

Методы использования мультиспектральных снимков при экологическом мониторинге мелиорированных земель

Д. А. Шаповалов¹, Л. А. Ведешин², Л. Г. Евстратова¹, А. А. Антошкин²

¹ Государственный университет по землеустройству, Москва, 105064, Россия
E-mail: shapoval_ecology@mail.ru

² Институт космических исследований РАН, Москва, 117997, Россия
E-mail: vedeshin40@mail.ru

Глобальное изменение климата вызывает необходимость создания системы сельскохозяйственного производства, адаптированной к этому процессу в долгосрочной перспективе. Многолетний опыт и результаты выполненных в РФ исследований показывают, что обеспечить дальнейшее развитие агропромышленного комплекса возможно только на основе широкого внедрения результатов научных исследований и мирового опыта по эффективному использованию орошаемых и осушаемых мелиорируемых земель. К сожалению, во многих регионах России наблюдается устойчивая тенденция к снижению использования мелиоративного комплекса. Реорганизация крупных государственных оросительных систем в 1990-е гг. привела к образованию на их территории новых, разрозненных фермерских хозяйств. В соответствии с Постановлением Правительства РФ «О Государственной программе эффективного вовлечения в оборот земель сельскохозяйственного назначения и развития мелиоративного комплекса РФ в 2022–2031 гг.» (<http://static.government.ru/media/acts/files/0001201606170013.pdf>) в агропромышленном комплексе ведутся работы по внедрению технологий дистанционного зондирования Земли и цифровых картографических данных с целью восстановления мелиоративного комплекса в различных регионах страны. В результате планируется вовлечь в оборот 13,2 млн га неиспользуемых земель и сохранить в сельскохозяйственном обороте мелиорированные почвы на площади не менее 3,6 млн га. Кроме того, запланировано улучшение состояния 2,8 млн га почв с помощью специальных веществ — химических мелиорантов. В рамках этой программы также планируется собрать актуальную наземную и аэрокосмическую информацию о состоянии земель сельскохозяйственного назначения и провести агрохимические исследования и кадастровые работы. В статье по литературным данным и результатам собственных исследований обобщён опыт экологического мониторинга земель по мультиспектральным снимкам с целью его использования для развития мелиоративного комплекса России.

Ключевые слова: экологический мониторинг, мелиорируемые земли, дистанционные методы зондирования, индексные изображения

Одобрена к печати: 21.08.2023

DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-4-187-201

Состояние проблемы экологического мониторинга мелиорированных земель по мультиспектральным снимкам

На сегодняшний день в России и за рубежом существует множество различных средств дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ), которые позволяют выполнять мультиспектральную съёмку, по материалам которой возможно проведение мониторинга мелиорированных земель. Они обеспечивают съёмку со спутников, пилотируемых носителей и беспилотных летательных аппаратов (БПЛА).

С помощью технологий ДЗЗ специалисты агропромышленного комплекса с определённой цикличностью получают изображения отдельных полей, регионов и округов, в том числе информацию о состоянии угодий, идентификации культур, определении посевных площадей сельскохозяйственных культур и состоянии урожая. Спутниковые данные используются для управления и мониторинга ведения сельскохозяйственных работ на различных уровнях. Эти данные могут быть использованы для оптимизации деятельности фермерских хозяйств и пространственно-ориентированного управления техническими операциями, определения

местоположения урожая, степени истощения земель, локальной оптимизации применения химикатов. Основные сельскохозяйственные приложения ДЗЗ: мониторинг растительности, сельскохозяйственных культур, классификация их типов; оценка состояния посевов, урожайности и ущерба, характеристик почв (их типов, эрозии, влажности, засоленности); отбраживание практики обработки почвы и др. (Ведешин, Шаповалов, 2022; Ведешин и др., 2011; Золотокрылин и др., 2016; Шаповалов и др., 2022).

Слежение за процессами изменения компонентов агроландшафта в условиях климатических изменений представляется неотъемлемой задачей при экологическом мониторинге мелиорированных сельскохозяйственных земель (Абросимов, Дворкин, 2009; Ведешин, Шаповалов, 2022). Данный тип наблюдений может стать информационной основой для выявления тенденций дальнейшей трансформации почв, поиска автоматизированных технологий управления процессами агропроизводства на мелиорируемых землях, направленных на комплексное регулирование всех эффективных параметров формирования и регулирования мелиоративного режима агроэкосистем (водного, питательного, газового, температурного и пр.), определяющих их продукционный процесс. В связи с этим становится важным разрабатывать новые подходы и совершенствовать существующие методы комплексного использования разновременных мультиспектральных снимков.

Дешифрирование почвенного покрова на космических изображениях производится по целому ряду признаков, которые можно подразделить на две большие группы: прямые и косвенные (Кринов, 1947). Для данной работы наибольший интерес представляют исследования динамических свойств почв, испытывающих изменения в связи с их нерациональным использованием, а также проведение контроля неблагоприятных процессов при планировании и проведении мелиорации сельскохозяйственных земель. К таким свойствам относятся гумусность, засоленность, влажность, эродированность.

К прямым дешифровочным признакам почвенного покрова относятся: тон; рисунок; конфигурация и площадь выдела, занимаемого почвенной разновидностью; коэффициенты спектральной яркости почв (Акопов и др., 2015; Кринов, 1947).

Тон, как прямой признак дешифрирования почв, эффективен при покрытии растительностью до 15–20 % и высоте растений не более 10–20 см (всходы культур) (Барталев и др., 2016; Виноградов, Кондратьев, 1971). В табл. 1 приведена зависимость тона изображения от типов почв (Виноградов, Кондратьев, 1971). В интервале покрытия 20–60 % интегральная яркость снижается в красной зоне и возрастает в ближней инфракрасной. При большем покрытии яркость определяется растительностью. По тону изображения на снимках наиболее резко различаются почвы свежевспаханных массивов. При подъеме целины с глубины 20–25 см на поверхность выворачивается слой, более ярко отражающий солонцеватость, наличие осолоделости и другие особенности почв (Виноградов, Кондратьев, 1971).

Подспутниковые наблюдения показывают, что яркость почв, регистрируемая из космоса, выше по сравнению с таковой в наземных условиях, связанных с атмосферной дымкой, которая особенно влияет при съёмке в сине-зелёной области спектра. Подобный недостаток устраним так называемой атмосферной коррекцией или вводом поправочных коэффициентов. Также на тон почвенного покрова влияет влажность. В работе Е.Л. Кринова (1947) было проведено исследование зависимости отражательной способности поверхностей от их влажности. При этом оказалось, что, как правило, влажные поверхности чаще всего обладают меньшей яркостью по сравнению с сухими, причём степень понижения отражательной способности у разных образований оказалась различной.

Практически при дешифрировании пользуются не тоном изображения почв, а соотношением тонов. В пределах аридных территорий по тону могут резко выделяться луговые почвы, солонцы, солончаки, солоды и щебенистые почвы.

Говоря о рисунках почвенного покрова, следует заметить, что они практически везде подчинены рисункам рельефа и не являются собственно почвенными. Особенно это касается таких типов рисунков, как дельтовый, грядовой, хребтовый, пойменный. Только на плоских поверхностях, где роль морфологии поверхности снижается, рисунки почв могут зависеть от влажности или эродированности и рассматриваться как относительно самостоятельные.

