют список почв, почвенных комплексов, почвообразующих и подстилающих пород.

Ключевые исследования проводят с целью типизации почвенных неоднородностей и выявления ландшафтно-индикационных связей. Необходимо охватывать ключевыми исследованиями основные типы фотоизображения на космическом снимке. Выбор мест заложения ключевых участков проводится также с учетом сельскохозяйственного использования территории. Это позволит проанализировать связь почвенной неоднородности с пестротой урожая (Сорокина, 2006).

Во время полевых работ применяют следующие точки опробования: основные разрезы, прикопки и буровые скважины.

Основные разрезы закладываются на наиболее типичных позициях рельефа для изучения полного профиля почвы. Они должны вскрывать все генетические горизонты почв и верхнюю часть почвообразующей породы. Глубина разрезов составляет 1.5-2.5 м.

Прикопки закладывают для уточнения границ распространения почвенных разностей и выяснения изменчивости их свойств (мощности гумусового горизонта, глубины залегания солевого, солонцового, карбонатного, гипсового горизонтов). Прикопки используют также для выявления долевого участия компонентов почвенного покрова в пределах неоднородного контура и для дешифрирования фотоизображения – по соответствию прикопок разным тональным пятнам на космоснимке. Глубина прикопок на различных почвах колеблется в пределах 0.4-0.75 м.

Буровые скважины имеют то же значение, что и прикопки. Их используют также для характеристики почвообразующих и подстилающих пород, установления глубины залегания грунтовых вод.

В ходе полевых работ проводится сбор образцов для почвенной характеристики и отдельно для характеристики засоленности почв. Для оценки засоленности почв образцы отбираются из каждого почвенного разреза по генетическим горизонтам до глубины 1-2 м. Ниже отбираются смешанные образцы по слоям 50 см. В том случае, если отмечается литологическая неоднородность почвообразующих и подстилающих пород, это необходимо учитывать при отборе образцов, не допуская смешивания разных слоев породы.

Для более полной аналитической характеристики почвенных свойств из типичных разрезов (~10-15% от общего количества разрезов) отбираются образцы для определения содержания гумуса, карбонатов, гипса, обменных катионов. Анализ гранулометрического состава проводится выборочно, с учетом его изменчивости по профилю и в пределах картируемой территории. В опорных разрезах отбираются на анализ образцы грунтовой воды.

Полевой этап исследования завершается составлением: 1) карты фактического материала, отражающей весь объем выполненных в поле исследований; 2) полевой почвенной карты; 3) заявкой на выполнение аналитических работ.

Полный химический анализ содержания и состава солей делается для части разрезов, заложенных при картографировании (около 20%). В остальных образцах засоленность можно оценить по сокращенной водной вытяжке (содержание Na для почв преимущественно сульфатного засоления и Cl для почв преимущественно хлоридного засоления; Засоленные почвы России, 2006).

1.5. Обработка результатов полевых и камеральных исследований, окончательное составление карт

После завершения полевых работ и получения результатов химических анализов начинается этап по созданию серии векторных карт-слоев, отражающих всю собранную информацию – об использовании земель, о почвенном покрове и свойствах почв на момент исследования. Проводится окончательное формирование легенды к каждому слою карты и подсчет площадей. Заканчивается работа составлением почвенного отчета. Таким образом, на заключительном этапе делается корректировка карты с учетом полевых обследований, лабораторных анализов и на базе завершающей обработки снимка.

В завершающей стадии обработки многозонального космического снимка проводится его автоматизированная классификация, которая предполагает программное распознавание объектов, с использованием обучающих выборок. Это контролируемая классификация (Supervised Classification) или классификация с обучением.

Существует несколько способов контролируемой классификации, но независимо от того, какой способ выбран, контролируемая автоматическая классификация проходит следующие этапы обработки:

– первый этап заключается в определении, какие классы объектов будут выделены в

результате выполнения процедуры (определяется пользователем);

- на втором этапе для каждого из классов объектов формируется обучающая выборка (создается пользователем);

- третий этап – вычисление параметров «спектрального образа» каждого из классов, сформированного в результате набора эталонных пикселей из обучающих выборок;

- четвертый этап – просмотр всего изображения и отнесение каждого пикселя к тому или иному классу.

Контролируемая классификация выполняется только при наличии для каждого выделяемого класса эталонных выборок, основанных на полевых наблюдениях.

Методов классификации достаточно много, но широко распространены три метода классификации с обучением:

1. Классификация по минимальному расстоянию (Minimum Distance). Смысл метода заключается в отнесении пикселя к тому эталонному классу, евклидово расстояние до центра которого в пространстве признаков минимально. Этот способ целесообразно использовать при ограниченном числе классов.

2. Метод параллелепипедов (BoxClassifier) основан на статистическом подходе. Он заключается в отнесении пикселей изображения к эталонным классам, в качестве характеристик которых задаются некоторые интервалы значений яркости. Они выбираются в результате анализа гистограммы распределения яркости на изображении. Метод дает хорошие результаты, если спектральные характеристики объектов не пересекаются в пространстве признаков.

3. Метод максимального правдоподобия (Maximum Likelihood) также основан на статистическом подходе. Смысл его сводится к определению вероятности попадания пикселя в тот или иной класс. Этот метод обычно применяют в случаях, когда спектральные характеристики классов объектов мало различаются, как это часто бывает при распознавании почв и растительных сообществ.

Существует также способ расстояния Махаланобиса (Mahalanobis distance), где используется статистика для каждого класса, способы минимального расстояния, спектрального угла, двоичного кодирования, нейросетевая классификация, дерево принятия решений, объектно-ориентированная классификация (Чандра, Гош, 2008; Шовенберг, 2013; Руководство пользователя ENVI ..., 2014)

Невозможно объявить, что один классификатор лучше, чем другой. Их результативность в значительной степени зависит от исходных данных (изображения).