Таблица 1. Тон изображения в зависимости от типов почв на панхроматических снимках (видимый диапазон электромагнитного спектра — 450–900 нм)

Тон изображения	Почвы
Белый	Солончаки с солевой коркой на поверхности
Почти белый	Солончаки корковые и мелкие при вспашке солонцового горизонта; солоды при вспашке осолоделого горизонта; карбонатные перерытые чернозёмы и перерытые каштановые почвы (сурчины); сильно эродированные чернозёмы и каштановые почвы на карбонатных породах; чернозёмы и каштановые почвы песчаные, сильно дефлированные; аллювиальные слабо развитые песчаные почвы
Светло-серый	Солонцы средние и глубокие при вспашке солонцового горизонта; чернозёмы и каштановые эродированные почвы; чернозёмы и каштановые песчаные и супесчаные почвы; чернозёмы и каштановые маломощные щебнистые почвы; аллювиальные луговые песчаные почвы
Серый	Каштановые и светло-каштановые суглинистые почвы; чернозёмы карбонатные высоко-вскипающие и остаточно-карбонатные; чернозёмы и тёмно-каштановые слабо-эродированные почвы; лугово-чернозёмные и лугово-каштановые осолоделые при вспашке осолоделого горизонта; луговые и аллювиально-луговые почвы под луговой растительностью

Размер и формы почвенных контуров могут быть самыми различными. Зональные типы почв, такие как подзолистые, чернозёмные или каштановые, занимающие большие площади междуречий, имеют крупные контуры неопределённой формы. Луговые почвы пойм и днищ балок имеют вытянутые извилистые формы. Округлые формы отличают почвы соров и солончаков, а правильные изометричные — почвы сельхозугодий (Виноградов, Кондратьев, 1971).

Прямые признаки дешифрирования редко используются при дешифрировании, ввиду того что на них воздействует множество факторов (влажность, растительный покров, характеристики съёмочной аппаратуры и пр.) и многие свойства почвы могут быть интерпретированы неправильно (Барталев и др., 2016; Виноградов, Кондратьев, 1971).

Коэффициенты спектральной яркости почв закономерно возрастают по мере увеличения длины волны видимого спектра. Изменения на фоне этой закономерности могут быть связаны с содержанием гумуса, светло окрашенных соединений (кремния и алюминия), карбонатов, железа, а также с влажностью и механическим составом. Наиболее изменчивым показателем считается влажность, способная менять альбедо почв в 2–3 раза. Совместное влияние зоны спектра и гумусности приводит к тому, что кривые спектральной яркости сильно расходятся с увеличением длины волн. С этим связана наибольшая информативность космических изображений, полученных в красном и инфракрасном диапазонах.

Значительно чаще почвы дешифрируют по косвенным индикаторам — рельефу, растительности. К косвенным признакам дешифрирования почв относятся: рельеф; растительность; почвообразующие породы; деятельность человека.

Дешифрирование рельефа является основой для изучения типов почв и структуры почвенного покрова, так как почвенные разновидности приурочены к определённым элементам мезо- и микрорельефа. Солончаки бессточных участков, например, обычно встречаются в виде отдельных крупных пятен, имеющих сильно изрезанные очертания границ. Контуров солодей, развивающихся в западинах, отличаются округлой формой. В диаметре они имеют 60–100 м. Солонцы открытой степи встречаются в виде мелких неправильных пятен с диаметром 5–10 м, а солонцы, приуроченные к западинам, имеют вид колец, окаймляющих западины (Виноградов, Кондратьев, 1971).

Элементы рельефа тоже можно дешифрировать по космическим снимкам. Современные методы съёмки и обработки изображений позволяют также работать со стереоизображениями и цифровыми моделями рельефа.

Связь почв и рельефа достаточно хорошо изучена. Так, выделяемые на почвенных картах отдельные контуры представляют собой преимущественно очертания различных

элементов рельефа, которые характеризуются разными почвами (Барталев и др., 2016). На равнинах структура рельефа распознаётся по рисункам водотоков и характеру долин. Макрорельеф плоских равнин хорошо читается по структуре растительности, по очагам засоления или заболачивания. Во многих случаях по геоморфологической карте можно создать удовлетворительную карту почвенного покрова в пределах определённой ландшафтной зоны (Виноградов, Кондратьев, 1971). Если рельеф мало расчленён, а грунтовые воды лежат глубоко, то почвенный покров обычно бывает однороден. Для волнистого рельефа почвы отличаются большой пестротой. В степной и сухостепной зоне тесную связь с почвами имеют эрозионные формы рельефа, представляющиеся проводниками или местами сбора вод поверхностного стока. Так, на участках с засоленными почвами при наличии уклонов развивается густая мелкоовражная сеть, где эродированные формы имеют резкие очертания и крутые склоны. Такое явление можно часто наблюдать на склонах озёрных котловин (Виноградов, Кондратьев, 1971).

Растительность в своём становлении тесно связана с почвами, но в то же время способствует их формированию. Как фактор почвообразования более важны первичные или коренные фитоценозы, а вторичные, тем более антропогенные, имеют меньшее значение. Однако адаптивные типы земледелия формируются с учётом в числе прочего почвенного покрова. Поэтому хозяйственное использование территорий может служить дополнительным признаком дешифрирования почв. Наиболее тесная связь наблюдается на территориях очагового земледелия. Здесь освоению подлежат наиболее плодородные почвы, требующие для своего развития оптимальных для данного района условий. Площади с большим количеством солонцов или с каменистыми и заболоченными почвами используются здесь под пастбища, а участки с луговыми почвами — под сенокосы. В большинстве случаев индикация почв проводится сопряжённым анализом факторов.

К динамическим свойствам почв относятся: гумусированность, засоленность, влажность, эродированность.

Гумусированность почв (содержание в процентах органической части почвы, показателя её плодородия) максимальна в верхнем горизонте и определяет тон и цвет почв. Они меняются от почти чёрного у чернозёмов до почти белого у солончаков. Изменения содержания гумуса в пределах 1–6 % влияют на отражательные свойства почв и фиксируются на снимках. Почвам Калмыкии характерно содержание гумуса для тёмно-каштановых почв 4–5 %, для каштановых — 2–3 % (Виноградов, Кондратьев, 1971). При большем содержании гумуса тон меняется мало и его изменения маскируются другими факторами. Наиболее чётко корреляция содержания гумуса и спектральных коэффициентов выражена для почв с содержанием гумуса менее 3 % (Зонн и др., 2004).

Для определения гумусности почв по коэффициентам спектральной яркости используются связи, выявленные при анализе значительного объёма наземных и лабораторных определений. Установлено, что связь спектральной яркости с содержанием гумуса оптимально аппроксимируется экспонентой. Используя экспоненту в качестве градуировочной кривой, можно пересчитывать коэффициенты спектральной яркости почв в величины гумусированности. Такое решение задачи реализовано на примере Курского полигона Института географии РАН (Зонн и др., 2004).