Формирование обучающей выборки для обработки снимка имеет особое значение, поскольку от ее качества в решающей степени зависит точность классификации. Качество обучающей выборки оценивается следующими категориями:

- репрезентативность или представительность совокупности значений яркости в выборке; определяется по точности отнесения к заданному классу;

- однородность: отсутствие нехарактерных для класса значений яркости; оценивается по величине стандартного отклонения значений яркости от среднего;

- различимость: достаточное различие спектральных яркостей классов, минимальное перекрытие диапазонов классов (применяют такие параметры, как мера разделимости Джеффриса-Матусита и др.; Книжников, 2011; Шовенберг, 2013).

Чтобы точность классификации снимка была удовлетворительной, обработку (классификацию) лучше проводить для разных категорий земель отдельно. Территории, не подлежащие анализу (поселки, дороги и др.), предварительно исключают из обработки снимка с помощью их маскирования.

В основу обучающих выборок могут быть положены яркостные характеристики

(значения спектральной яркости, NDVI), их статистические параметры и модели, применяемые в разных каналах (Rouse et al., 1973; BEGA-PRO, 2022).

Созданная с использованием классификации снимка карта орошаемых почв должна отражать структуру почвенного покрова и позволить автоматически рассчитать площади орошаемых почв и долю участия каждого компонента почвенного покрова на поле.

Результатом проведенных работ становится итоговая ГИС изучаемого района, которая включает следующую картографическую, атрибутивную и текстовую информацию:

1. Картографическая информация:

- 1.1. Снимки высокого и сверхвысокого разрешения на период исследования;
- 1.2. Снимки разных лет до периода исследования (по возможности);
- 1.3. Карта фактического материала;
- 1.4. Карта землепользования;
- 1.5. Почвенная карта.

2. Атрибутивная информация:

- 2.1. Описания разрезов (к карте фактического материала);
- 2.2. Данные химических анализов (к карте фактического материала);

3. Текстовая информация (объяснительная записка к картам):

- 3.1. Физико-географические условия района исследования;
- 3.2. Характеристика имеющихся картографических материалов и снимков;
- 3.3. Описание метода и результатов классификации изображения на снимке;
- 3.4. Описание, характеризующее глубину грунтовых вод и их минерализацию, степень засоления и состав солей; верхнюю границу гипсового и карбонатного горизонтов и содержание гипса и карбонатов (в %) по слоям в разных типах почв, глубину, степень засоления и химизм засоления почв исследуемой территории.

В качестве примера приведем дешифрирование мультиспектрального космического снимка сверхвысокого разрешения Pleiades (20.05.2015) на территорию Светлоярского ОУ, где мы использовали обучающие выборки, основанные на полевых исследованиях. Выборки охватывали участки полей люцерны с выпадями и в хорошем состоянии, полей с озимой пшеницей на пятнах и в понижениях, обязательно на точках опробования.

Качество созданных обучающих выборок определяли согласно следующим критериям (Книжников и др., 2011): 1) репрезентативности – представительности совокупности значений яркости в выборке, для этого каждый класс представлялся несколькими (3-5) эталонными участками, 2) однородности – отсутствию нехарактерных для класса значений яркости, которые оцениваются по величине стандартного отклонения значений яркости от среднего, чтобы придерживаться этого принципа, каждый тип почв, имеющий разную яркость на полях из-за уборки культуры или зарастания сорняками, был представлен несколькими выборками, которые уже на постклассификационном этапе обработки снимка объединяли в один класс, значения стандартного отклонения (%) от средней яркости, рассчитанные по всем классам в четырех каналах, варьирует от 2.7 до 16.0%, что вполне допустимо, 3) различимости – достаточному различию спектральных яркостей классов, для этого использовали два параметра: меру разделения Джеффриса-Матусита и преобразованную дивергенцию (Transformed Divergence), значения которых не должны превышать 1.7 и должны стремиться к 2, в наших выборках оба параметра варьировали в пределах 1.76-2.0.

Для классификации снимка использовали автоматический классификатор спектрального угла (Spectral Angle Mapper), в котором все пиксели снимка, в том числе и обучающих выборок, рассматриваются как векторы в пространстве спектральных признаков. Для каждого класса задается максимально допустимый спектральный угол, то есть угол

между эталонным вектором и вектором пиксела, который подвергается классификации. В случае если спектральный угол меньше максимального, то пиксел относится к данному классу, если больше – не относится. Способ спектрального угла дает хорошие результаты, когда нужно провести классификацию для объектов, имеющих схожие значения яркости во всех спектральных диапазонах (Шовенгердт, 2013).

После классификации и генерализации изображения была проведена векторизация контуров. Результаты классификации, векторизации и составления карты представлены на рисунке 16.