Засоление почв отражается на снимках только в случае появления солевых налётов на поверхности. Это характерно для солончаков, но не для солонцов, которые имеют накопления солей на некоторой глубине. В сухом состоянии засоленные почвы светлее, а при увлажнении — темнее незасоленных. Структура засоленных почв мелкопятнистая, ажурная, а контуры — неопределённые с прерывистыми границами. К косвенным признакам засоления относятся разреженность и угнетение растительности в условиях недостатка влаги и, наоборот, густой покров солончаковых лугов на участках обильного увлажнения. Погодные условия сильно влияют на тон ареалов засоления, который может меняться в течение суток и даже часов. Ареалы солончаков и обнажённых песков, имеющих близкие светлые тона, различаются по рисункам и по контрастам отражения в разных зонах спектра. Влажность почвы очень непостоянна во времени, зависит от сезонного состояния, погодных условий и даже суточных

колебаний температуры. Оценка этого показателя в практическом отношении важна прежде всего для сельского хозяйства, но в целом влияет на развитие растений, склоновые процессы и климат приземной части атмосферы. В видимом, ближнем и особенно в средних инфракрасных диапазонах с увеличением влажности наблюдается снижение спектральной яркости почв. Однако это имеет место до определённого предела. Зависимости оптических свойств и влажности наиболее чёткие при грациях 1–5 % для песчаных почв, 2–12 % для супесчаных и 4–22 % для суглинистых.

Методы использования аэрокосмических снимков при экологическом мониторинге мелиорированных земель

Для количественного изучения влажности почв недостаточно использования снимков в видимом диапазоне. Для этих целей используют тепловые инфракрасные снимки и снимки в радиодиапазоне — микроволновые радиометрические и радиолокационные. Метод контроля за влажностью почв с помощью тепловой инфракрасной съёмки основан на фиксации различных температурных характеристик у почв с разным влагосодержанием. В Голландии, Англии, ФРГ проведены исследования по установлению зависимости между регистрируемой со спутников температурой и определяемой на местности влажностью почв Западной Европы, зоны Сахеля в Африке и других районов. С получением тепловых снимков достаточно хорошего разрешения (ETM+ (англ. Enhanced Thematic Mapper): 60 м, ASTER (англ. Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer): 90 м) и выполнением данными системами съёмки в среднем инфракрасном диапазоне эти возможности расширились.

Увлажнение почв приводит к их потемнению и, следовательно, снижению отражения (Барталев и др., 2016; Блохин и др., 2019; Виноградов, Кондратьев, 1971; Зейлигер и др., 2019; Золотокрылин, 2009; Зонн и др., 2004). При этом в зависимости от механического состава разные почвы меняют свой коэффициент отражения при увеличении влажности. Наиболее заметно влияние увлажнения отражается на светлых почвах лёгкого механического состава, а в меньшей степени — на тяжёлых глинистых почвах. Измерения в видимом диапазоне показали, что заметное уменьшение альбедо поверхности или коэффициента спектральной яркости (КСЯ) отмечается в интервале изменений влажности почвы от максимальной гигроскопичности (наибольшее количество влаги, которое почва может сорбировать из воздуха, почти насыщенного водяным паром) до наименьшей или полевой влагоёмкости (наибольшее количество подвешенной влаги, которое может прочно удерживаться однородной неслоистой почвой против силы тяжести). При дальнейшем росте влажности — вплоть до капиллярной влагоёмкости (наибольшее количество капиллярно-подпёртой влаги, которое может содержаться в почве) — КСЯ продолжает понижаться, хотя не столь интенсивно.

Для математического описания влияния влажности на КСЯ почв Б.В. Виноградовым и К.Я. Кондратьевым (1971) была предложена математическая модель:

$$r_{\varepsilon} = r_z + (r_0 + r_z) \exp(-\alpha W^c) + dW^n, \quad (1)$$

где r_{ε} — интегральный коэффициент яркости почв в интервале 580–720 нм; r_0 — КСЯ почв при влажности $W = 0$; r_z — КСЯ почв при влажности, равной наименьшей полевой влагоёмкости; α , d , $n < 1$, $c > 1$ — коэффициенты уравнения. Уравнение (1) позволяет дистанционно различать почвы с грацией влажности 2–4 %.

Таким образом, Виноградов и Кондратьев (1971) уточнили для разных типов почв интервалы наибольших изменений альбедо, в которых возможно проводить оценки влажности поверхностного слоя почв по их яркости в видимой зоне спектра.

Ю.Н. Садовниковым (1979) предложено линейное уравнение зависимости КСЯ от влажности:

$$\rho_{\varepsilon} = A - bW,$$

где ρ_{ε} — интегральное отражение почв; A , b — константы, характерные для конкретного почвенного типа.

На рис. 1 показано влияние влажности на коэффициенты отражения почв (Виноградов, Кондратьев, 1971).

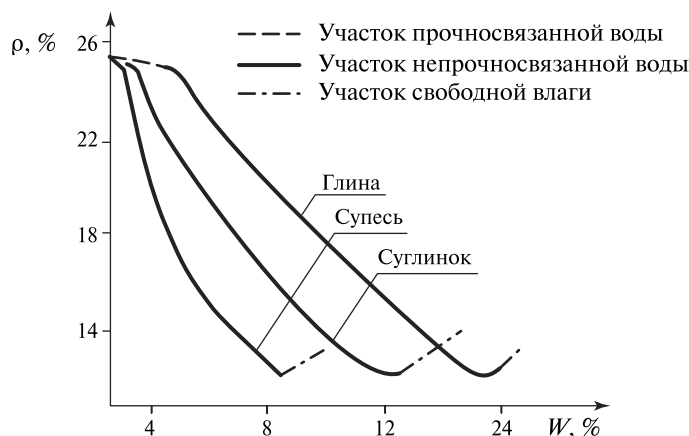


Рис. 1. Влияние влажности на коэффициенты отражения почв

Эродированность подразумевает удаление верхнего, плодородного слоя почвы в результате плоскостного смыва и оврагообразования (водная эрозия) или выдувания (ветровая эрозия, дефляция). Распространение процессов эрозии и их активность зависит главным образом от поверхностного стока и ветрового режима, но также от свойств почв, рельефа, растительного покрова и использования земель. Удаление гумуса приводит к осветлению почвы, увеличению её альбедо. Особенно заметным осветление бывает у почв песчаных с горизонтами засоления.

Появляется возможность разделения почв по тону или цвету в процессе дешифрирования, которое затрудняется при наличии растительности. Можно различать равномерную смытость почв с одинаковым осветлением и неравномерную, когда структура изображения становится пятнистой, слабо полосчатой или струйчатой. Активный многолетний смыв почв на склонах приводит к образованию борозд и впоследствии оврагов, которые хорошо читаются на снимках по тону и формам в плане. Все результаты водной эрозии детально распознаются на весенних и осенних снимках, когда отсутствует маскирующая роль растительного покрова.

Песчаные почвы сухостепной и полупустынной зон подвержены ветровой эрозии. Пылевые бури могут моментально удалять из почв тысячи тонн гумуса и даже приводить к образованию микроформ эолового рельефа. Последствия дефляции особенно хорошо видны при изучении границ полей, которые теряют чёткость и становятся ареалами со струйчатой или пятнистой структурой.

На состояние почвенного покрова влияют как природные, так и антропогенные факторы, которые могут приводить к деградации. В работе И. М. Габасовой (2001) предлагается типологическая систематика деградации почв (табл. 2) Эта информация важна для наиболее достоверной интерпретации данных тематического дешифрирования.

Исследование растительности дистанционными методами основывается на использовании знаний об изменениях спектральной отражательной способности природных образований (в том числе и растительности). Изучению спектральной отражательной способности растительности и других природных образований посвящён ряд трудов отечественных (Е. Л. Кринов, В. И. Рачулик, Ю. С. Толчельников) и зарубежных (Ш. М. Дейвис, Д. А. Ландгребе, Т. Л. Филлипс, Ф. Х. Свейн) учёных.

В качестве инструмента для анализа спутниковых снимков активно используются разного рода индексные изображения. Принцип расчёта индексных изображений обусловлен тем, что при изучении объектов по мультиспектральным снимкам часто важны не абсолютные значения, а характерные соотношения между значениями яркости объекта в спектраль-

ных зонах (Барталев и др., 2016; Виноградов, Кондратьев, 1971; Головинов и др., 2018; Nguyen et al., 2020). Для составления индексных изображений используются каналы видимого, инфракрасного, ближнего инфракрасного и теплового диапазонов, сочетание которых позволяет определить состояние сельскохозяйственных культур и температурный режим района.

Таблица 2. Типологическая систематика деградации почв

Тип деградации	Факторы деградации	Виды и формы проявления деградации
Физическая (механическая)	Эрозия водная и ветровая, в том числе усиленная техногенезом. Строительство промышленное. Тяжёлая сельскохозяйственная техника	Уменьшение мощности профиля. Засыпка различными грунтами. Перемешивание генетических горизонтов. Переуплотнение. Разрешение структуры. Каменистость и щебенистость
Истощение	Водная и ветровая эрозия, в том числе усиленная техногенезом. Сельскохозяйственное производство.	Дегумификация. Дефицит валовых и подвижных элементов питания, кальция. Подкисление. Подщелачивание. Снижение численности и видового разнообразия микроорганизмов, активности ферментов. Почвоутомление
Заболачивание	Строительство. Линейные сооружения (дамбы, трубопроводы, автомагистрали). Нарушение дренажных систем осушенных территорий. Сработка торфа. Нерегулируемый выпас скота. Тяжёлая сельхозтехника. Жидкие отходы животноводческих ферм. Вырубка леса	Переувлажнение. Подтопление. Затопление. Повышение уровня грунтовых вод. Увеличение продолжительности поёмности. Пересечение поверхностного стока. Нарушение внутрипочвенного стока
Иссушение	Ксерофитизация климата. Иссушение болот. Сведение леса. Вспашка с оборотом пласта. Чистые и чёрные пары	Сокращение притока грунтовых вод. Усиление поверхностного стока. Возрастание эвапотранспирации. Увеличение испарения влаги. Интенсивная минерализация
Загрязнение	Разведка, добыча, транспортировка и переработка полезных ископаемых. Промышленные, сельскохозяйственные и бытовые выбросы и отходы. Техногенные катастрофы. Сжигание топлива	Углеводородное (нефть сырая и товарная, нефтепродукты, нефтяные шламы). Высокоминерализуемыми нефтепромысловыми сточными водами. Тяжёлыми металлами
Засоление	Развивается в соответствующих условиях после техногенно спровоцированного засоления натрийсодержащими соединениями	Поверхностное. Глубокопрофильное. Полнопрофильное. Сульфатное. Хлоридное. Содовое
Осолонцевание и осолодение	Развивается в соответствующих условиях после техногенно-спровоцированного засоления натрийсодержащими соединениями	Сплошное. Неравномерное. Очаговое
Ландшафтная	Добыча полезных ископаемых. Строительство плотин и дамб. Карст (природный и техногенный)	Образование насыпей (терриконы, отвал). Образование выемок (карьеры, котловины, траншеи, воронки и т.п.)

Вегетационные индексы основаны на отношениях значений яркости в спектральных зонах, наиболее информативных для характеристики растительности. Обычно используют характерный перепад между значениями яркости растительности в красной и ближней инфракрасной зонах. Чтобы понять принцип работы индексов, обратимся к двумерному пространству этих спектральных признаков.

Наиболее часто используемый индекс — нормализованный вегетационный индекс NDVI (англ. Normalized Difference Vegetation Index); широко также используются индексы, базирующиеся на яркостной или физической температуре поверхности.

Космические снимки, как следует из обзора их геоботанического применения, пригодны и для изучения растительности пастбищ и их инвентаризации. Выполняется оценка биомассы пастбищной растительности прерий США, саванн Африки на основе картографирования вегетационного индекса по данным спутников NOAA (*англ.* National Oceanic and Atmospheric Administration, Национальное управление океанических и атмосферных исследований). По снимкам со спутника Landsat впервые на основе их компьютерной обработки проведена инвентаризация и составлены карты оленьих пастбищ Канады, Аляски, Гренландии. В Средней Азии отработана методика оценки состояния пастбищ по снимкам с метеорологических спутников, используемая для определения оптимальных маршрутов перемещения скота (Зейлигер и др., 2019).

Для дешифрирования орошаемых земель используются снимки с оперативностью в один месяц за весь вегетационный период (май – сентябрь). Это обуславливается тем, что период вегетации для разных возделываемых культур тоже разный. Задача выявления используемых в сельском хозяйстве земель может решаться созданием одновременного композита (Золотокрылин, 2009). Для этого выбираются наиболее информативные каналы. В видимом спектре растительность характеризуется наибольшим отражением в зелёной области и низким — в красной за счёт поглощения хлорофилла. С увеличением длины волны отражение начинает возрастать и достигает максимума в ближней инфракрасной области. В частности, для спутника Landsat-5 выбираются 2-й, 3-й, 4-й каналы, что соответствует зелёному, красному и ближнему (*англ.* Near-Infrared, NIR) инфракрасному диапазонам. На *рис. 2* (см. с. 195) представлен пример композита, сложенного из изображений Landsat-5 за июнь, июль и август. Пахотные земли выделяются по характерному рисунку (полосчатая текстура, относительно равномерное распределение растительного покрова), залежи выделяются по пятнистому рисунку растительности, к некоторым из них подходят дорожки от кошар, что может говорить о том, что эти участки используются под пастбища. Дополнительным материалом для дешифрирования может стать нормализованный индекс увлажнения (*англ.* Normalized Difference Water Index — NDWI). Орошаемые земли имеют большее увлажнение по сравнению с землями, которые не используются. Таким образом, сопоставляя мультикомполит и изображения NDWI, можно выделить эти земли (Золотокрылин и др., 2014). Индекс рассчитывается по формуле:

$$NDWI = \frac{NIR - SWIR}{NIR + SWIR},$$

где SWIR — *англ.* Short Wave Infrared — коротковолновый инфракрасный диапазон.

Различия в структуре изображения хозяйств разной производственной направленности, например преобладание рисунка пашен в районах зерново-животноводческого направления со стойловым содержанием скота и отсутствие рисунка пашен в районах животноводческого направления с пастбищным содержанием скота, свидетельствуют о возможности использования космических снимков для анализа особенностей сельскохозяйственного производства в масштабах отдельных стран и мира. Выразительный рисунок сельскохозяйственных угодий делает снимки хорошей основой для сельскохозяйственного районирования территории, которое обычно выполнялось с использованием материалов сельскохозяйственной статистики и получило теперь возможность точной территориальной привязки статистического материала (Ведешин и др., 2011; Шаповалов и др., 2022).

Вегетационный индекс водных запасов WSVI (*англ.* Water Supply Vegetation Index) показывает влияние засухи на сельскохозяйственные культуры, что позволяет картографировать засуху на больших участках.

$$WSVI = \frac{NDVI}{T_s}, \quad (2)$$

где T_s — поверхностная температура в четвёртом спектральном диапазоне радиометра высокого разрешения AVHRR (*англ.* Advanced Very High Resolution Radiometer). Из формулы (2) следует, что чем выше воздействие засухи, тем ниже значение индекса.