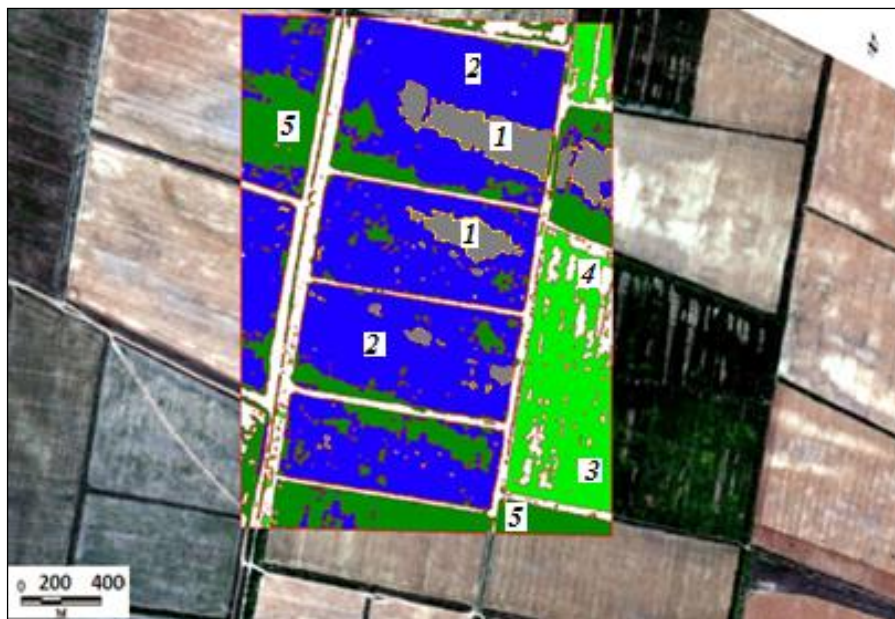


Рис. 16. Фрагмент почвенной карты для Светлоярского орошаемого участка (прямоугольник в центре) на фоне космического снимка сверхвысокого разрешения Pliedas (20.05.2015; Горохова и др., 2018). *Условные обозначения:* 1 – почвы светлокаштановые карбонатные (вскипающие с поверхности) глубокосолончаковатые под озимыми зерновыми; 2 – светлокаштановые карбонатные (вскипающие с глубины 15-20 см) глубоко-солончаковатые под озимыми зерновыми культурами; 3 – светлокаштановые карбонатные (вскипающие с глубины 15-20 см) глубокосолончаковатые под люцерной; 4 – светлокаштановые карбонатные (вскипающие с поверхности) под выпадами люцерны; 5 – лугово-каштановые (темноцветные) почвы педин и потяжин. **Fig. 16.** Fragment of a soil map for the Svetloyarsk irrigated area (inner rectangle) with the background of an ultra-high resolution Pliedas image obtained on 20/05/2015 (Gorokhova et al., 2018). *Legend:* 1 – light chestnut calcareous (surface effervescence) deeply alkaline soils under winter cereals, 2 – light chestnut calcareous (effervescence starts at 15-20 cm) deeply alkaline soils under winter cereals, 3 – light chestnut calcareous (effervescence starts at 15-20 cm) deeply alkaline soils under burclover, 4 – light chestnut calcareous (surface effervescence) under scarce burclover, 5 – meadow-chestnut (black earth) soils of gorges and round depressions.

1.6. Проверка и оценка точности карты

Проверка и оценка точности карты может производиться:

а) путем сравнения с картами аналогичного или более крупного масштаба, составленными по данным полевых наблюдений.

б) путем оценки точности проведенной классификации снимка.

Достоверность классификации вначале оценивают визуально, выявляют грубые промахи и несоответствия. Затем переходят к количественной оценке, сравнивая результаты классификации с тестовыми участками, в качестве которых могут использоваться результаты наземных наблюдений, карты и снимки крупного масштаба. Если результаты классификации не удовлетворяют исполнителя, он уточняет обучающую выборку (например, путем деления крупных классов на более мелкие), и затем повторяет процесс.

Далее проводят оценку точности проведенной классификации. Такой анализ можно провести посредством матрицы несоответствия, с расчетами общей точности (OverallAccuracy), коэффициента Каппа (KappaCoefficient), ошибок пропуска (Omission) и ложного определения (Commission), точности пользователя (Useraccuracy) и производителя (Produceraccuracy).

Матрица несоответствия представляет собой квадратную матрицу с количеством строк и столбцов равным количеству классов. В диагональных элементах матрицы – значения равные количеству верно классифицированных пикселей в каждом классе. Сумма значений диагональных элементов показывает общее количество правильно классифицированных пикселей, а отношение этого количества к общему количеству пикселей в матрице и называется общей точностью классификации.

Для оценки общей достоверности классификации также используют коэффициент Каппа, вычисляемый по формуле:

$$k = \frac{N \sum_{i=1}^n x_{ij} - \sum_{i=1}^y x_{i+} \cdot x_{+i}}{N^2 - \sum_{i=1}^r x_{i+} \cdot x_{+i}}$$

где x_{ij} – диагональные элементы матрицы ошибок; x_{i+} – суммарное количество пикселей по строке i ; x_{+i} – суммарное количество пикселей по столбцу; N – общее количество пикселей в матрице; n – количество классов.

Если индекс Каппа составляет ≤ 0.5 , то результат общей классификации считается неудовлетворительным.

Ошибка пропуска – количество пикселей, ошибочно не попавших в данный класс. Ошибка ложного определения (комиссии) – количество пикселей, ошибочно присоединенных к данному классу.

Точность производителя – процент пикселей того или иного класса, которые были верно классифицированы. Данный показатель рассчитывается делением каждого диагонального элемента матрицы несоответствий на общее количество пикселей в соответствующем столбце. С помощью данного параметра можно оценить насколько хорошо результат классификации для того или иного класса совпадает с проверочными данными.

Схожий показатель рассчитывается для реального класса, делением количества верно классифицированных пикселей класса на общее количество пикселей в этом классе согласно проверяемым данным (общее число пикселей в соответствующих строках матрицы). Этот показатель называют точностью пользователя. Он показывает вероятность того, что пиксели класса (проверяемого изображения) попадут в соответствующий класс (проверочного изображения).

Для осуществления такого анализа необходимо, чтобы наземная информация, карты (или обучающие выборки), составленные в процессе полевых исследований, были представлены в виде классифицированного изображения. Затем проводят сравнение всего классифицированного изображения с классифицированным изображением выборок. (Руководство пользователя ENVI ..., 2014).

Перевод данных наземного наблюдения в классифицированное изображение и расчет параметров матрицы несоответствия можно осуществлять в любой высокоуровневой

программе по обработке изображений.

Практический опыт показывает, что достоверности классификации в 90-95% можно добиться для 2-3 классов. Удовлетворительными считаются результаты, если правильно определены 70-85% классифицируемых объектов (Лабутина, Балдина, 2011).

Выводы

1. Орошаемые почвы всегда представляют собой сложный объект картографирования, как традиционными методами, так и методами с привлечением дистанционной информации, что вызвано высокой антропогенной деформацией почвенного покрова и изменением природных факторов почвообразования, вызванных планировкой полей, длительным периодом орошения, гидрогеологическим режимом и др.

2. Сельскохозяйственные культуры в различных гидрогеологических условиях по-разному реагируют на лимитирующие факторы, поэтому при составлении карт необходимо придерживаться следующих этапов картографирования: 1) создать карту землепользования для выделения полей с разными культурами и залежью; 2) выявить наличие пятен с разреженностью или отсутствием сельскохозяйственных культур на снимках; 3) в полевых условиях и на базе проведенных анализов отобранных почвенных образцов изучить современный почвенный покров, морфологию и характер отображения почв на снимке, установить причину пятен, выявленных по изображению; 4) используя результаты полевых исследований подобрать алгоритм обработки для классификации снимков, составить легенды к картам; 6) для глубокозасоленных почв построить солевую карту с помощью автоматизированного метода интерполяции точечных данных по материалам полевых исследований.

3. Следует помнить, что полученные дешифровочные признаки современного состояния орошаемых почв и их засоления не могут быть экстраполированы для составления карт других похожих регионов, т.к. природные связи у орошаемых почв существенно нарушены, велико воздействие антропогенных факторов и в каждом конкретном случае должен осуществляться индивидуальный подход к картографированию, основанный на связи изображения почв на снимке и реальным почвенным покровом.

4. Пятнистость орошаемых полей, отраженная на космических снимках, имеет разную природу и поэтому интерпретация дистанционных материалов требует обязательного изучения особенностей района исследований и обоснования причин появления пятнистости на основе полевых работ и лабораторных анализов почвенных образцов.

5. Пятнистость связанная с карбонатностью поверхностного горизонта почв (0-25 см) не зависит от уровня грунтовых вод и лучше всего просматривается на космических снимках с открытой поверхностью почв.

6. Пятнистость связанная с вторичным и остаточным засолением почв определяется по состоянию растительности, поэтому важен период проведения космической съемки, отражающий высокую вегетационную активность растений. Необходимы также сведения об уровне грунтовых вод, поскольку критический уровень грунтовых вод является основной причиной возникновения процесса вторичного засоления почв.

7. Проверка и оценка точности карты может производиться путем визуального сравнения с картами более крупного масштаба, составленными по данным полевых наблюдений и путем оценки точности проведенной классификации снимка. Достоверность классификации определяется посредством матрицы несоответствия (Overall Accuracy), коэффициента Каппа (Kappa Coefficient), ошибок пропуска (Omission) и ложного определения (Commission), точности пользователя (User accuracy) и производителя (Producer accuracy).

Если классификация получилась неудовлетворительной, то необходимо уточнить обучающую выборку и затем повторить процесс.

Финансирование. Работа выполнена по теме государственных заданий № 0439-2022-0009 «Изучить трансформацию, эволюцию и деградацию почвенного покрова агроландшафтов на разных уровнях организации, включая внутритропическую неоднородность с использованием сочетания наземных обследований и цифровых технологий».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

REFERENCES

1. Алдошин С.С., Горбачева Е.Н., Мышляков С.Г., Скачкова А.С. 2015. Космический мониторинг сельскохозяйственного землепользования Калужской области // *Геопрофи.* № 4. С. 10-14.
2. Антипов-Каратаев И.Н. 1953. Мелиорация солонцов в СССР. М.: Изд-во АН СССР. 563 с.
3. Аринушкина Е.В. 1970. Руководство по химическому анализу почв. М.: Изд-во МГУ. С. 387-421.
4. Барановская А.В., Азовцев В.И. 1981. Влияние орошения на миграцию карбонатов в почвах Поволжья // *Почвоведение.* № 10. С. 17-26.
5. ВЕГА-ПРО. 2022. Спутниковый сервис анализа вегетации [Электронный ресурс <http://pro-vega.ru/> (дата обращения 03.02.2023)].
6. Горохова И.Н., Панкова Е.И. 2017. Природа пятнистости орошаемых почв сухостепной зоны (на примере Светлоярской оросительной системы) // *Аридные экосистемы.* Т. 23. № 3 (72). С. 44-54. [*Gorokhova I.N., Pankova E.I.* 2017. The nature of the patchiness of irrigated soils in the dry steppe zone (on example of the Svetloyarskaya irrigation system) // *Arid Ecosystems.* Vol. 7. No. 3. P. 161-170.]
7. Горохова И.Н., Панкова Е.И., Харланов В.А. 2019. Изменения мелиоративного состояния орошаемых почв Волгоградской области в XXI веке //
1. Aldoshin SS, Gorbacheva EN, Myshlyakov SG, Skachkova AS. Space monitoring of agricultural land use in the Kaluga region [*Kosmicheskii monitoring sel'skokhozyaystvennogo zemlepol'zovaniya Kaluzhskoy oblasti*] *Geoprofi.* 2015;4:10-14.
2. Antipov-Karataev IN. Reclamation of solonchaks in the USSR [*Melioratsiya solontsov v SSSR*]. Moscow: Izd-vo AN SSSR, 1953:563.
3. Arinushkina EV. Guide to the chemical analysis of soils [*Rukovodstvo po khimicheskomu analizu pochv*]. Moscow: Izd-vo MGU, 1970:387-421.
4. Baranovskaya AV, Azovtsev VI. Effect of irrigation on the migration of carbonates in the soils of the Volga region [*Vliyaniye orosheniya na migratsiyu karbonatov v pochvakh Povolzh'ya*] *Eurasian Soil Science [Pochvovedeniye]*. 1981;10:17-26.
5. VEGA-PRO. Satellite service for vegetation analysis [*Sputnikovyy servis analiza vegetatsii*]. 2022, Available at <http://pro-vega.ru/> (Date of Access 03/02/2023).
6. Gorokhova IN, Pankova EI. The nature of the patchiness of irrigated soils in the dry steppe zone (on example of the Svetloyarskaya irrigation system). *Arid Ecosystems.* 2017;7 (3):161-170.
7. Gorokhova IN, Pankova EI, Kharlanov VA. Changes in the ameliorative state of irrigated soils in the Volgograd region in the 21st century [*Izmeneniya meliorativnogo sostoyaniya oroshayemykh pochv Volgogradskoy oblasti v XXI veke*] *Eurasian Soil Science [Pochvovedeniye]*. 2019;3:1-18.
8. Gorokhova IN, Pankova EI, Chursin IN. Development of Methodological Approaches for the Assessment of the Status of Irrigated Lands in the South of the European Part of Russia