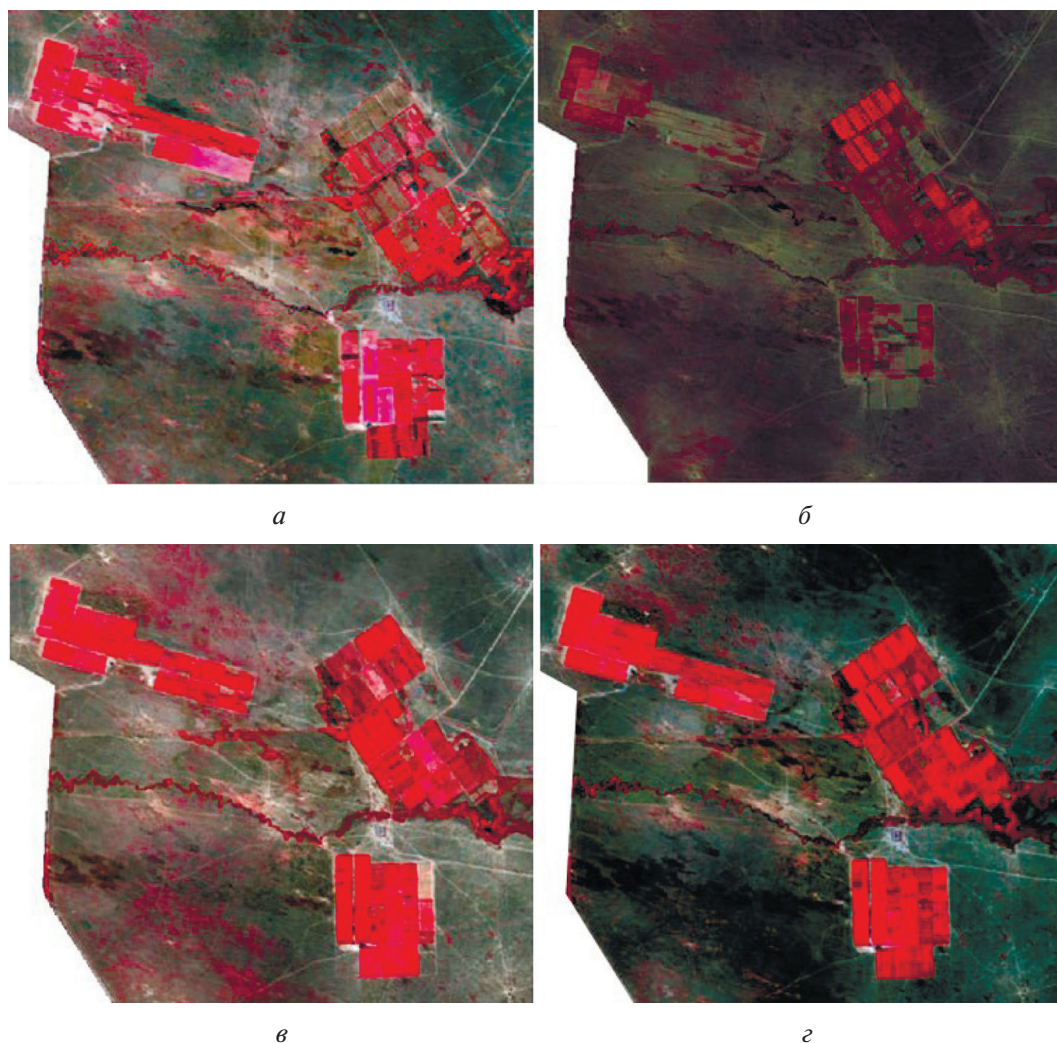


Рис. 2. Составление разновременного композита (г) из снимков Landsat-5: а — за июнь 1986 г.; б — июль 1986 г.; в — август 1986 г.

Индекс засухи ID (*англ.* Index of Drought) прямо пропорционален сумме дневной и ночной температуры и обратно пропорционален вегетационному индексу NDVI. Анализ ряда ночных и дневных изображений в сезон засухи и во влажный год показал, что сельскохозяйственная засуха характеризуется повышенной не только дневной, но и ночной температурой. Понижение температуры ночью приводит к образованию росы и туманов, т. е. к конденсации паров воды на растениях, что позволяет растениям избежать стресс от обезвоживания. В этом случае наступление атмосферной и почвенной засухи не приведёт к развитию сельскохозяйственной засухи. Поскольку при наступлении засухи вегетационный индекс падает, а температура подстилающей поверхности растёт, то для более точного определения момента наступления засухи и территории её распространения предложено использовать индекс засухи ID, вычисляемый по формуле:

$$ID = \frac{T_{4д} + T_{4н}}{NDVI}, \quad (3)$$

где $T_{4д}$ и $T_{4н}$ — (максимальная) дневная и (минимальная) ночная температура за сутки всего наблюдаемого участка, полученная в четвёртом спектральном канале AVHRR (или в аналогичном спектральном диапазоне другой съёмочной аппаратуры). Из выражения (3) следует, что чем выше значение индекса ID, тем больше вероятность засухи. Такой индекс эффективен для открытых типов земных поверхностей: лугов, полей, пастбищ.

В публикации Е. Э. Головинова с коллегами (2018) рассматривается методика проведения классификации мелиорированных земель с использованием морфометрических индексов и снимков Sentinel-2 для получения достоверных и оперативных данных о мелиорированных землях с дальнейшим применением в мониторинге мелиорированных земель. Применение мультиспектральной спутниковой съёмки подробно описано в публикации Головинова с соавторами (2018), где теоретически обосновано применение алгоритма (синтезированный снимок и расчёт индексов) обработки спутниковых снимков для оперативного мониторинга элементов осушительно-увлажнительной системы, позволяющего оперативно выявлять отклонения от проектных параметров и анализировать динамику изменений состояния системы в процессе её эксплуатации. Двухэтапный анализ позволяет выявить максимальное число неисправностей по прямым и косвенным признакам: синтезированный снимок высокого разрешения обеспечивает регистрацию процесса эрозии почвенного покрова на ранних стадиях, а анализ рассчитанных индексов по косвенным признакам — выявление проблемных участков системы, что невозможно сделать при анализе снимков в видимом диапазоне. Отмеченный способ регистрации изменений в системе можно рассматривать как вариант оперативного мониторинга при дистанционном зондировании Земли (Головинов и др., 2018).

После анализа возможностей спутниковых систем и требований к снимкам для мониторинга был сделан вывод, что две спутниковые системы — Landsat-8 и Sentinel-2, которые предоставляют космические снимки в открытом доступе, могут быть использованы для мониторинга мелиорированных земель (Головинов и др., 2018).

Засоленность почв рассматривается как одна из множества причин, вызывающих ухудшение состояния мелиорированных земель (Панкова и др., 2017; Nguyen et al., 2020). В публикациях К. А. Нгуена с соавторами (Nguyen et al., 2020) и Р. Лиссу с коллегами (Lhissou et al., 2014) представлены экспериментальные обоснования метода определения засоленности мелиорированных почв по мультиспектральным снимкам Landsat-8. В данных работах рассмотрена зависимость спектральной отражательной способности растительности в красном и ближнем инфракрасном диапазонах и засоленности почв, исходя из предположения об угнетении растительности при возрастании засоленности почв.