- Почвоведение. № 3. С. 1-18.
8. Горохова И.Н., Панкова Е.И., Чурсин И.Н. 2020. Методические подходы к разработке мониторинга орошаемых земель юга Европейской части России на основе материалов космической съемки // Аридные экосистемы. Т. 26. № 1 (82). С. 84-93. [Gorokhova I.N., Pankova E.I., Chursin I.N. 2020. Development of Methodological Approaches for the Assessment of the Status of Irrigated Lands in the South of the European Part of Russia Based on Space-Surveying Materials // Arid Ecosystems. Vol. 10. No. 1. P. 70-78.]
 9. Горохова И.Н., Хитров Н.Б., Прокопьева К.О., Харланов В.А. 2018. Почвенный покров Светлоярской оросительной системы через полвека мелиоративных воздействий // Почвоведение. № 8. С. 1-18.
 10. Горохова И.Н., Чурсин И.Н., Хитров Н.Б., Панкова Е.И. 2021. Распознавание сельскохозяйственных угодий по космическим снимкам // Экосистемы: экология и динамика. Т. 5. № 3. С. 5-33. [Gorokhova I.N., Chursin I.N., Khitrov N.B., Pankova Ye.I. 2021. Agricultural Lands Identification on the Satellite Imagery // Ecosystems: Ecology and Dynamics. Vol. 5. No. 3. P. 34-59].
 11. Дегтярева Е.Т., Жулидова А.И. 1970. Почвы Волгоградской области. Волгоград: Нижне-Волжское изд-во. 319 с.
 12. Доклад о состоянии и использовании земель сельскохозяйственного значения Российской Федерации в 2020 г. 2022. М.: ФГБНУ «Росинформагротех». 384 с.
 13. Доскач А.Г. 1979. Природное районирование Прикаспийской Based on Space-Surveying Materials. *Arid Ecosystems*. 2020;10 (1):70-78.
 9. Gorokhova IN, Khitrov NB, Prokopyeva KO, Kharlanov VA. Soil cover of the Svetloyarsk irrigation system after half a century of reclamation impacts [Pochvennyy pokrov Svetloyarskoy orositel'noy sistemy cherez polveka meliorativnykh vozdeystviy] *Eurasian Soil Science [Pochvovedeniye]*. 2018;8:1-18.
 10. Gorokhova IN, Chursin IN, Khitrov NB, Pankova YeI. Agricultural Lands Identification on the Satellite Imagery. *Ecosystems: Ecology and Dynamics*. 2021;5 (3):34-59.
 11. Degtyareva ET, Zhulidova AI. Soils of the Volgograd region [*Pochvy Volgogradskoy oblasti*]. Volgograd: Nizhne-Volzhskoye izd-vo, 1970:319.
 12. Report on the state and use of agricultural land of the Russian Federation in 2020 [Doklad o sostoyanii i ispol'zovanii zemel' sel'skokhozyaystvennogo znacheniya Rossiyskoy Federatsii v 2020 g.]. Moscow: FGBNU "Rosinformagrotekh", 2022:384.
 13. Doskach AG. Natural zoning of the Caspian semi-desert [*Prirodnoye rayonirovaniye Prikaspiyskoy polupustyni*]. Moscow: Nauka, 1979:142.
 14. Soil salinization in Russia [*Zasoleniye pochvy Rossii*]. Moscow: IKTS "Akademkniga", 2006:854.
 15. Zimovets BA. Ecology and melioration of soils in the dry steppe zone [*Ekologiya i melioratsiya pochv sukhostepnoy zony*]. Moscow: Pochvennyy institut im. V.V. Dokuchayeva, 1991:248.
 16. Ivanova EI. Essay on the soils of the southern part of the Sub-Ural plateau and adjacent areas of the Caspian lowland [*Ocherk pochv yuzhnoy chasti Podural'skogo plato i privileyushchikh rayonov Prikaspiyskoy nizmennosti*]. Leningrad: Izd-vo AN SSSR, 1928:320.
 17. Ivanova EN, Fridland VM. Soil complexes of dry steppes and their evolution [*Pochvennyye komplekсы sukhikh stepey i ikh evolyutsiya*] *Issues of improving the food base in the steppe, semi-desert and desert zones of the USSR [Voprosy uluchsheniya kormovoy bazy v stepnoy, polupustynnoy i pustynnoy zonakh SSSR]*. Moscow-Leningrad: Izd-vo AN SSSR, 1954:162-190.
 18. Instructions on soil surveys for reclamation and