Для достоверности анализа индексных изображений в процессе мониторинга были разработаны требования к исходным мультиспектральным космическим снимкам, используемым для создания индексных изображений, для обеспечения геометрической и спектральной однородности:

- пространственное разрешение космических снимков;
- уровень обработки космических снимков;
- временной период мониторинга;
- вид сельскохозяйственной культуры (желательно, культуры — индикатора засоленности почвы);
- вегетационный период сельскохозяйственной культуры;
- полевая калибровка спутниковых данных (привязка).

Для более надёжного мониторинга перечисленные факторы должны быть по возможности одинаковыми для исследуемых разновременных изображений (Шаповалов и др., 2022).

Кроме того, была составлена *табл. 3*, в которой отражена зависимость решаемых задач от временного, пространственного разрешения и даны рекомендации по использованию спутниковых систем в каждом конкретном случае.

На основании приказа Минприроды России от 30 ноября 1992 г. были выбраны показатели, представленные в *табл. 4*, которые можно использовать при экологическом мониторинге мелиорированных земель по материалам дистанционного зондирования.

Всё чаще стали использоваться БПЛА различных модификаций в зависимости от решения поставленной задачи. Но в силу своих особенностей — размеров БПЛА, времени их нахождения в воздухе и размеров кадра съёмки, необходимости согласования полётного времени с различными инстанциями — такая съёмка чаще всего используется для обследования от-

носителю небольших территорий (мониторинг локального уровня): фермерских хозяйств, сельских поселений (Гутовский и др., 2019; Шаповалов и др., 2022).

Таблица 3. Решаемые задачи по данным ДЗЗ

Решаемые задачи в зависимости от временного и пространственного разрешения	Спутниковые системы / измерительные устройства	Временное разрешение	Пространственное разрешение, м
Выявление эрозии почв, гумусности, засоленности	Landsat-8/OLI + TIRS Landsat-9/OLI2 + TIRS2	14–16 дней (обработка) 4 ч – 3 дня (обработка)	15–30–100
Техногенное воздействие на растительность	Sentinel-2/MSI	5–10 дней	10–20–60
Обезлесивание, опустынивание	CBERS-4/ PanMUX + MUX	3–52 дня	5–10(20)
Сельскохозяйственное использование земель	Resourcesat-2/LISS-4, LISS-3	5 дней	5,8–23,5

Примечание: OLI — *англ.* Operational Land Imager, TIRS — *англ.* Thermal Infrared Sensor, MSI — *англ.* Multispectral Instrument, CBERS-4 — *англ.* China-Brazil Earth Resources Satellite-4, PanMUX — китайская камера Pan, LISS — *англ.* Linear Image Self Scanning System.

Таблица 4. Критерии оценки экологического состояния наземных экосистем по материалам ДЗЗ

№ п/п	Показатели	Параметры		
		Экологическое бедствие	Чрезвычайная экологическая ситуация	Относительно удовлетворительная ситуация
1	Пространственные признаки			
1.1	Площади деградированных территорий:			
1.1.1	не представляющие непосредственной угрозы человеку (отвалы нетоксичных пород; карьеры, деградированные сельскохозяйственные и лесные угодья), %	более 75	50–75	менее 5
1.2	Расчленённость территории оврагами, км/км ²	2,5	0,7–2,5	—
2.	Динамические признаки			
2.1	Скорость увеличения площади сбитых пастбищ, доля площади в год, %	более 8	5–8	менее 2
2.2	Скорость увеличения площади засоленных почв, доля площади в год, %	более 5	2–5	менее 1
2.3	Скорость увеличения площади эродированных почв, доля площади в год, %	более 5	2–5	менее 0,5
2.4	Скорость увеличения площади подвижных песков, доля площади в год, %	более 4	2–4	менее 0,5
2.5	Скорость увеличения относительной площади земель с неблагоприятными агрометеорологическими условиями, доля от площади ценных сельскохозяйственных угодий, доля площади в год, %	более 1	0,3–1,0	менее 0,1

Отдельную группу методов обработки данных ДЗЗ составляют автоматизированные алгоритмы дешифрирования состояния земель по мультиспектральным аэрокосмическим снимкам, позволяющие отнести пиксели снимка к различным классам, характеризующим объекты дешифрирования.

Таким образом, информация космических снимков не ограничивается оперативными сведениями о состоянии посевов сельскохозяйственных культур, а включает широкий круг вопросов, таких как формы территориальной организации сельского хозяйства, применяемые системы земледелия, производственная направленность хозяйств, что даёт возможность проводить многосторонний анализ эффективного использования мелиорированных земель и мониторинг экологической оценки мелиорированных земель на обширные территории (Головинов и др., 2018; Гутовский и др., 2019; Шаповалов и др., 2022).

Выводы и предложения

Таким образом, на основании проведённых исследований можно отметить, что для экологической оценки мелиорированных земель весьма перспективными представляются технологии дистанционного зондирования Земли с использованием мультиспектральных спутниковых снимков и БПЛА. Рассмотренные технологии позволяют осуществлять контроль за состоянием и использованием мелиоративного комплекса, за параметрами деградации почв, эрозией, за изменением состояния растительного покрова на мелиорированных землях, состоянием мелиоративных каналов и сооружений для принятия оперативных мер по повышению эффективности организационных мероприятий и агротехнологий.

Ввиду наличия большого числа источников информации и разного формата предоставляемых данных важно создать на каждом административно-территориальном уровне единое информационное пространство, которое могло бы удовлетворять потребностям всех заинтересованных ведомств и организаций в системе управления земельными ресурсами.

Для разработки и успешного формирования информационного пространства необходимы сбор, обработка и систематизация данных о природном, хозяйственном и правовом положении земель, в данном случае земель сельскохозяйственного назначения. Эти данные получают различными способами и методами, к которым прежде всего относят различные наземные, аэрофотогеодезические и аэрокосмические съёмки, в последнее время наиболее популярными стала съёмка с использованием БПЛА, а также обследования: почвенные, геоботанические, гидрогеологические, агрохимические, статистические и др. Использование тех или иных способов для получения сведений зависит в первую очередь от назначения показателей мониторинга и их актуальности (Барталев и др., 2016; Ведешин и др., 2011; Зонн и др., 2004; Шаповалов и др., 2022).

Для создания карты по данным государственного мониторинга земель сельскохозяйственного назначения сведения о земельных участках получают прежде всего из Единого государственного реестра недвижимости (ЕГРН), по установленной процедуре.

Так как данные, полученные из ЕГРН, предоставляются в формате XML-файла (*англ.* Extensible Markup Language), то для использования полученных данных в ГИС-системах (геоинформационных системах) их необходимо перевести в формат соответствующей геоинформационной системы, используемой для разработки картографических материалов (Шаповалов и др., 2022).

Проанализировав имеющиеся данные, можно сделать вывод, что количество орошаемых и осушаемых земель в мире неуклонно растёт и согласно экспертной оценке к 2030 г. должно достигнуть 1,6 млн га (Шаповалов и др., 2022). К сожалению, в последние годы в РФ наблюдается отрицательный рост площадей орошаемых земель на фоне обратного процесса в развитых странах (Шаповалов и др., 2022). Так, по данным международной комиссии по ирригации и дренажу (МКИД), на сегодняшний день количество орошаемых земель в России меньше, чем в Китае, в 14 раз, чем в Индии — в 8 раз и в 6,5 раз меньше, чем в США. В настоящее время в России необходима разработка и реализация мер по восстановлению и эффективному использованию имеющегося мелиоративного фонда.

Представляется, что актуальной задачей станет и фильтрация исходных мониторинговых данных. Дело в том, что информация об одних и тех же объектах мониторинга может содержаться в различных специальных материалах, предоставляемых министерствами и ведомствами. При этом её точность и детализация могут существенно различаться. Отсюда возникает проблема выделения из имеющихся исходных массивов наиболее качественной по точности и наиболее подробной по содержанию информации.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (тема «Мониторинг», госрегистрация № 122042500031-8).

Литература

1. *Абросимов А. В., Дворкин Б. А.* Перспективы применения данных ДЗЗ из космоса для повышения эффективности сельского хозяйства в России // *Геоматика*. 2009. № 4. С. 45–49.
2. *Акопов А. К., Баула Г. Г., Кривошеин В. В., Кротков А. Ю., Третьяков В. А.* Разработка методики наземных валидационных измерений спектров сельскохозяйственных культур // *Космонавтика и ракетостроение*. 2015. № 6(85). С. 45–50.
3. *Барталев С. А., Егоров В. А., Жарко В. О., Лупян Е. А., Плотников Д. Е., Хвостиков С. А., Шабанов Н. В.* Спутниковое картографирование растительного покрова России. М.: ИКИ РАН, 2016. 208 с.
4. *Блохин Ю. И., Белов А. В., Блохина С. Ю.* Комплексная система контроля влажности почвы и локальных метеословий для интерпретации данных дистанционного зондирования // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2019. Т. 16. № 3. С. 87–95. DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-3-87-95.
5. *Ведешин Л. А., Шаповалов Д. А.* Первые научно-технические эксперименты по космическому земледению (К 60-летию начала работ по космической съемке Земли с пилотируемых космических кораблей) // *Исслед. Земли из космоса*. 2022. № 5. С. 99–102. DOI: 10.31857/S0205961422050086.
6. *Ведешин Л. А., Шаповалов Д. А., Белорусцева Е. В.* Космические информационные технологии для решения сельскохозяйственных задач // *Экологические системы и приборы*. 2011. № 9. С. 3–10.
7. *Виноградов Б. В., Кондратьев К. Я.* Космические методы земледения. Л.: Гидрометеиздат, 1971. 191 с.
8. *Габасова И. М.* Деградация и рекультивация почв Южного Приуралья: автореф. дис. ... д-ра биол. наук / Московская с.-х. акад. им. К.А. Тимирязева. М., 2001. 48 с.
9. *Головинов Е. Э., Бородычев В. В., Лытов М. Н., Киселев С. А.* Мониторинг гидромелиоративных систем по спутниковым снимкам из открытых источников // *Изв. Нижневолж. агроуниверситет. комплекса*. 2018. Т. 4(52). С. 361–369. DOI: 10.32786/2071-9485-2018-04-51.
10. *Гутовский Д. А., Каменев Д. С., Хрущёва Е. О.* Обработка мультиспектральных данных аэрофото-съемки с беспилотного летательного аппарата Sovzond Air-Con 3 // *ГИС-технологии в науках о Земле: материалы Республикан. научно-практ. семинара студентов и молодых ученых*. Минск: БГУ, 2019. С. 114–117.
11. *Зейлигер А. М., Ермолаева О. С., Музылев Е. Л. и др.* Компьютерный анализ режимов водного стресса орошаемых агроценозов с использованием SWAP-модели, а также данных наземного и космического мониторинга // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2019. Т. 16. № 3. С. 33–43. DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-3-33-43.
12. *Золотокрылин А. Н.* Факторы регулирования температуры засушливых земель по данным AVHRR NOAA // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2009. Т. 2. № 6. С. 380–387.
13. *Золотокрылин А. Н., Трофимова И. А., Титкова Т. Б.* Оценка экологического состояния «норма» аридных пастбищ по геоботаническим и MODIS данным // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2014. Т. 11. № 2. С. 197–207.
14. *Золотокрылин А. Н., Титкова Т. Б., Виноградова В. В., Черенкова Е. А.* Воздействие меняющегося климата на засухи, опустынивание и жизнедеятельность населения засушливых земель европейской части России // *Тр. Ин-та геологии Дагестанского науч. центра РАН*. 2016. № 67. С. 97–100.
15. *Зонн И. С., Трофимов И. А., Шамсутдинов З. Ш., Шамсутдинов Н. З.* Земельные ресурсы аридных территорий России // *Аридные экосистемы*. 2004. Т. 10. № 22–23. С. 87–102.
16. *Кринов Е. А.* Спектральная отражательная способность природных образований. М.: Изд-во АН СССР, 1947. 270 с.
17. *Панкова Е. И., Конюшкова М. В., Горохова И. Н.* О проблеме оценки засоленности почв и методике крупномасштабного цифрового картографирования засоленных почв // *Экосистемы: экология и динамика*. 2017. Т. 1. № 1. С. 26–54.

18. Садовников Ю. Н. Природа и количественные закономерности отражения света почвами: дис. ... канд. биол. наук. М., 1979. 224 с.
19. Шаповалов Д. А., Черкашина Е. В., Ключин П. В., Гаврилова Л. А., Лимонов А. Н., Евстратова Л. Г., Савинова С. В., Лепехин П. П., Скубиев С. И., Широков Р. С., Барбасов В. К., Ведешин Л. А., Братков В. В., Мусаев М. Р., Магомедова А. А., Мусаева З. М., Шалов Т. Б. Методы дистанционного зондирования и космическая навигация в технологиях точного земледелия. М., 2022. 423 с.
20. Lhissou R., Harti A. E., Chokmani K. Mapping soil salinity in irrigated land using optical remote sensing data // *Eurasian J. Soil Science*. 2014. V. 3. No. 2. P. 82–88. DOI: 10.18393/ejss.84540.
21. Nguyen K. A., Liou Y. A., Tran H. P. et al. Soil salinity assessment by using nearinfrared channel and Vegetation Soil Salinity Index derived from Landsat-8 OLI data: a case study in the Tra Vinh Province, Mekong Delta, Vietnam // *Progress in Earth and Planetary Science*. 2020. Vol. 7. No. 1. DOI: 10.1186/s40645-019-0311-0.

Methods of using multispectral images in ecological monitoring of reclaimed lands

D. A. Shapovalov¹, L. A. Vedeshin², L. G. Evstratova¹, A. A. Antoshkin²

¹ *State University of Land Use Planning, Moscow 105064, Russia*
E-mail: shapoval_ecology@mail.ru

² *Space Research Institute RAS, Moscow 117997, Russia*
E-mail: vedeshin40@mail.ru

Global climate change makes it necessary to create an agricultural production system adapted to this process in the long term. Many years of experience and the results of studies carried out in the Russian Federation show that it is possible to ensure the further development of the agro-industrial complex only on the basis of the widespread implementation of the results of scientific research and world experience in the effective use of irrigated and drained reclaimed lands. Unfortunately, in many regions of Russia there is a steady downward trend in the use of the reclamation complex. The reorganization of large state irrigation systems in the 1990s led to the formation of new scattered farms on their territory. In accordance with the Decree of the Government of the Russian Federation “On the State Program for the Effective Engagement of Agricultural Land in the Turnover and the Development of the Ameliorative Complex of the Russian Federation in 2022–2031,” the agro-industrial complex is working to introduce technologies for remote sensing of the Earth and digital cartographic data in order to restore the reclamation complex in different regions of the country. As a result, it is planned to bring into circulation 13.2 million hectares of unused land and keep reclaimed soils in agricultural circulation on an area of at least 3.6 million hectares. In addition, it is planned to improve the condition of 2.8 million hectares of soil with the help of special substances - chemical ameliorants. As part of this program, it is also planned to collect up-to-date ground and aerospace information on the state of agricultural land and conduct agrochemical research and cadastral work. The article summarizes the lands ecological monitoring experience of using multispectral images based on literature data and the results of its own research in order to use it for the Russia reclamation complex development.