- полупустыни. М.: Наука. 142 с.
14. Засоление почвы России. 2006. М.: ИКЦ «Академкнига». 854 с.
 15. Зимовец Б.А. 1991. Экология и мелиорация почв сухостепной зоны. М.: Почвенный институт им. В.В. Докучаева. 248 с.
 16. Иванова Е.И. 1928. Очерк почв южной части Подуральского плато и прилегающих районов Прикаспийской низменности. Л.: Изд-во АН СССР. 320 с.
 17. Иванова Е.Н., Фридланд В.М. 1954. Почвенные комплексы сухих степей и их эволюция // Вопросы улучшения кормовой базы в степной, полупустынной и пустынной зонах СССР. М.-Л.: Изд-во АН СССР. С. 162-190.
 18. Инструкция по почвенным изысканиям для мелиоративного и водохозяйственного строительства. 1975. М.: Минмелиоводхоз СССР. 89 с.
 19. Канатъева Н.П. 2013. Изучение трансформации пахотных угодий Северного Приволжья по данным дистанционного зондирования // Стратегия устойчивого развития регионов России. С. 132-137.
 20. Книжников Ю.Ф., Кравцова В.И., Тутубалина О.В. 2011. Аэрокосмические методы географических исследований. М.: Академия. 416 с.
 21. Ковда В.А. 1937. Солончаки и солонцы М.-Л.: Изд-во АН СССР. 246 с.
 22. Конюшкова М.В. 2014. Цифровое картографирование почв солонцовых комплексов Северного Прикаспия. М.: Товарищество научных изданий КМК. 316 с.
 23. Курбанов Э.А., Воробьев О.Н., Губаев А.В., Воробьев О.Н. 2010. Использование космических снимков ALOS для выявления площадей бывших water management construction [*Instruktsiya po pochvennym izyskaniyam dlya meliorativnogo i vodokhozyaystvennogo stroitel'stva*]. Moscow: Minmeliovodkhoz SSSR, 1975:89.
 19. Kanatieva NP. Study of the transformation of arable land in the Northern Volga region according to remote sensing data [*Izucheniye transformatsii pakhotnykh ugodiy Severnogo Privolzh'ya po dannym distantsionnogo zondirovaniya*] *Strategy for Sustainable Development of Russian Regions [Strategiya ustoychivogo razvitiya regionov Rossii]*. 2013:132-137.
 20. Knizhnikov YuF, Kravtsova VI, Tutubalina OV. Aerospace methods of geographical research [*Aerokosmicheskiye metody geograficheskikh issledovaniy*]. Moscow: Akademiya, 2011:416.
 21. Kovda VA. Solonchaks and solonetztes [*Solonchaki i solontsy*]. Moscow-Leningrad: Izd-vo AN SSSR, 1937:246.
 22. Konyushkova MV. Digital mapping of soils of solonetzic complexes of the Northern Caspian [*Tsifrovoye kartografirovaniye pochv solontsovykh kompleksov Severnogo Prikaspiya*]. Moscow: Tovarishchestvo nauchnykh izdaniy KMK, 2014:316.
 23. Kurbanov EA, Vorobyov ON, Gubaev AV, Vorobyov ON. Using ALOS satellite imagery to identify areas of former agricultural land overgrown with forest [*Ispol'zovaniye kosmicheskikh snimkov ALOS dlya vyyavleniya ploshchadey byvshikh sel'skokhozyaystvennykh ugodiy, zarastayushchikh lesom*] *Geomatika*. 2010;4:68-72.
 24. Labutina IA, Baldina EA. Using remote sensing data to monitor protected area ecosystems [*Ispol'zovaniye dannykh distantsionnogo zondirovaniya dlya monitoringa ekosistem OOPT*] *Guidelines [Metodicheskoye posobiye]*. Moscow: WWF Russia, 2011:88.
 25. Lyubimova IN, Degtyareva ET. Changes in the carbonate profile of soils of solonetz complexes under agrogenic impact [*Izmeneniye karbonatnogo profilya pochv solontsovykh kompleksov pri agrogenom vozdeystvii*] *Eurasian Soil Science [Pochvovedeniye]*. 2000;7:855-860.
 26. Minashina NG. Reclamation of saline soils [*Melioratsiya zasolennykh pochv*]. Moscow: Kolos, 1978:263.

- сельскохозяйственных угодий, зарастающих лесом // Геоматика. №4. С. 68-72.
24. Лабутина И.А., Балдина Е.А. 2011. Использование данных дистанционного зондирования для мониторинга экосистем ООПТ. Методическое пособие. М.: WWF России. 88 с.
25. Любимова И.Н., Дегтярева Е.Т. 2000. Изменение карбонатного профиля почв солонцовых комплексов при агрогенном воздействии // Почвоведение. № 7. С. 855-860.
26. Минашина Н.Г. 1978. Мелиорация засоленных почв. М.: Колос. 263 с.
27. Новикова А.Ф., Гэпин Л.О., Конюшкова М.В. 2009. Динамика процессов засоления-рассоления почв участка «Червленое» Светлоярской оросительной системы в ирригационный и постирригационный периоды // Бюллетень почвенного института им. В.В. Докучаева. Вып. 63. М.: РАСХН. С. 16-24.
28. Панкова Е.И., Новикова А.Ф. 2004. Мелиоративное состояние и вторичное засоление орошаемых земель Волгоградской области // Почвоведение. № 6. С. 731-744.
29. Полевой определитель почв России. 2008. М.: Почвенный институт им. В.В. Докучаева. 182 с.
30. Приходько В.Е. 1996. Орошаемые степные почвы: функционирование, экология, продуктивность. М.: Интеллект. 179 с.
31. Роде А.А., Польский М.Н. 1961. Почвы Джаныбекского стационара, их морфологическое строение, механический и химический состав и физические свойства // Труды Почвенного института им. В.В. Докучаева. Т. 56. С. 3-214.
32. Руководство пользователя ENVI 5.1. 2014. М.: Совзонд. 242 с.
27. Novikova AF, Gepin LO, Konyushkova MV. Dynamics of salinization-desalinization processes in the soils of the “Chervlenoe” site of the Svetloyarsk irrigation system during the irrigation and post-irrigation periods [Dinamika protsessov zasoleniya-rassoleniya pochv uchastka “Chervlenoye” Svetloyarskoy orositel'noy sistemy v irrigatsionnyy i postirrigatsionnyy periody] *Bulletin of the V.V. Dokuchaev Soil Institute [Byulleten' pochvennogo instituta im. V.V. Dokuchayeva]*. Moscow: RASKHN, 2009;63:16-24.
28. Pankova EI, Novikova AF. Ameliorative state and secondary salinization of irrigated lands in the Volgograd region [Meliorativnoye sostoyaniye i vtorichnoye zasoleniye oroshayemykh zemel' Volgogradskoy oblasti] *Eurasian Soil Science [Pochvovedeniye]*. 2004;6:731-744.
29. Field determinant of Russian soils [Polevoy opredelitel' pochv Rossii]. Moscow: Pochvennyy institut im. V.V. Dokuchayeva, 2008:182.
30. Prikhodko VE. Irrigated steppe soils: functioning, ecology, productivity [Oroshayemyye stepnyye pochvy: funktsionirovaniye, ekologiya, produktivnost']. Moscow: Intellect, 1996:179.
31. Rode AA, Polsky MN. Soils of the Dzhanybek station, their morphological structure, mechanical and chemical composition, and physical properties [Pochvy Dzhanybekskogo stacionara, ikh morfologicheskoye stroeniye, mekhanicheskiy i khimicheskiy sostav i fizicheskiye svoystva] *Proceedings of the V.V. Dokuchaev Soil Institute [Trudy Pochvennogo instituta im. V.V. Dokuchayeva]*. 1961;56:3-214.
32. ENVI User Manual 5.1 [Rukovodstvo pol'zovatelya ENVI 5.1]. Moscow: Sovzond, 2014:242.
33. Rukhovich DI, Shapovalov DA. On the features of soil and land cover monitoring as an information basis for effective land use [Ob osobennostyakh monitoringa pochvenno-zemel'nogo pokrova kak informatsionnoy osnovy effektivnogo zemlepol'zovaniya] *Land Management, Cadaster and Land Monitoring [Zemleustroystvo, kadastr i monitoring zemel']*. 2015;12:31-49.
34. Savin IYu, Otarov A, Zhogalev AV, Ibraeva MA, Duysekov S. Identification of long-term changes in the area of saline soils of the Shoulder irrigated massif using Landsat satellite images [Vyyavleniye

33. Рухович Д.И., Шаповалов Д.А. 2015. Об особенностях мониторинга почвенно-земельного покрова как информационной основы эффективного землепользования // Землеустройство, кадастр и мониторинг земель. № 12. С. 31-49.
34. Савин И.Ю., Отаров А., Жогалев А.В., Ибраева М.А., Дуйсеков С. 2014. Выявление многолетних изменений площади засоленных почв Шаульдерского орошаемого массива по космическим снимкам Landsat // Бюллетень почвенного института им. В.В. Докучаева. Вып. 74. С. 49-63.
35. Сиземская М.Л. 2013. Современная природно-антропогенная трансформация почв полупустыни Северного Прикаспия. М.: Товарищество научных изданий КМК. 276 с.
36. Сорокина Н.П. 2006. Методология составления крупномасштабных агроэкологически ориентированных карт. М.: Россельхозакадемия. 159 с.
37. Фазылова А.Г. 2014. Изучение травянистой растительности одновозрастных залежей на примере двух участков природно-географических территорий республики Татарстан. Казань: ФГАОУВПО «Казанский (Приволжский) Федеральный Университет». 62 с.
38. Фридланд В.М. 1964. Светло-каштановые почвы // Почвы комплексной равнины Северного Прикаспия и их мелиоративная характеристика. М.: Наука. С. 22-59.
39. Хитров Н.Б., Понизовский А.А. 1990. Руководство по лабораторным методам исследования ионно-солевого состава нейтральных и щелочных многолетних измененных площадей засоленных почв Шаульдерского орошаемого массива по космическим снимкам Landsat [Bulletin of the V.V. Dokuchaev Soil Institute [Byulleten' pochvennogo instituta im. V.V. Dokuchayeva]. 2014;74:49-63.
35. Sizemskaya ML. Modern natural-anthropogenic transformation of soils in the semi-desert of the Northern Caspian Sea [Sovremennaya prirodno-anthropogennaya transformatsiya pochv polupustyni Severnogo Prikaspiya]. Moscow: Tovarishchestvo nauchnykh izdaniy KMK, 2013:276.
36. Sorokina NP. Methodology for large-scale agri-environmentally oriented mapping [Metodologiya sostavleniya krupnomasshtabnykh agroekologicheskii oriyehtirovannykh kart]. Moscow: Russian Rossel'khozakademiya, 2006:159.
37. Fazylova AG. Study of herbaceous vegetation of even-aged deposits on the example of two sections of the natural-geographical territories of the Republic of Tatarstan [Izucheniye travyanistoy rastitel'nosti odnovozrastnykh zalezhey na primere dvukh uchastkov prirodno-geograficheskikh territoriy respubliki Tatarstan]. Kazan: FGAOUVPO "Kazanskiy (Privolzhskiy) Federal'nyy Universitet", 2014:62.
38. Fridland VM. Light chestnut soils [Svetlo-kashtanovyye pochvy] Soils of the complex plain of the Northern Caspian region and their reclamation characteristics [Pochvy kompleksnoy ravniny Severnogo Prikaspiya i ikh meliorativnaya kharakteristika]. Moscow: Nauka, 1964:22-59.
39. Khitrov NB, Ponizovsky AA. Guidelines for laboratory methods for studying the ion-salt composition of neutral and alkaline mineral soils [Rukovodstvo po laboratornym metodam issledovaniya ionno-solevogo sostava neytral'nykh i shchelochnykh mineral'nykh pochv]. Moscow: Pochvennyy institut im. V.V. Dokuchayeva, 1990:236.
40. Chandra AM, Ghosh SK. Remote sensing and geographic information systems [Distantionnoye zondirovaniye i geograficheskiiye informatsionnyye sistemy]. Moscow: Tekhnosfera, 2008:312.
41. Shovengerdt RA. Remote sensing [Distantionnoye zondirovaniye] Models and