Keywords: ecological monitoring, reclaimed land, remote sensing methods, index images

Accepted: 21.08.2023

DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-4-187-201

References

1. Abrosimov A. V., Dvorkin B. A., Perspective application of remote sensing data for agricultural efficiency enhancement in Russia, *Geomatica*, 2009, No. 4, pp. 45–49 (in Russian).
2. Akopov A. K., Baula G. G., Krivoshein V. V., Krotkov A. Yu., Tretiakov V. A., The development of methodology for ground validation measurements of range of crop, *Kosmonavtika i raketostroenie*, 2015, No. 6 (85), pp. 45–50 (in Russian).

3. Bartalev S.A., Egorov V.A., Zharko V.O., Loupian E.A., Plotnikov D.E., Khvostikov S.A., Shabanov N.V., *Sputnikovoe kartografirovaniye rastitel'nogo pokrova Rossii* (Land cover mapping over Russia using Earth observation data), Moscow: IKI RAN, 2016, 208 p. (in Russian).
4. Blokhin Yu.I., Belov A.V., Blokhina S.Yu., Integrated system for monitoring soil moisture and local weather conditions for remote sensing data interpretation, *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2019, Vol. 16, No. 3, pp. 87–95 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-3-87-95.
5. Vedeshin L.A., Shapovalov D.A., First scientific and technical experiments in space geography (On the occasion of the 60th anniversary of the start of work on space photography of the Earth from manned spacecraft), *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2022, No. 5, pp. 99–102 (in Russian), DOI: 10.31857/S0205961422050086.
6. Vedeshin L.A., Shapovalov D.A., Belorustseva E.V., Space information technology for the decision of agricultural problems, *Ecological Systems and Devices*, 2011, No. 9, pp. 3–10 (in Russian).
7. Vinogradov B.V., Kondratiev K.Ya., *Kosmicheskie metody zemlevedeniya* (Space methods of geography), Leningrad: Hydrometeorological Publ. House, 1971, 190 p. (in Russian).
8. Gabbasova I.M., *Degradatsiya i rekul'tivatsiya pochv Yuzhnogo Priural'ya: Aftoref. diss. dokt. biol. nauk* (Degradation and recultivation of soils of the Southern Urals, Ext. abstract. Dr. biol. sci. thesis), Russian State Agrarian University — Moscow Timiryazev Agricultural Academy, Moscow, 2001, 48 p. (in Russian).
9. Golovinov E.E., Borodychev V.V., Lytov M.N., Kiselev S.A., Monitoring irrigation and drainage systems from satellite imagery from public sources, *Izvestia of the Lower Volga Agro-University Complex*, 2018, Vol. 4(52), pp. 361–369 (in Russian), DOI: 10.32786/2071-9485-2018-04-51.
10. Gutovsky D.A., Kamenev D.S., Khrushcheva E.O., Processing of multispectral aerial photography data from the unmanned aerial vehicle Sovzond Air-Con 3, *GIS-tehnologii v naukach o Zemle: materialy Respublikanskogo nauchno-prakticheskogo seminarov i molodykh uchenykh*, Minsk: BGU, 2019, pp. 114–117 (in Russian).
11. Zeiliger A.M., Ermolaeva O.S., Muzylev E.L. et al., Computer analysis of water stress regimes of an irrigated agrocoenosis using the SWAP model and ground and space monitoring data, *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2019, Vol. 16, No. 3, pp. 33–43 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-3-33-43.
12. Zolotokrylin A.N., Factors of regulation of the dry lands surface temperature using global AVHRR-derived land climatology, *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2009, Vol. 2, No. 6, pp. 380–387 (in Russian).
13. Zolotokrylin A.N., Trofimova I.A., Titkova T.B., Ecological conditions estimation: “normal” arid pastures by MODIS and geobotanical data, *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2014, Vol. 11, No. 2, pp. 197–207 (in Russian).
14. Zolotokrylin A.N., Titkova T.B., Vinogradova V.V., Cherenkova E.A., The impact of a changing climate on droughts, desertification and the livelihoods of the population of arid lands in the European part of Russia, *Trudy Instituta Geologii Dagestanskogo Nauchnogo Centra RAN*, 2016, No. 67, pp. 97–100 (in Russian).
15. Zonn I.S., Trofimov I.A., Shamsutdinov Z.Sh., Shamsutdinov N.Z., Land resources of Russia arid territories, *Arid ecosystems*, 2004, Vol. 10, No. 22–23, pp. 87–102 (in Russian).
16. Krinov E.A., *Spektral'naya otrazhatel'naya sposobnost' prirodnykh obrazovaniy* (Spectral reflectivity of natural formations), Moscow: Publ. House of the Academy of Sciences of the USSR, 1947, 270 p. (in Russian).
17. Pankova E.I., Konyushkova M.V., Gorokhova I.N., On the problem of soil salinity's evaluation and method of large-scale digital mapping of saline soils, *Ecosystems: Ecology and Dynamics*, 2017, Vol. 1, No. 1, pp. 26–54 (in Russian).
18. Sadovnikov Yu.N., *Priroda i kolichestvennyye zakonomernosti otrazheniya sveta pochvami: Dis. kand. biol. nauk* (Nature and quantitative patterns of light reflection by soils, Cand. techn. sci. thesis), Moscow, 1979, 224 p. (in Russian).
19. Shapovalov D.A., Cherkashina E.V., Klyushin P.V., Gavrilova L.A., Limonov A.N., Evstratova L.G., Savinova S.V., Lepekhin P.P., Skubiev S.I., Shirokov R.S., Barbasov V.K., Vedeshin L.A., Bratkov V.V., Musaev M.R., Magomedova A.A., Musaeva Z.M., Shalov T.B., *Metody distantsionnogo zondirovaniya i kosmicheskaya navigatsiya v tekhnologiyakh tochnogo zemledeliya* (Remote sensing methods and space navigation in precision farming technologies), 2022, 423 p. (in Russian).
20. Lhissou R., Harti A.E., Chokmani K., Mapping soil salinity in irrigated land using optical remote sensing data, *Eurasian J. Soil Science*, 2014, Vol. 3, No. 2, pp. 82–88, DOI: 10.18393/ejss.84540.
21. Nguyen K.A., Liou Y.A., Tran H.P. et al., Soil salinity assessment by using nearinfrared channel and Vegetation Soil Salinity Index derived from Landsat-8 OLI data: a case study in the Tra Vinh Province, Mekong Delta, Vietnam, *Progress in Earth and Planetary Science*, 2020, Vol. 7, No. 1, DOI: 10.1186/s40645-019-0311-0.