- минеральных почв. Почвенный институт им. В.В. Докучаева. 236 с.
40. Чандра А.М., Гош С.К. 2008. Дистанционное зондирование и географические информационные системы. М.: Техносфера. 312 с.
41. Шовенгердт Р.А. 2013. Дистанционное зондирование. Модели и методы обработки изображений. М.: Техносфера. 592 с.
42. Gorokhova I., Pankova Ye. 2021. The nature of the patchiness of the irrigated fields and the possibility of its recognition on space imagery // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. Vol. 862. P. 012092.
43. Rouse J.W., Haas R.H., Schell J.A., Deering D.W. 1973. Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS // 3rd ERTS Symposium, NASA SP-351. Vol. I. P. 309-317.
44. Soil survey investigation for irrigation. 1979 // FAO Soil Bulletin. Rome: FAO. Vol. 42. 188 p.
- methods of image processing [Modeli i metody obrabotki izobrazheniy].* Moscow: Tekhnosfera, 2013:592.
42. Gorokhova I, Pankova Ye. The nature of the patchiness of the irrigated fields and the possibility of its recognition on space imagery. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science.* 2021;862:012092.
43. Rouse JW, Haas RH, Schell JA, Deering DW. Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. *3rd ERTS Symposium, NASA SP-351.* 1973;I:309-317.
44. Soil survey investigation for irrigation. *FAO Soil Bulletin.* Rome: FAO, 1979;42:188.

UDC 631.4

METHODOLOGICAL APPROACHES TO ASSESSING THE STATE OF IRRIGATED LAND IN THE DRY STEPPE ZONE OF THE VOLGOGRAD REGION USING SATELLITE IMAGES

© 2023. I.N. Gorohova, E.I. Pankova

V.V. Dokuchayev Soil Institute

Russia, 119017, Moscow, Pyzhevsky Per., 7. E-mail: g-irina14@yandex.ru

Received December 16, 2022. Revised February 01, 2023. Accepted February 02, 2023.

In this article we present the materials of studies that were carried out in the Volgograd Region. They can be used as the basis for methodological recommendations to map and determine the area and condition of irrigated lands using satellite images. They were obtained during the long-term researches in the irrigated lands in the Volgograd Region that took place on solonetz complexes in the dry steppe. Satellite imagery will help to map and determine 1) the areas of irrigated lands, 2) the areas and age of fallow lands in irrigated territories, 3) the state of irrigated soils and factors that limit their fertility. Crops growing in different hydrogeological conditions react differently to those limiting factors. Therefore, to compile a map it is recommended to adhere to such stages as identifying fields with different crops and fallow lands; highlighting patches in the images with sparse or absent crops; on the basis of field researches and analyzed soil samples, establishing the cause of the patchiness; selecting an algorithm for processing satellite images based on the results of field researches. The patchiness of irrigated fields, reflected in the images, can have a different origin, so their interpretation requires a

mandatory study of the characteristics of the chosen area. Patchiness associated with secondary and residual salinization of soils is determined by the state of vegetation; therefore, the pictures should be taken during the period of high vegetative activity of plants. Among other things, it is necessary to obtain data on the level of groundwater, because its critical level is the main cause of secondary salinization. For deeply saline soils, it is necessary to build a salt map using interpolation of point data that was obtained in the field and laboratory. Patchiness associated with the carbonate content in the surface horizon does not depend on the level of groundwater and is best seen on the images showing an open soil surface. The accuracy of the map is checked by comparing it with maps of a larger scale and field observations, as well as by evaluating the accuracy of the classification of the image by determining the verification indexes. The materials presented in our article are intended for a wide range of specialists who use space information in their work, as well as for soil scientists, agronomists and agrochemists who work in the agricultural field of the southern regions of Russia.

Keywords: dry steppe zone, irrigated lands, saline soils, satellite imagery, mapping of irrigated soils.

Funding. This work was carried out for the State Assignment No. 0439-2022-0009 “To Study the Transformation, Evolution and Degradation of the Soil Cover of Agricultural Landscapes at Different Organizational Levels, Including Intra-field Heterogeneity Using a Combination of Ground Surveys and Digital Technologies”.

DOI: 10.24412/2542-2006-2023-1-5-37

EDN: DTKKMP